



Trabalho 2

Metrologia e Instrumentação para Controle e Automação

Carlos Eduardo dos Santos Junior (16250645)

Professor: Dr. Ciro André Pitz

BLUMENAU /SC - Abril, 2021

- 1) **(6 pontos)** Na medição de temperatura com termopar, sabe-se que é necessário compensar a temperatura da junção de referência para obter uma medida adequada da temperatura do processo. Uma das formas de realizar essa compensação é usar um sensor de temperatura para medir a temperatura da junção e, em seguida, gerar uma tensão elétrica que compense a queda de tensão na junção de referência do termopar. Nesse contexto, o objetivo desta primeira parte do trabalho é compensar a junção de referência de um termopar tipo J usando um termistor e uma ponte de Wheatstone. O diagrama geral da medição é apresentado na Figura 1.

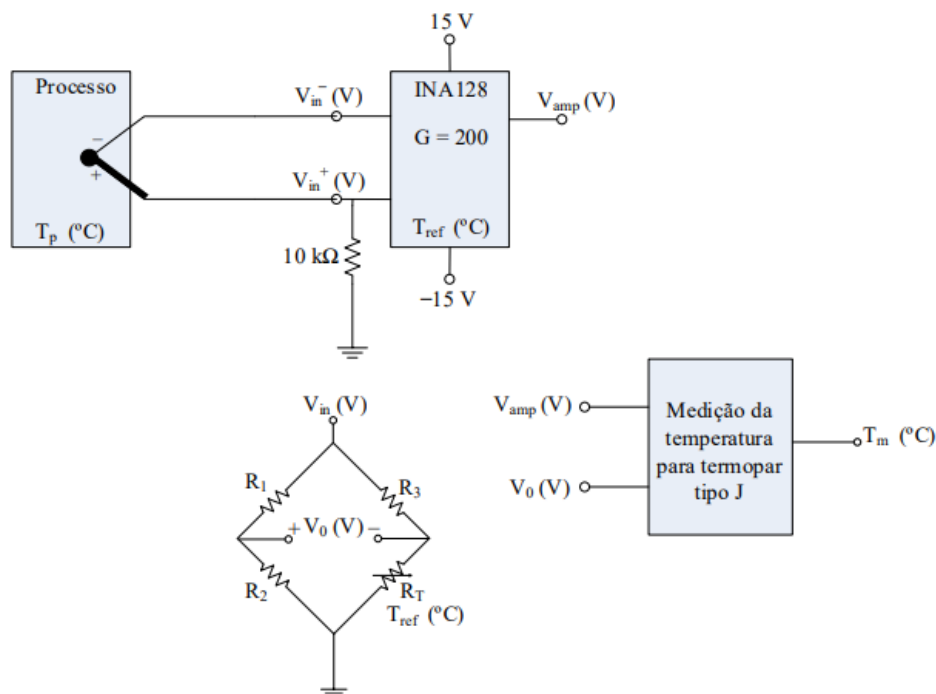


Figura 1 – sistema de medição de temperatura com termopar e compensação da junção de referência com termistor.

Figura 1: Enunciado.

A seguir são apresentadas as principais informações sobre a implementação no LTspice.

- O termopar deve ser implementado através da biblioteca “TC_J.sub” disponível no Moodle.

Figura 2: Dicas e Informações 1.

- Conforme apresentado na Figura 2, a temperatura do processo e a temperatura da junção de referência devem ser fornecidas através de fontes de tensão CC, sendo que nesse caso o valor da tensão é o valor da temperatura em °C. O parâmetro global “temp” no LTspice contém a temperatura ambiente considerada na simulação. Essa temperatura ambiente será usada como a temperatura da junção de referência (T_{ref}).
- O amplificador de instrumentação INA128 deve ser implementado através da biblioteca “INA128.sub” (disponível no Moodle), com ganho $G = 200$. O *datasheet* do INA128 também está disponível no Moodle.
- Considere que a temperatura da junção de referência (T_{ref}) pode variar entre 0 °C e 50 °C. Nessa faixa, o termopar tipo J apresenta comportamento aproximadamente linear com sensibilidade 0,0517 mV/°C, resultando em $V_T = 0,0517 \cdot T$ mV para $0 \leq T \leq 50$ °C. Dessa forma, faça o projeto da ponte de Wheatstone com o objetivo de fornecer a tensão $V_0 = 200 \cdot V_T$ para $0 \leq T \leq 50$ °C, onde V_0 é a tensão indicada na Figura 1. A não linearidade de V_0 deve ser inferior à 2%.
- O termistor apresenta resistência de 12 k Ω em 298 K, com $\beta = 3740,0$.
- Para obter o resultado da temperatura lida pelo sistema de medição, implemente uma função no LTspice que receba como argumentos de entrada as tensões V_0 e V_{amp} (em V). O retorno da função deve ser a temperatura T_m indicada na Figura 1. Essa função pode ser implementada diretamente no gráfico de saída do LTspice. Os coeficientes para implementação da função podem ser obtidos no seguinte link:

○ https://srdata.nist.gov/its90/type_j/jcoefficients_inverse.html

Figura 3: Dicas e informações 2.

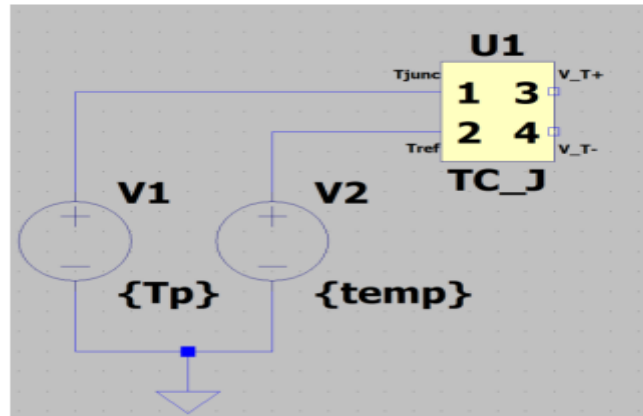


Figura 4: Dicas e Informações 4.

Roteiro

- Apresente os cálculos e gráficos usados para projetar a ponte de Wheatstone.
- Descreva a implementação de todo o sistema de medição no LTspice.
- Para uma temperatura do processo de 650 °C, varie a temperatura da junção de referência (T_{ref}) entre 0 ° e 50 °C. Demonstre, a partir de um gráfico no LTspice, que a temperatura lida pelo sistema fica em torno de 650 °C.
- Para uma temperatura na junção de referência (T_{ref}) de 40 °C, varie a temperatura do processo (T_p) entre 300 ° e 650 °C. Demonstre, a partir de um gráfico no LTspice, que a temperatura lida pelo sistema corresponde à temperatura do processo.

Figura 5: Roteiro questão 1.

a) Primeiramente iremos calcular a resistência mínima e máxima a partir da equação abaixo.

$$R_t = R_{298K} e^{\beta(\frac{1}{T} - \frac{1}{298})} \quad (i)$$

sendo, $R_{298K} = 25\text{ }^{\circ}\text{C}$, do enunciado, temos que a temperatura mínima é de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a temperatura máxima é de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, com essas informações a partir da equação (I), do valor de $\beta = 3740$ que nos foi fornecido pelo fabricante, e do $R_{298K} = 12k\Omega$ podemos calcular as resistências.

$$R_{T\text{ máx}} = 37871,72\text{ }\Omega \text{ a } 273\text{ K e } 0\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$R_{T\text{ mín}} = 4542,69\text{ }\Omega \text{ a } 323\text{ K e } 50\text{ }^{\circ}\text{C}$$

Sabemos que $V_T = 0,0517 * T\text{ mV}$, onde T é a temperatura, que no nosso caso varia de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $50\text{ }^{\circ}\text{C}$, neste caso foi-se utilizado em Graus Celsius, pois o enunciado nos deu o valor de T entre 2 valores em Graus Celsius, logo, o nosso V_T variável é de:

$$V_{T\text{ mín}} = 0\text{ V}$$

$$V_{T\text{ máx}} = 2,585\text{ mV}$$

Com essa informação, e utilizando o enunciado que foi fornecido; podemos calcular o valor máximo e mínimo da tensão V_0 , pelo enunciado temos que $V_0 = 200 V_t$, logo:

$$V_{0\text{ mín}} = 0\text{ V}$$

$$V_{0\text{ máx}} = 0,517\text{ V}$$

Para início do projeto da ponte de Wheatstone, primeiramente iremos considerar a figura abaixo.

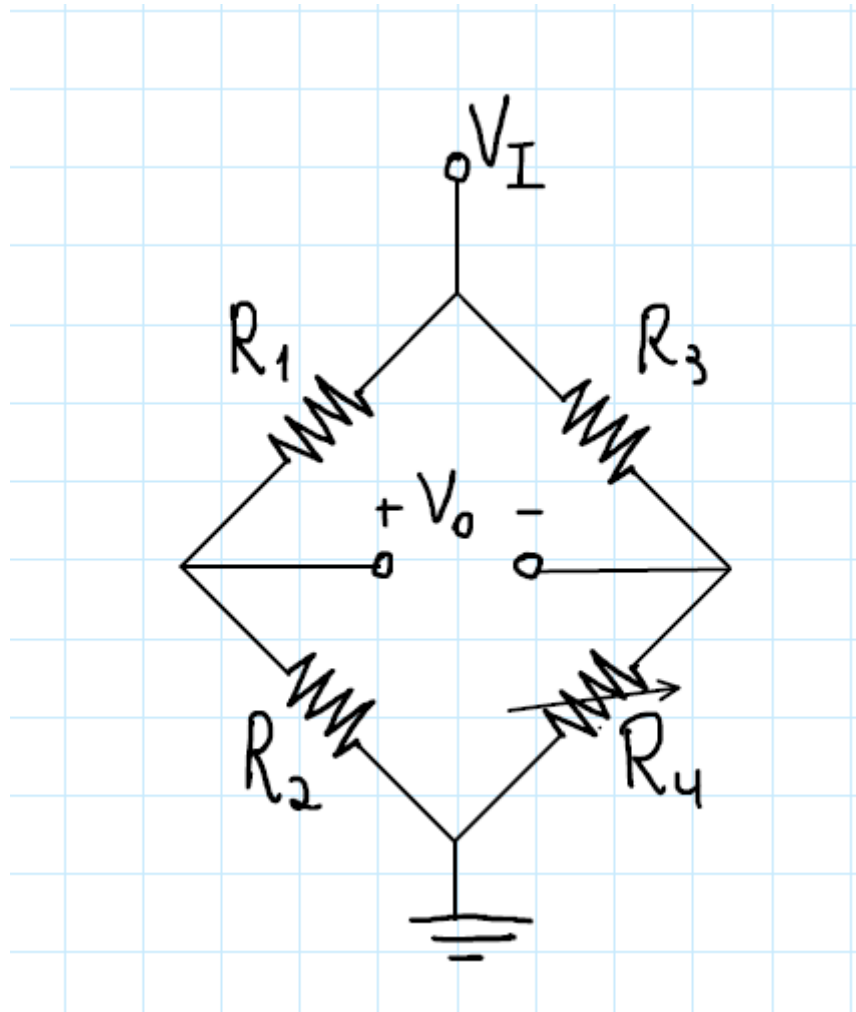


Figura 5: Representação da Ponte de Wheatstone.

Considerando a Figura 5, iremos projetar nossa ponte utilizando R_4 como nossa resistência variável da ponte, em que iremos utilizar o termistor.

Com o sensor alocado em R_4 , como dito anteriormente temos a seguinte expressão, já deduzida em aulas.

$$V_0 = V_I \left(\frac{1}{1 + \frac{R_1}{R_2}} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_4}} \right), \text{ para encontrar o } V_{0 \text{ máx}} \text{ utilizamos o}$$

$R_{T \text{ mín}}$, logo, substituindo os valores, e considerando $\frac{R_1}{R_2} = r$, temos a seguinte expressão

$$0,517 = V_I \left(\frac{1}{1 + r} - \frac{1}{1 + \frac{R_3}{R_{T \text{ mín}}}} \right) \text{ (ii)}$$

sabemos por dedução da ponte, que:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_{T \text{ máx}}}$$

isolando R_3 e substituindo $\frac{R_1}{R_2} = r$, temos:

$$R_3 = r R_{T \text{ máx}}$$

substituindo na equação (ii), ficamos com:

$$0,517 = V_I \left(\frac{1}{1+r} - \frac{1}{1 + \frac{r R_{T \text{ máx}}}{R_{T \text{ mín}}}} \right)$$

agora, substituindo os valores de $R_{T \text{ máx}} = 37871,72 \, \Omega$ a $273 \, K$ e

$R_{T \text{ mín}} = 4542,69 \, \Omega$ a $323 \, K$, a expressão será:

$$0,517 = V_I \left(\frac{1}{1+r} - \frac{1}{1 + \frac{r \cdot 37871,72}{4542,69}} \right),$$

$$0,517 = V_I \left(\frac{1}{1+r} - \frac{1}{1 + 8,34r} \right),$$

$$V_I = \frac{0,517}{\left(\frac{1}{1+r} - \frac{1}{1 + 8,34r} \right)} \quad (\text{iii})$$

Agora, precisamos achar o valor de r , precisamos nos preocupar com a condição de linearidade que é de não linearidade $< 2 \, \%$

Para isso precisamos achar uma equação de reta do tipo $y = mx + b$, que define como irá variar nossa tensão, em função da temperatura (em um caso linear), utilizando as tensões mínimas e máximas e temperaturas mínimas e máximas, temos que essa equação será dada por:

$$V_{0 \text{ Linear}} = \frac{T - 273}{96,71} (iv),$$

onde para acharmos o valor de m (inclinação de reta), apenas fizemos o $\frac{\Delta y}{\Delta x}$, onde Δy é nossa variação de tensão e Δx nossa variação de temperatura.

Iremos utilizar a expressão (iv) Para plotar em nosso gráfico, queremos ilustrar uma curva que representa a linearidade.

Sabemos que a equação de Não Linearidade (NL) é descrita por:

$$NL_{\%} = \left| \frac{V_0 - V_{0 \text{ Linear}}}{V_{o \text{ Máx}}} \right|$$

A partir do algoritmo disponibilizado pelo professor e substituindo os valores dos nossos cálculos, utilizando-se da equação (iii), teremos o seguinte resultado gráfico para diferentes valores de r , ilustrado na figura abaixo.

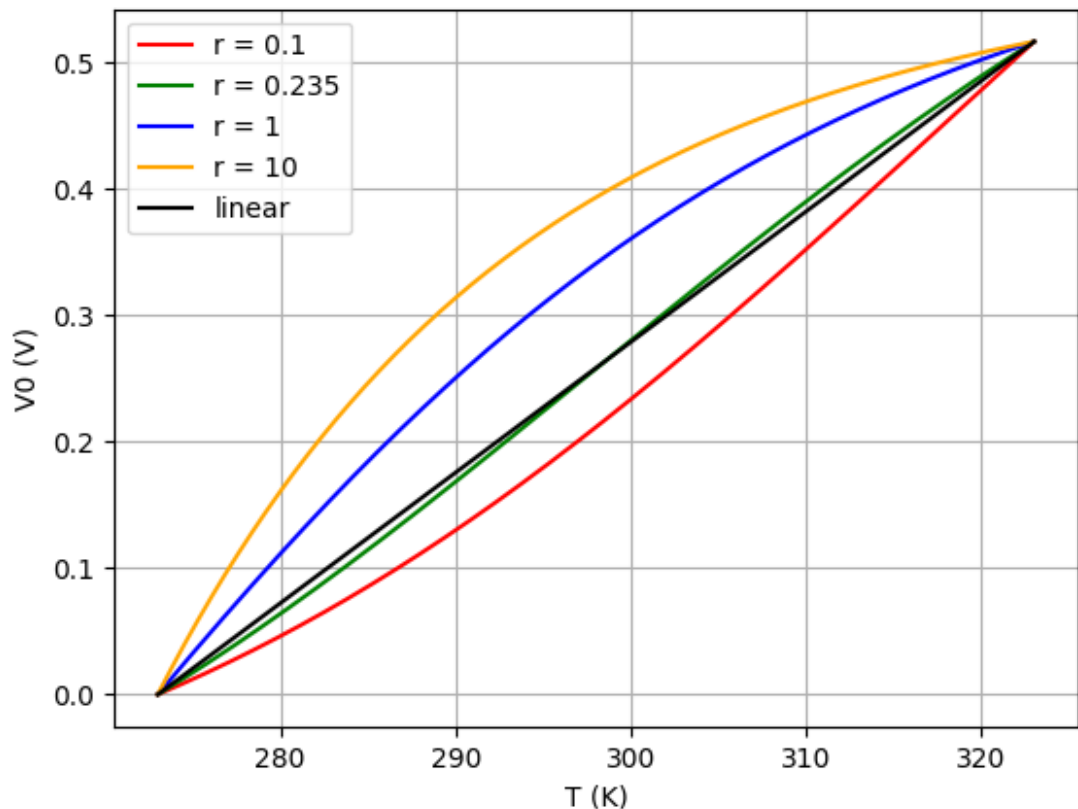


Figura 6: Gráfico de representação linear de acordo com r .

A partir da análise da Figura 6, podemos ver que as curvas com $r = 0,1$, $r = 1$ e $r = 10$, fogem demais de nossa curva linear plotada na cor preta, então neste caso iremos escolher a curva

$r = 0,235$, pois é a que mais se adequa a curva linear, aproximando esta situação em um gráfico onde mostra a relação não linear do sistema, temos a seguinte ilustração abaixo.

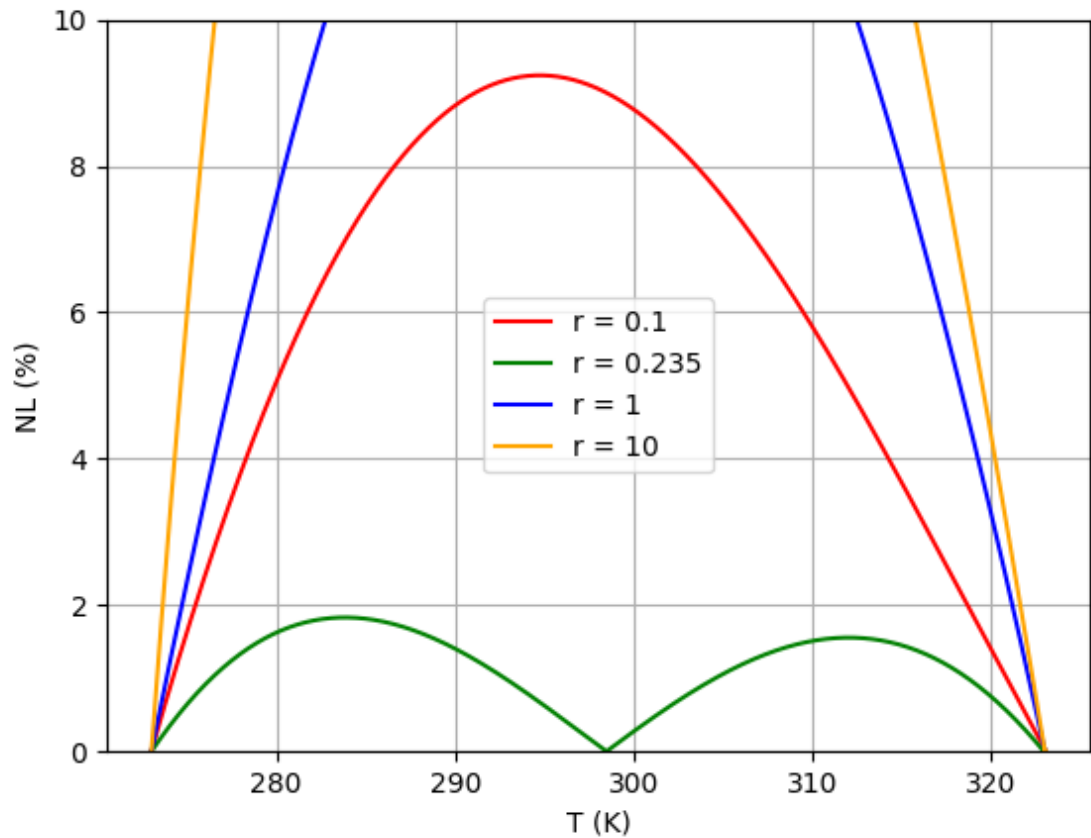


Figura 7: Representação da não linearidade com o aumento da temperatura.

A partir da Figura 7, podemos constatar que nossa curva verde, com $r = 0,235$, satisfaz a condição inicial de não linearidade, exigida pelo projeto, que deveria ser menor que 2 %.

Nosso $R_3 = r R_{T_{máx}}$, portanto:

$$R_3 = 0,235 * 37871,72 = 8,9 \text{ k}\Omega$$

Utilizando-se da expressão (iii), podemos calcular V_I , portanto, temos que $V_I = 1,09 \text{ V}$

Podemos também calcular a corrente elétrica que passa sobre nosso termistor.

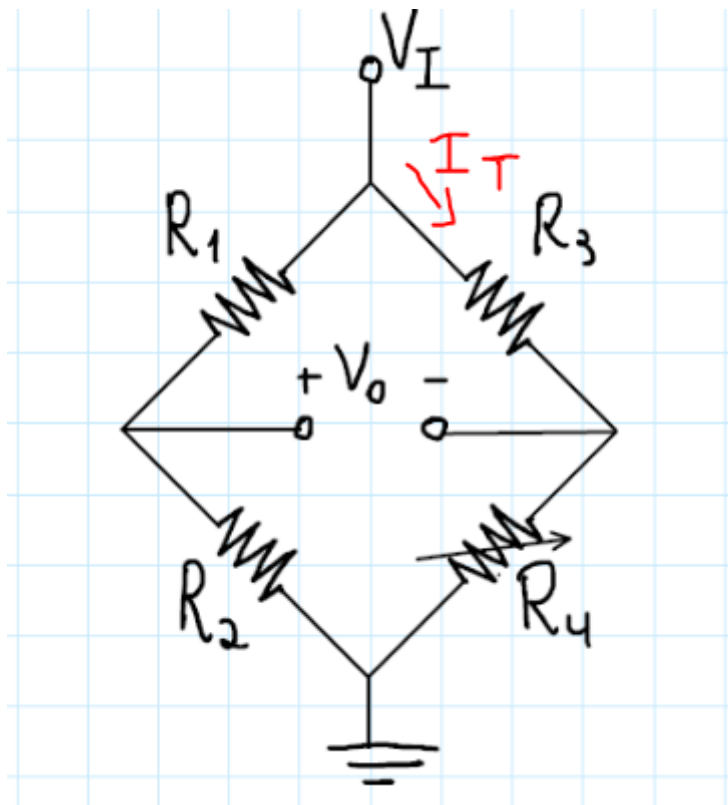


Figura 8: Representação da corrente a ser calculada.

Pela figura acima podemos, ver a representação da corrente I_T que passa sobre nosso termistor

Queremos essa corrente máxima, pois, sabemos que correntes muito altas podem gerar superaquecimento, então, para calcular nossa corrente máxima, precisamos de utilizar nossa resistência mínima, e da Figura 8, podemos facilmente ver a equação que descreve essa corrente que é dada por:

$$I_{T \text{ máx}} = \frac{V_I}{R_3 + R_{T \text{ min}}}, \text{ substituindo os valores, temos:}$$

$$I_{T \text{ máx}} = \frac{1.09}{13.442 \text{ k}} = 0,08 \text{ mA}$$

Como não teve nenhuma condição de corrente elétrica no enunciado, podemos passar para o último passo do projeto de Wheatstone.

Para, enfim concluir nosso projeto, teremos que arbitrar um dos resistores, R_1 ou R_2 satisfazendo a equação, dada por:

$r = \frac{R_1}{R_2}$, sabendo que $r = 0,235$, e escolhendo $R_2 = 10k\Omega$, temos um resistor R_1 de $2,35k\Omega$.

Portanto, as variáveis de nosso projeto ficaram com os seguintes valores:

$$R_1 = 2,35k\Omega$$

$$R_2 = 10k\Omega$$

$$R_3 = 8,9k\Omega$$

$$V_I = 1,09V$$

$$I_{T\text{ máx}} = 0,08mA$$

b) Para as simulações da ponte serão utilizados 3 componentes principais, o amplificador de instrumentação utilizado também no primeiro trabalho INA128, este amplificador fará com que a leitura de tensão seja mais fiel ao resultado real, diminuindo ruídos e etc, abaixo será ilustrada a figura que representará o mesmo na simulação do LTSpice, o componente será o INA128 mesmo, o B é só para não dar conflito com o INA128 do trabalho 1.

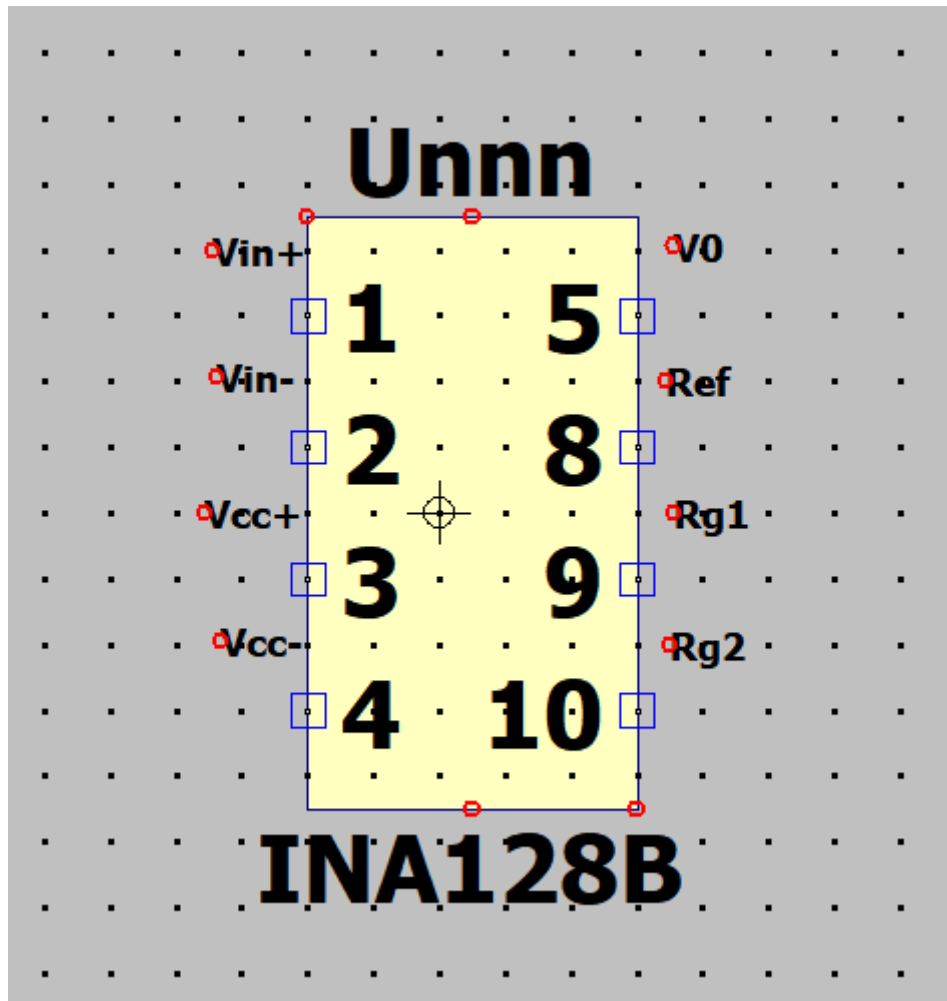


Figura 9: Amplificador de instrumentação INA 128.

Como o ganho de tensão do nosso sistema é de $V_0 = 200 V_t$, iremos utilizar o ganho de 200, para calcular a resistência R_G do nosso amplificador, pelo datasheet disponibilizado pelo professor, podemos ver a equação do ganho para o amplificador de instrumentação INA 128, mostrado abaixo.

8.2 Functional Block Diagram

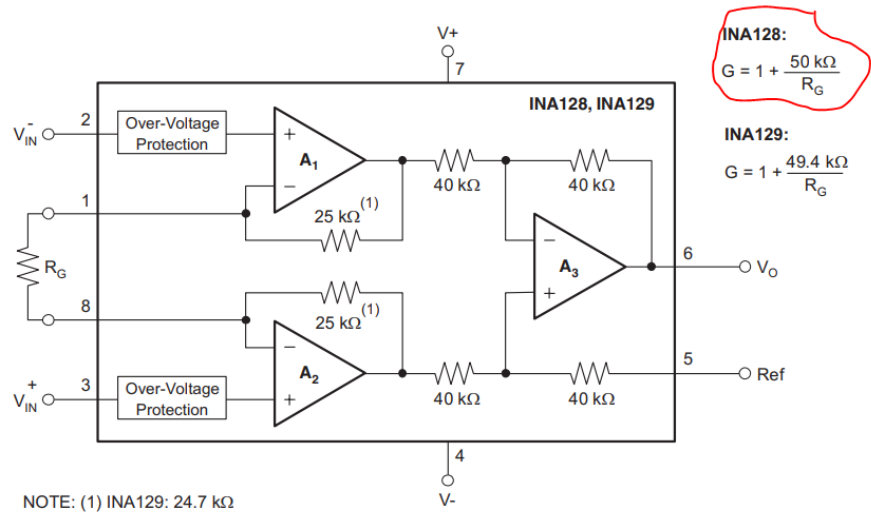


Figura 10: Amplificador de Instrumentação, diagrama de bloco funcional e Fórmula do ganho.

Então, pela fórmula do ganho, obteremos o nosso R_G

$$G = 1 + \frac{50 \text{ k}\Omega}{R_G}, \text{ com } G = 200, \text{ então}$$

$$R_G = 251,26$$

O R_G será utilizado para nossa simulação.

Outro componente que será utilizado para simulação, será o termopar do Tipo J, ele será utilizado junto a nossa ponte projetada para fazermos a medição de temperatura do sistema.

Consideramos também a equação que fará uma relação entre tensão medida e temperatura de nosso termopar tipo J, ela seguirá o padrão ITS-90.

$$t_{90} = d_0 + d_1 E + d_2 E^2 + \dots d_n E^n$$

A equação acima foi retirada do site National Institute of Standards and Technology, onde os coeficientes $d_0, d_1, d_2, \dots, d_n$ foram utilizados de

acordo com os valores fornecidos pela própria fonte, para isso criamos uma função no LTSpice para chamá-las, sendo estes coeficientes utilizados para a função ilustrados na figura abaixo.

Type J Thermocouples Coefficients in mV		
Temperature Range:		
Voltage Range:		
$d_0 =$	$-210\text{ }^{\circ}\text{C to }0\text{ }^{\circ}\text{C}$	$0\text{ }^{\circ}\text{C to }760\text{ }^{\circ}\text{C}$
$d_1 =$	$-8.095\text{ mV to }0\text{ mV}$	$0\text{ mV to }42.919\text{ mV}$
$d_2 =$	0.0000000×10^0	0.0000000×10^0
$d_3 =$	1.9528268×10^1	1.978425×10^1
$d_4 =$	-1.2286185×10^0	-2.001204×10^{-1}
$d_5 =$	-1.0752178×10^0	1.036969×10^{-2}
$d_6 =$	$-5.9086933 \times 10^{-1}$	-2.549687×10^{-4}
$d_7 =$	$-1.7256713 \times 10^{-1}$	3.585153×10^{-6}
$d_8 =$	$-2.8131513 \times 10^{-2}$	-5.344285×10^{-8}
$d_9 =$	$-2.3963370 \times 10^{-3}$	5.099890×10^{-10}
$d_{10} =$	$-8.3823321 \times 10^{-5}$	
Error Range:	$-0.05\text{ }^{\circ}\text{C to }0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$	$-0.04\text{ }^{\circ}\text{C to }0.04\text{ }^{\circ}\text{C}$
Select Temperature Range		760 °C to 1200 °C
Coefficients : Select Coefficients Table		42.919 mV to 69.553 mV
		-3.11358187×10^3
		3.00543684×10^2
		-9.94773230×10^0
		$1.70276630 \times 10^{-1}$
		$-1.43033468 \times 10^{-3}$
		$4.73886084 \times 10^{-6}$
		$-0.04\text{ }^{\circ}\text{C to }0.03\text{ }^{\circ}\text{C}$

Figura 11: Coeficientes.

No nosso caso utilizamos os coeficientes circulados em vermelho onde abrangem a variação de temperatura de $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $760\text{ }^{\circ}\text{C}$

Abaixo será ilustrado a representação do termopar tipo J, componente utilizado no LTSpice.

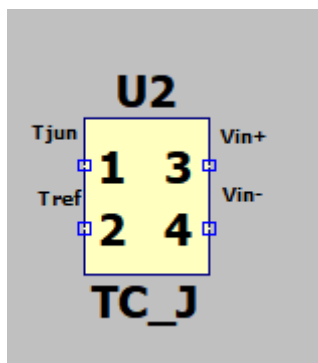


Figura 12: Termopar do Tipo J.

Por fim, iremos utilizar a ponte projetada, com o termistor associado, em sua R4, como já explicado na parte 1, abaixo a ilustração desse circuito.

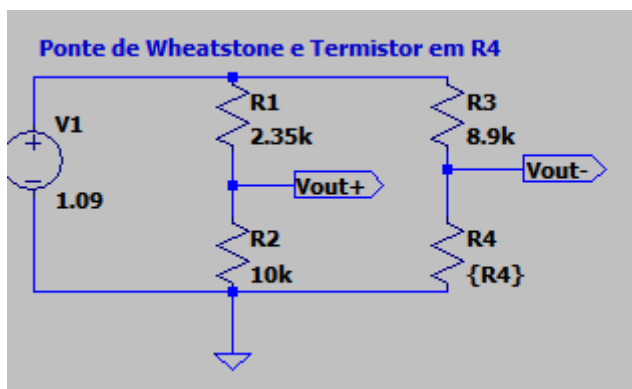


Figura 13: Ponte de Wheatstone com termistor.

c) Após isso, foi simulado o circuito demonstrado abaixo, com temperatura de processo $T_p = 650\text{ }^{\circ}\text{C}$.

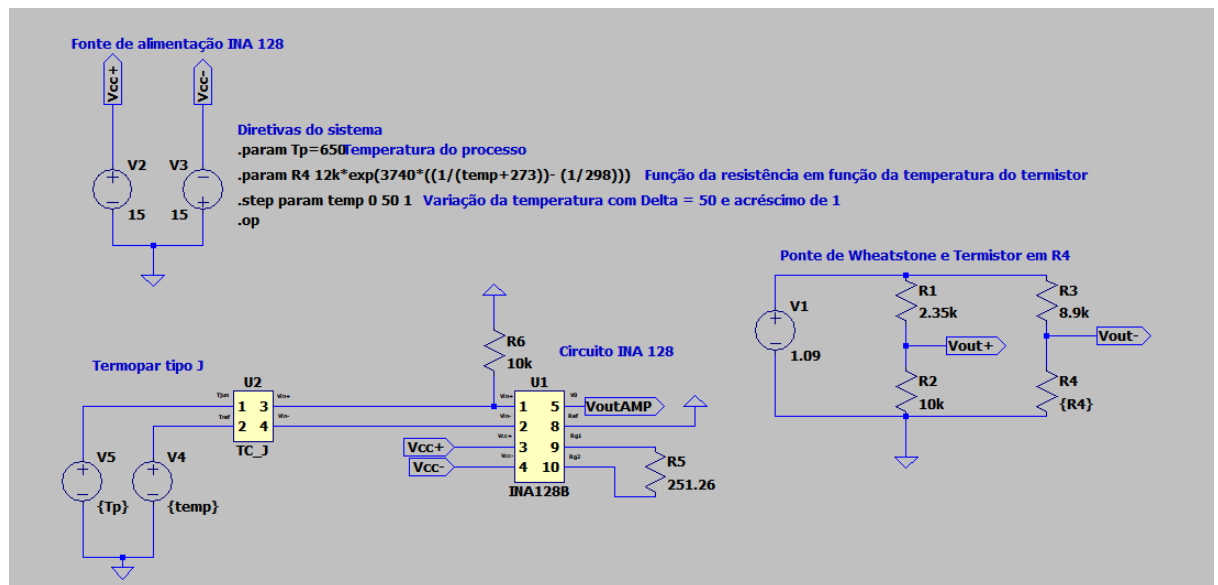


Figura 14: Circuito Simulado.

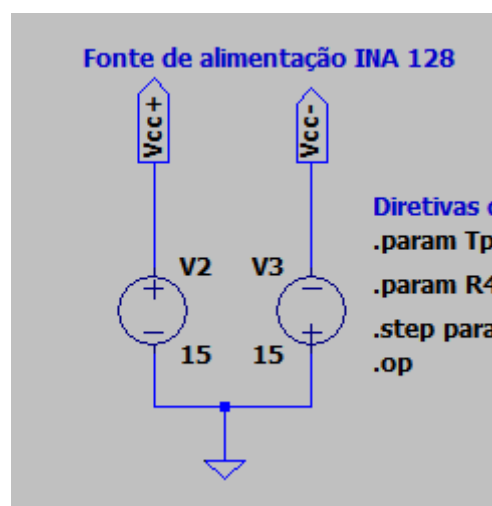


Figura 15: Fonte de Alimentação

Fonte de alimentação do INA 128.

Diretivas do sistema

.param Tp=650 **Temperatura do processo**

.param R4 12k*exp(3740*((1/(temp+273))-(1/298))) **Resistência em função da temperatura do termistor**

.step param temp 0 50 1 **Varição da temperatura com Delta = 50 e acréscimo de 1**

.op

Figura 16: Diretivas do sistema.

Diretivas do sistema, comentários ao lado

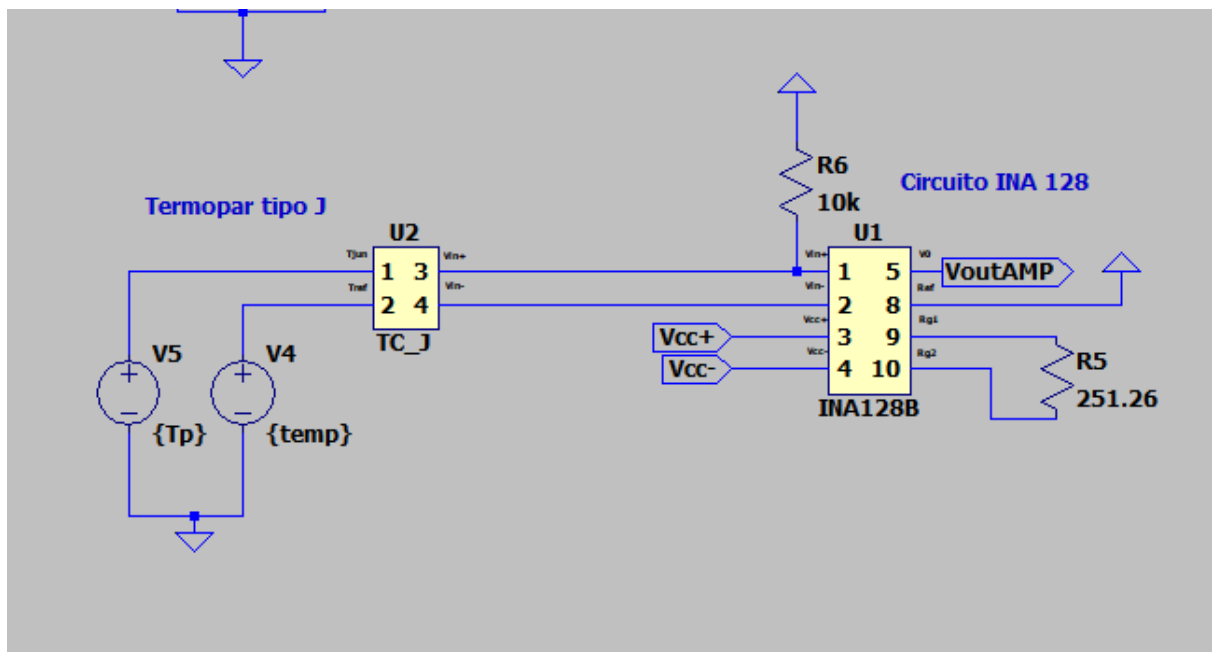


Figura 17: Termopar e INA 128.

Estes são os 2 componentes citados no item B deste trabalho.

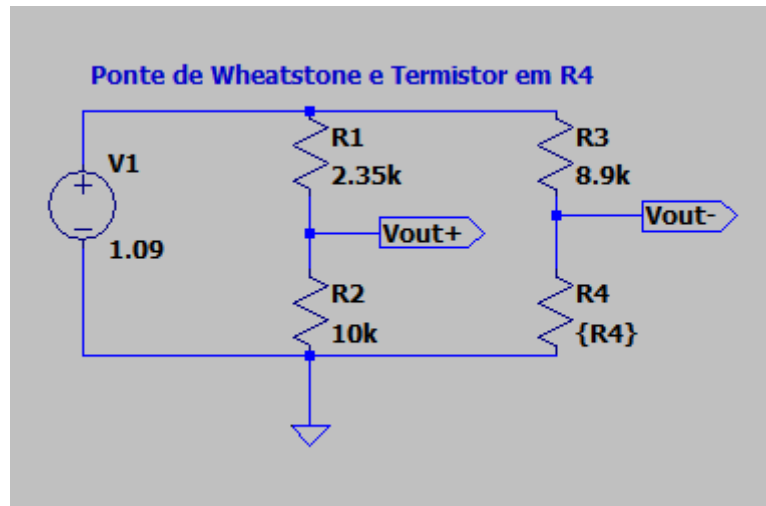


Figura 18: Ponte de Wheatstone.

Conforme projetamos na parte A do trabalho.

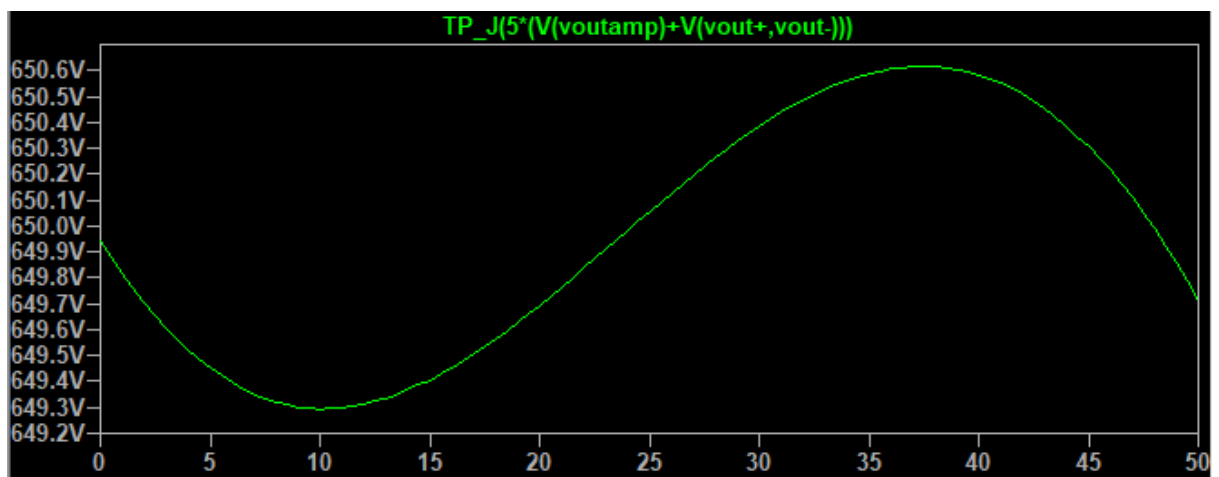


Figura 19: Resultado da simulação em C.

Podemos observar pelo gráfico que a tensão está em torno de 650 V, sendo seu pico em aproximadamente 650.6 e seu vale em 649.2, com este resultado pudemos observar que o sistema cumpriu com seu papel respeitando a não linearidade de 2%.

Para esta simulação utilizamos a função do termopar e passamos como parâmetro a soma das tensões VampOUT e Vout que é a diferença entre nossa variáveis Vout+ e Vout-, para isto, multiplicamos esta tensão por 5, que seria o resultado da divisão da nossa tensão passa para mV ou seja, multiplicada por 1000 e dividida pelo nosso ganho G do INA 128 que era de 200, por tanto, $\frac{1000}{200} = 5$.

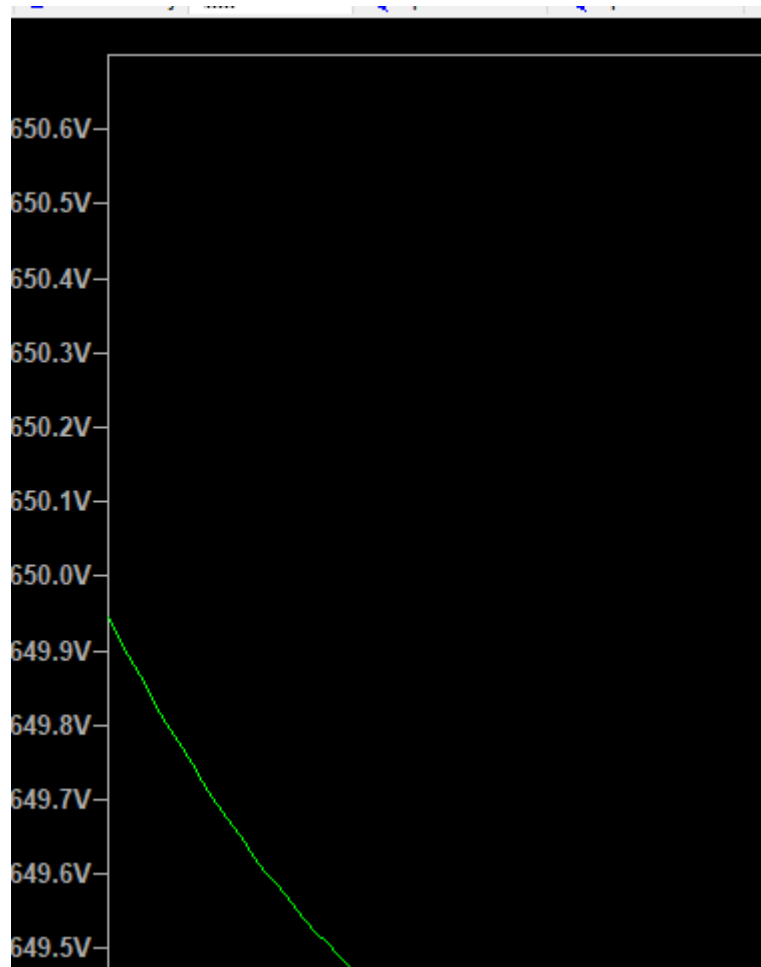


Figura 20: Gráfico ampliado.

Para melhor visualização do leitor, foi ampliado o gráfico no eixo da tensão para visualização de sua tensão e para base de quanto ela varia, a temperatura variou conforme projetado de 0°C a 50°C .

- d)** Agora, iremos fazer uma simulação com a temperatura fixa em 40°C e variando nossa temperatura de processo entre 350° a 650° .

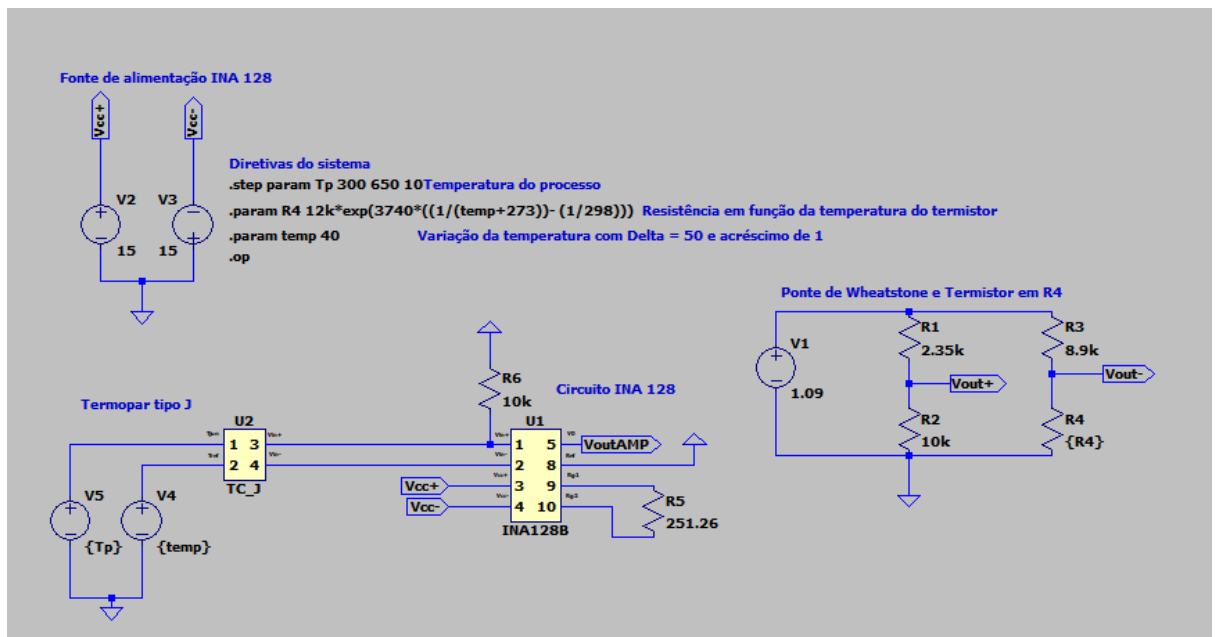


Figura 21: Esquemático do sistema para o item D.

Diretivas do sistema

```

.step param Tp 300 650 10 Temperatura do processo agora variando de 300 a 650 com acrescimo de 1
.param R4 12k*exp(3740*((1/(temp+273)) - (1/298))) Resistência em função da temperatura do termistor
.param temp 40 Temperatura constante em 40 Graus Celsius
.op

```

Figura 22: Diretivas do sistema.

Nesta parte do trabalho o que foi-se mudado para a simulação são as diretivas, pois queríamos manter a temperatura na junção constante e variar a temperatura no processo.

Utilizando-se dos mesmos recursos de simulação adotados para parte C, obtivemos o seguinte resultado.

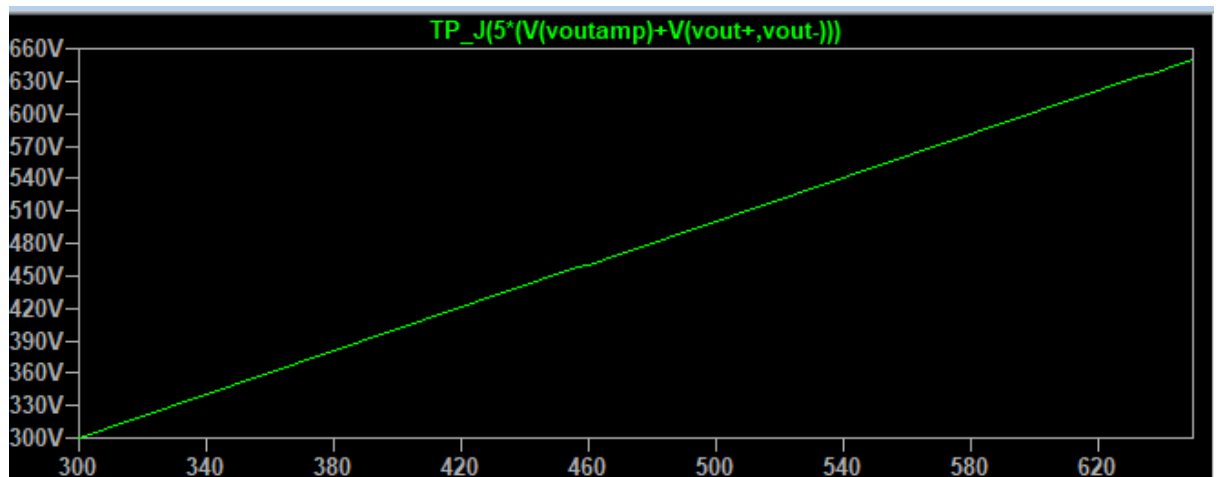


Figura 23: Resultado da simulação em D.

Para este sistema obtivemos um resultado esperado em relação a linearidade onde conforme a temperatura (eixo das abscissas) varia a tensão a acompanha.

Parte 2

- 2) **(4 pontos)** A medição de deformação com extensômetro apresenta dois principais problemas: 1 – a resistência elétrica dos extensômetros varia com a temperatura; 2 – baixa variação da resistência em função da deformação (baixa sensibilidade). Para superar tais problemas, tipicamente são utilizados mais de um extensômetro na ponte de Wheatstone para compensar a temperatura e/ou aumentar a sensibilidade. Na Figura 3 são apresentadas três configurações de medição de deformação com extensômetro: (a) apenas um extensômetro; (b) dois extensômetros iguais; e (c) quatro extensômetros iguais. Considere

Figura 24: Enunciado 1 da parte 2.

resistores de carbono com coeficiente de temperatura (t_c) igual a $-0,5 \text{ m } ^\circ\text{C}^{-1}$ e extensômetros de alumínio com $t_c = 3,9 \text{ m } ^\circ\text{C}^{-1}$. O *gauge fator* dos extensômetros é $G = 2,2$ e a resistência sem deformação é $R_{e=0} = R_0 = 120 \text{ } \Omega$. Considere que a deformação por compressão varia na faixa $-8 \cdot 10^{-3} \leq e \leq 0$ e a deformação por tração varia na faixa $0 \leq e \leq 8 \cdot 10^{-3}$.

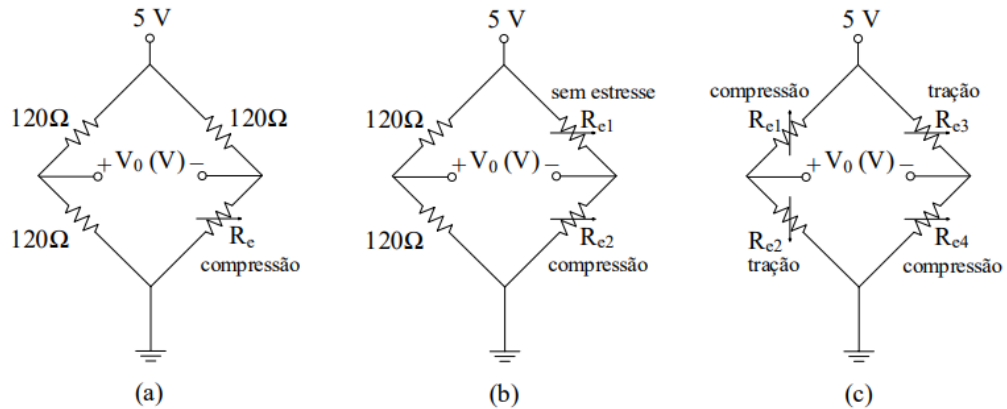


Figura 3 – Medição de deformação com extensômetro: (a) apenas um extensômetro; (b) dois extensômetros iguais, um sob compressão e outro sem estresse; e (c) quatro extensômetros iguais, dois sob tração e dois sob compressão.

Figura 25: Enunciado 2 da parte 2.

Roteiro

- Obtenha o gráfico da tensão V_0 em função da deformação para cada um dos circuitos apresentados na Figura 3. Neste item, use $t_c = 0$ para todos os componentes, ou seja, a resistência não varia com a temperatura. Compare as curvas obtidas e discuta sobre as vantagens e desvantagens de cada circuito.
- Obtenha o gráfico da tensão V_0 em função da deformação para cada um dos circuitos apresentados na Figura 3. Neste item, considere a variação da resistência em função da temperatura. Varie a temperatura ambiente (parâmetro “temp” no LTspice) na faixa $0 \leq T \leq 50^\circ \text{ C}$. Compare as curvas obtidas e discuta sobre as vantagens e desvantagens de cada circuito.

Figura 26: Roteiro da parte 2.

a) Nesta primeira parte, a resistência não varia com a temperatura, então, a primeira coisa a ser feita foi projetar os 3 circuitos a,b e c no LTSpice conforme ilustrado na figura abaixo.

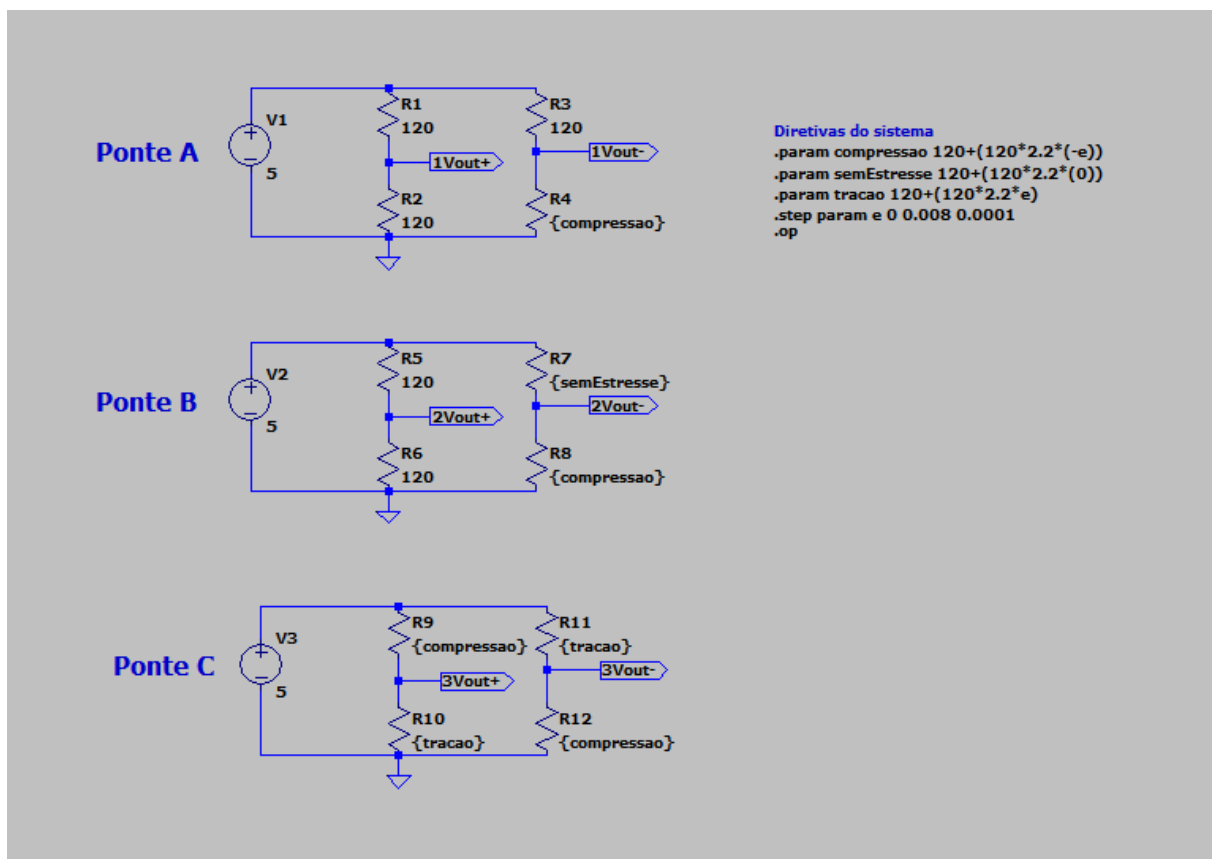


Figura 27: Esquemático das pontes.

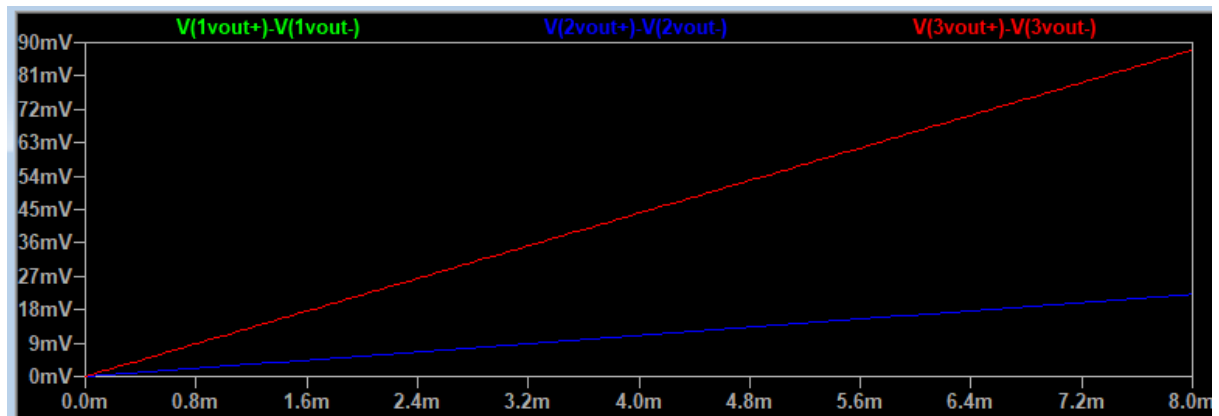


Figura 28: Simulação das deformações nas pontes.

Pela Figura acima, podemos constatar que a curva vermelha da ponte C, tende a sofrer uma maior variação de tensão conforme a extensão, as pontes A e B, possuíam o mesmo resultado para experimento, pois sem estresse já sabíamos que haveria um ganho unitário ali como vimos em aula sob mesma temperatura, e que o estresse é quem possui a relação de deformação com variáveis de força e área.

O comportamento de ambos os sistemas possuem um comportamento linear devido ao uso da ponte de Wheatstone sendo a deformação um fator que faz aumentar a tensão como podemos observar na figura .

Em relação aos demais a ponte A pode ser mais simples de ser utilizada e não é sensível como C, assim como a ponte B que também não é sensível como a ponte C.

b) Na segunda parte iremos variar a temperatura e esta variação de temperatura fará com que tenhamos parâmetros de resistência variáveis no sistema, mantendo a deformação constante.

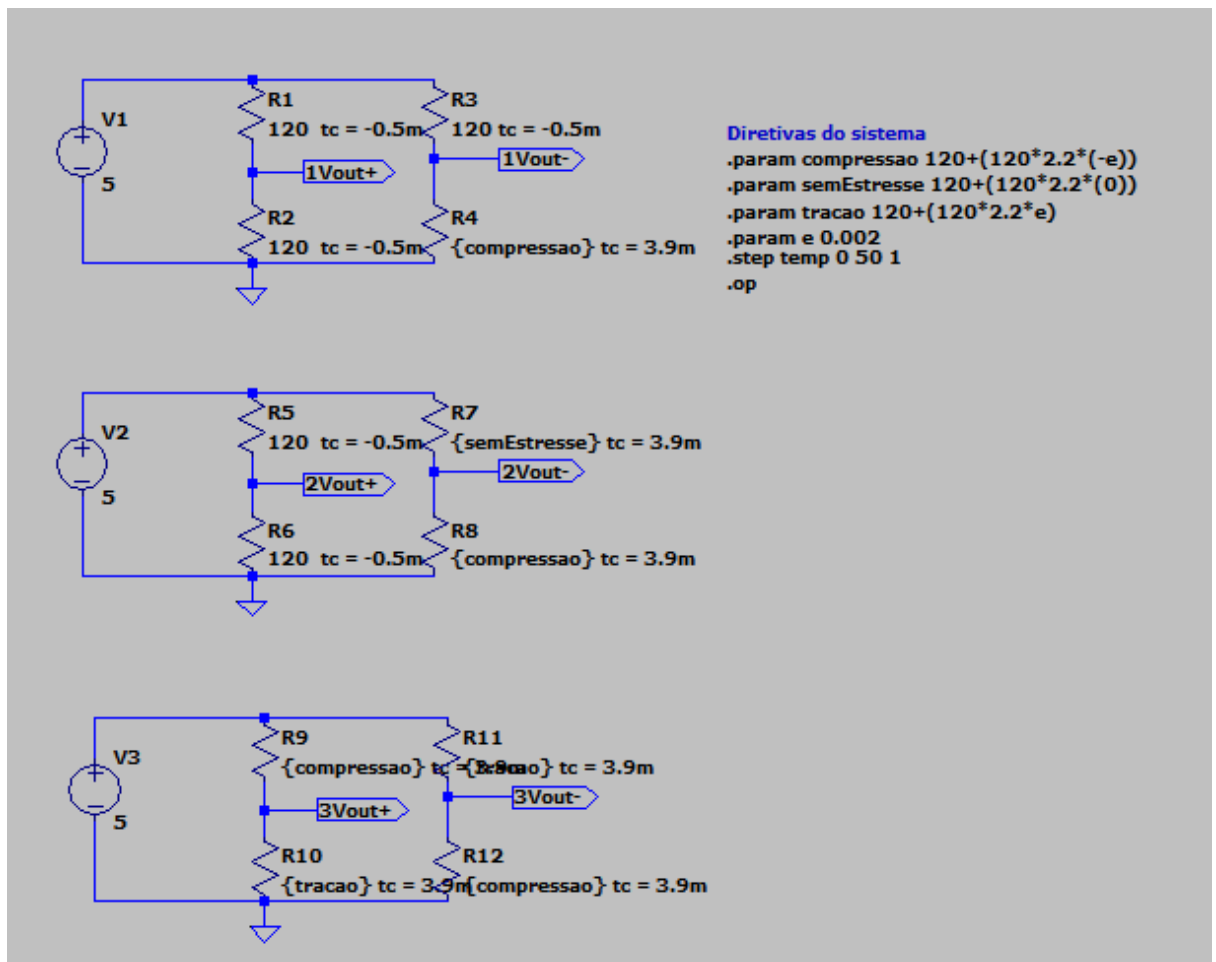


Figura 29: Circuito simulado da B.

Apesar de um pouco escondido alguns tc's, nota-se que foram usados para todas as resistências, trações, compressões e sem estresse em todo circuito, isso quer dizer que neste caso, haverá uma influencia da temperatura.

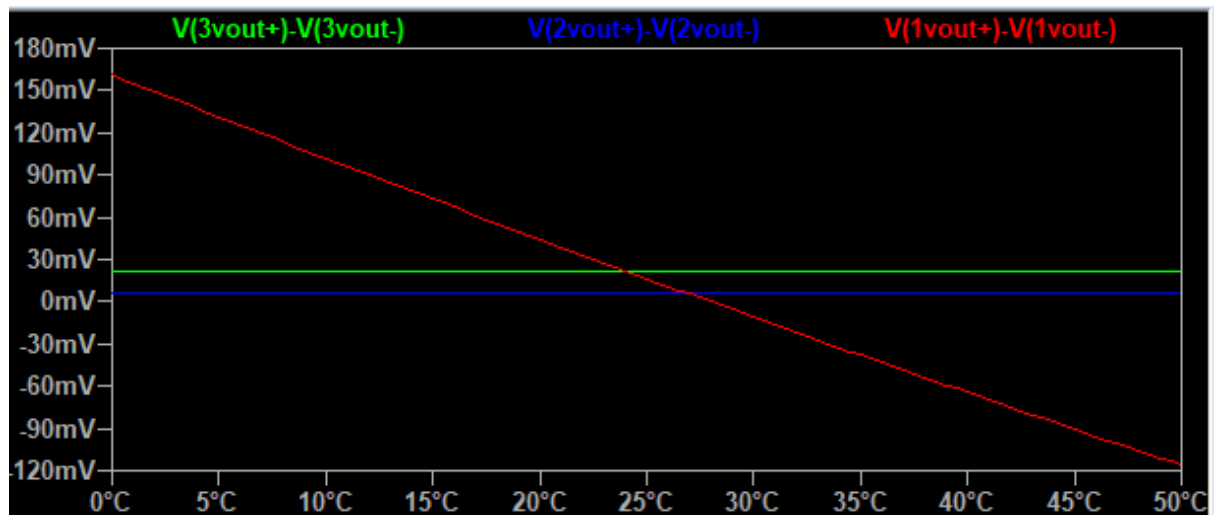


Figura 30: Simulação resultante do circuito.

A partir desta curvas, podemos perceber que agora há diferenças entre a ponte B e A, o que já era previsto, então, nesta simulação podemos concluir que a ponte A não é boa para utilização de projetos na prática pois possui uma sensibilidade muito alta conforme a temperatura aumenta, assim como podemos ver que a melhor curva para um projeto seria a da ponte C, pois nela temos uma não variação e baixa tensão ao longo da temperatura.

Conclusões:

Após feita as simulações, e os testes, foi constatado a veracidade das teorias vistas em aulas na prática, novamente pudemos observar a importância do INA 128 em circuitos de medição, para garantirmos que sempre haja uma leitura mais fiéis de sensores, tanto quanto a importância de projetar a ponte de Wheatstone o que faz com que

tenhamos um controle mais robusto do sistema de medição, este trabalho foi de grande valia para explorar funções e recursos do LTSpice que eu jamais imaginava que ele tinha, assim como formular gráficos mais bem elaborados a partir deste software, o que faz se tornar um software muito mais interessante.

Referências Bibliográficas:

[1] National Institute of Standards and Technology

Type J Thermocouples. Disponível em:

<https://srdata.nist.gov/its90/type_j/jcoefficients_inverse.html>. Acesso em 10 de abril. de 2021.