

# Regulação automatizada de temperatura interior

## Espaço fechado com regulação de temperatura ambiente

José Sá  
Eletrónica Aplicada  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
ISEP  
Porto, Portugal  
1180505@isep.ipp.pt

Rafaela Oliveira  
Eletrónica Aplicada  
Instituto Superior de Engenharia do Porto  
ISEP  
Porto, Portugal  
1181630@isep.ipp.pt

### Resumo

Este relatório tem como objetivo a continuação da abordagem da implementação de sensores para o controlo de temperatura num espaço fechado. Foi utilizado um sensor resistivo NTC (Negative Temperature Coefficient) para a medição das grandezas necessárias, neste caso a temperatura. Neste relatório irá ser obtido o ponto de comutação assim como será feito o condicionamento de sinal.

*Palavras-chave: espaço fechado, temperatura, ponto de comutação, NTC.*

## I. INTRODUÇÃO

Este relatório visa a continuação da abordagem da implementação de um sensor resistivo, para o controlo de temperatura num espaço fechado. O sensor escolhido foi o NTC, e no relatório anterior foram abordados os circuitos utilizados para o estudo do sensor, foram obtidos gráficos de função de transferência, foi feita a análise matemática e também as simulações inerentes ao sensor e as características do mesmo.

No relatório anterior já foram abordados circuito e simulações relevantes ao pré-condicionamento de sinal. Apesar disso, considerou-se importante que uma apresentação dos pontos mais importantes seria relevante, de forma a ser obtida uma melhor compreensão do posterior trabalho a ser apresentado.

Dado que nos foi proposto que posteriormente este circuito seria ligado a um Arduino para a posterior utilização dos dados gerados, de forma a melhorar a sua resolução, é necessária a implementação de um circuito de condicionamento de sinal.

## II. PRÉ-CONDICIONAMENTO DE SINAL

Este é um circuito já obtido anteriormente, apresenta 2 circuitos mais pequenos de grande importância, o da ponte de wheatstone e o do amplificador de instrumentação.

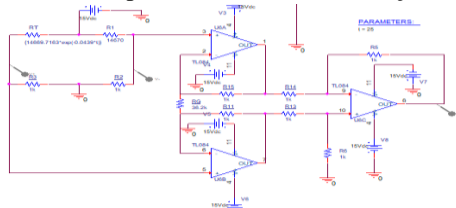


Figura 1. Circuito de pré-condicionamento de sinal

Nesta etapa, começou-se por medir a tensão diferencial da Ponte de Wheatstone[1],[2] e foi obtido um gráfico como é possível ver a verde na Figura 2, que foi amplificado até 5V, representado pela tensão diferencial á saída do amplificador de instrumentação, a vermelho. Conectando a saída da Ponte de Wheatstone á saída do amplificador de instrumentação, estes ficaram em série. Simulando então os dois circuitos, foi obtido o gráfico da Figura 2.

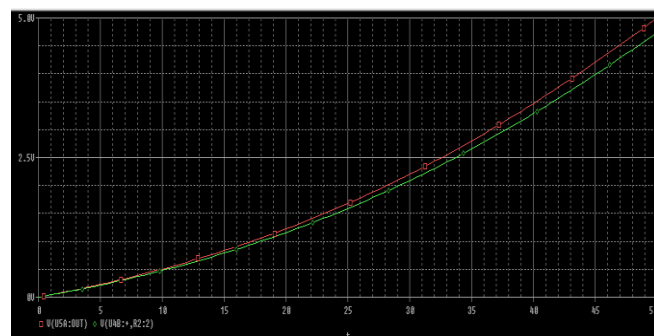


Figura 2. Gráfico Vo2=f(t) a vermelho e Vo1=f(t) a verde

De seguida, depois de forma a conseguir ver o comportamento mais provável do circuito, foram efetuadas as simulações de Monte Carlo, como se pode ver nas Figuras 3 e 4, sendo que estas simulações devem ter um comportamento de uma distribuição normal[3] e os seus resultados deverão estar muito próximos dos 5V, para a tensão máxima, e 0V para o mínima. Ao simular foram obtidos histogramas de probabilidades[3] com o comportamento mais provável da tensão de saída. Este serve como uma medida de erro, que permite obter um circuito mais próximo do real.

Como se pode observar no gráfico, foi obtida uma distribuição normal e valores muito próximos de 5V, como era suposto, para a tensão máxima.

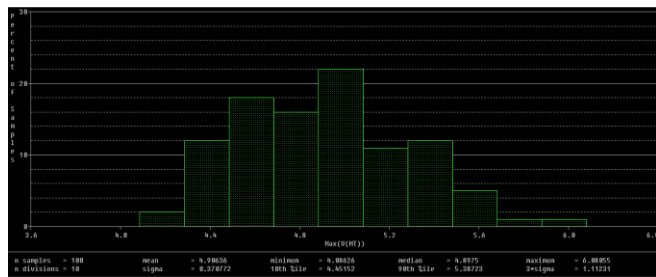


Figura 3. Simulação de Monte Carlo para 5V

Já para a segunda simulação também obtemos dados que vão de encontro ao esperado.

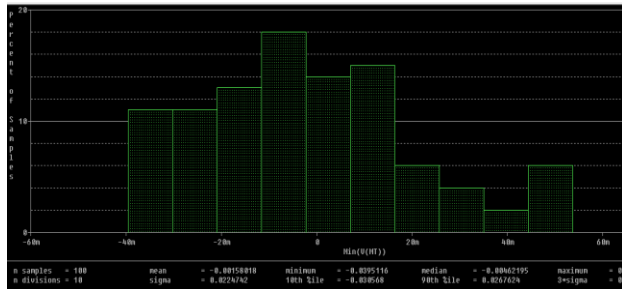


Figura 4. Simulação de Monte Carlo para 0V

Além disso, ainda é necessário calcular-se a equação de tensão de saída do amplificador de instrumentação. Como pode ser visto na Figura 5 foram utilizados os dados do Pspice no Excel de forma a ser obtida a seguinte curva.

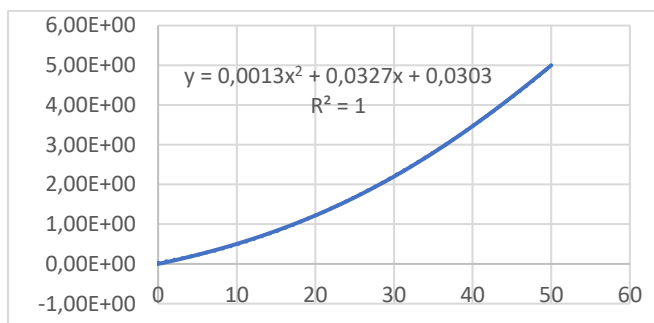


Figura 5. Gráfico da tensão de saída Vo2=y(t)

Posteriormente, este circuito irá ser ligado a um conversor analógico, e o conversor analógico escolhido foi o Arduino [4] já que vai ser usado também para interpretar o sinal.

Assim, tendo agora as equações de saída do amplificador de do sistema, assim como equacionadas as retas que definem o sistema pode-se proceder á linearização do circuito.

### III. CONDICIONAMENTO DE SINAL

#### A. Ponto de comutação

Dado que o objetivo é linearizar a reta anteriormente obtida, foi decidido realizar-se uma linearização analógica[5] da reta, que apesar de poder ter custos superiores e poder ser mais complexa a implementar, permite obter uma resolução infinita na medida a adquirir e apresenta uma elevada velocidade de resposta.

O ponto de comutação é o ponto no qual irá ocorrer a comutação das retas, pelo que a partir do ponto de comutação o sistema irá funcionar de através de uma equação diferente.

Idealmente, quantas mais retas e pontos de comutação existissem, melhor se comportaria o sistema, mas visto que, foi imposta a limitação de haverem apenas 2 retas, já não era possível encontrar uma melhor equação para 18° a 22° pelo que iram ser encontradas discrepâncias do valor esperado para o obtido.

Dado isto, o ponto de comutação foi escolhido de forma a linearizar a reta de saída do amplificador de instrumentação e também de forma a que as retas tivessem uma maior proximidade de 20°, por volta de 18° a 22°, valores ideais para temperatura interior.

Para esta temperatura, se for substituída na fórmula calculada anteriormente será obtida a tensão, 1.3789V, pelo que, será nesta tensão que irá ocorrer a mudança de tensão.

Foram usados vários métodos para encontrar o melhor ponto de comutação para as condições descritas, mas verificou-se que após várias tentativas, que para um ponto de comutação nos 22°, a primeira equação (equação para o ccs1), fica bastante próxima na região de 17° a 22° como se pode verificar na seguinte imagem.

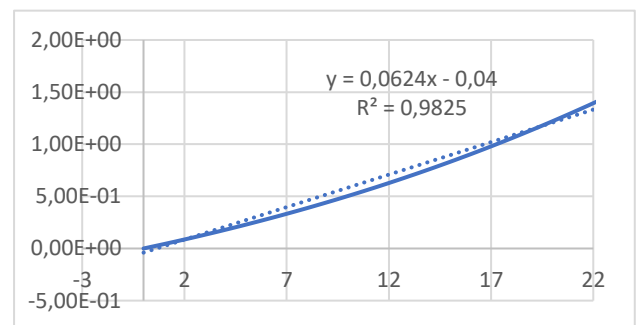


Figura 6. Gráfico da tensão de saída  $V_{ccs1}=y(t)$

A escolha desta equação teve como consequência uma ligeira discrepância nas temperaturas por volta de 12° e mínimas nos restantes pontos que eventualmente poderão provocar algumas discrepâncias entre valores.

Por outro lado, a escolha deste ponto de comutação provocou uma segunda equação muito boa de 22° a 50°, assim como uma possibilidade de serem efetuadas medições mais acertadas na região de 22° a 24°. Usandas ambas as retas agora determinadas obtém-se o alcance desejado de 0° a 50°.

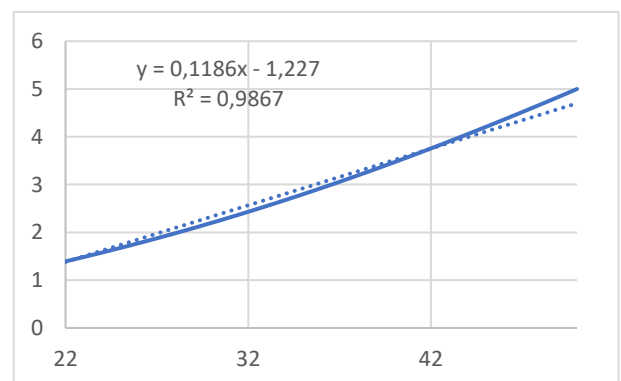


Figura 7. Gráfico da tensão de saída  $V_{ccs2}=y(t)$

Ambos os gráficos foram obtidos através dos dados retirados do Pspice, mais propriamente da reta de saída do amplificador de instrumentação e posteriormente organizados

em 2 gráficos, usando o Excel, respeitando o ponto de comutação.

Uma vez que ambas as retas tem um bom índice pode-se afirmar que são uma boa aproximação.

Além disso, ainda se decidiu calcular os erros absolutos e relativos das retas[5] agora calculadas e dada a quantidade de dados foi decidido calcular apenas a média dos erros assim, para todo o circuito, temos uma média de erro absoluto de cerca de 0.08V e um médio erro relativo de cerca de 6%. Esta última, foi obtida ignorando os valores até 1V, visto que dado os seus valores bastante pequenos e a discrepância criada entre eles, o valor de erro nestes seria extremamente alto, pelo que se decidiu retirar-lhos, pelo que iriam indicar um erro muito diferente do que o circuito realmente possui.

## B. Condicionamento de sinal 1

Tendo sido obtidas as 2 equações para melhor descrever a reta inicial linearmente, tem-se agora de condicionar o sistema de forma a que a primeira reta, de 0° a 22°, fique á semelhança da reta inicial, de 0 a 5V.

Visto que os valores começam em 0, pois estamos a desprezar os 0.04 visto que mesmo com um ganho de 5V/V não faria grande diferença, como tal não é necessário colocar esta em 0 para o seu valor mínimo de temperatura 0°.

Para isso, utiliza-se um Ampop de forma a aplicar um ganho á reta inicial. Uma vez que se está a aumentar o ganho irá-se observar também, como consequência uma maior resolução.

Utilizando a equação obtida na figura 6,  $V_{ccs1} = 0,0624t$  e substituindo para a temperatura máxima atingível pela reta,  $t=22^\circ$ , obtém-se:  $V_{ccs1}=1.373\text{ V}$

De forma a ser atingido os 5V pretendidos, foi escolhido um amplificador não inversor visto que apenas usa 1 ampop e não inverte o sinal.

Como referido anteriormente, a reta tem de variar agora de 0 a 5V pelo que tem de ser aplicado um ganho á mesma.

Atualmente tem-se:

$y = 0,0624t$  e o objetivo é obter:  $y=0.227273t$

Isto pois o declive, M da reta é:

$$M = \left( \frac{5-0}{22-0} \right) = 0.227273$$

Assim, o ganho é dado por:

$$\left( \frac{0.227273}{0.0624} \right) = 3.6422\text{ V/V}$$

Assim, multiplicando pelo ganho obtém-se  $y = 0.227273t$  e se forem substituídos pelos valores limite, 0° e 22° e será obtido um alcance de 5V. Deste modo as resistências podem ser calculadas da seguinte forma:

$$3.6422 = \left( 1 + \frac{R_{gain2}}{R_{gain1}} \right) \Leftrightarrow R_{gain2} = 2.6422 R_{gain1}$$

Considerando  $R_{gain1}=1k$  temos  $R_{gain2}=2.6422k\ \Omega$ .

Dado o valor da resistência é preferível arredonda-la para 2.65k, mas verificou-se que com 2.64k o valor difere menos, pelo que assim se atinge um valor ainda próximo de 5V (5.015V), como tal  $R_{gain2}=2.64k\ \Omega$ .

Desta forma ficamos com um circuito que varia de 0 a 5V para as temperaturas de 0 a 22° representado na figura abaixo.

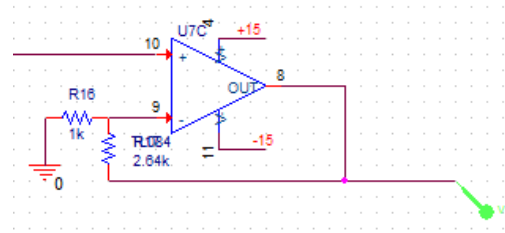


Figura 8. Circuito do condicionamento de sinal 1

Foi possível verificar o circuito anteriormente obtido através da sua simulação no Pspice, pelo que a sua tensão de saída foi obtida no seguinte gráfico:

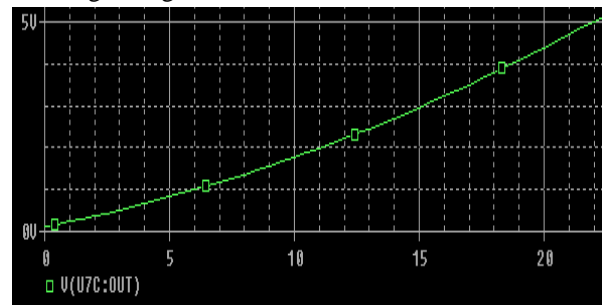


Figura 9. Gráfico da tensão de saída  $V_{ccs1}$  após amplificação

Apesar de pela análise da imagem se verificar que para o instante inicial,  $t=0$ , o valor da tensão ser de 0.1V, era suposto obter-se 0V, isto é devido á discrepância descrita anteriormente no ponto de comutação. Dado que o sensor não é linear, não obtemos uma reta, mas sim uma aproximação de uma reta muito semelhante á esperada.

Para além de ser utilizado o Pspice como ferramenta com o objetivo de validar os dados, também foram usados outros para verificar a sua validade.

Primeiramente foi testada a sua sensibilidade[5], que pode ser calculada derivando a sua equação, pelo que se obtém um  $S=0.227273$ . Dado que esta reta apenas tem uma variação no eixo dos x de 22 e a do próximo condicionamento 28, é de esperar que esta apresente uma sensibilidade superior.

## C. Condicionamento de sinal 2

Passando agora para a segunda equação, descrita anteriormente, pode-se agora condicionar o sistema de forma a que a segunda reta também linear, de 22° a 50° varie também de 0 a 5V.

Tendo em conta os valores da reta da figura 7 esta reta pode-se verificar que a reta não tem origem no 0, pelo que, o circuito deste sinal terá de ser diferente do utilizado no CCS1.

O valor da tensão para a temperatura mínima deverá ter o valor 0, invés do valor que corresponde inicialmente que irá ser calculado agora.

Para tal, é usada agora a equação  $y=0,1186x - 1,227$  para uma temperatura de 22° visto que é a temperatura mínima, determinada pelo ponto de comutação.

Assim, substituindo-se obtém-se:  $V_{ccs2}=1,3822\text{ V}$

É de notar que existe um intervalo de cerca de 50mv entre as duas retas, intervalo que poderá beneficiar posteriormente a implementação do comparador.

De forma a colocar este valor em 0 decidiu-se inicialmente usar um somador, onde se iria somar uma tensão á reta inicial  $y=0,1186x -1,227$  e, desta forma, conseguir os 5V assim como mover a reta final para ficar dos 0 aos 5V. Se não fosse usado o somador, restaria a reta inicial que iria variar de 1.3822V a 5V.

De forma a minimizar o número de ampops no circuito decidiu-se optar por utilizar apenas 1 ao invés de 2 ampops, um para realizar o ganho e outro para construir o somador e assim mover a reta para os 0V. Assim, utilizando apenas 1 ampop é possível construir um amplificador diferencial.

Desta forma através da seguinte formula é possível alcançar ambos os objetivos com apenas 1 ampop:

Sendo que de momento se tem  $y=0,1186x -1,227$  pelo que pretende-se obter  $y=0.178571t -3,925$ .

Isto pois o declive, M da reta é:

$$M = \left( \frac{5-0}{50-22} \right) = 0.178571$$

E o seu b, usando o ponto (50,5):

$$5 = 0.1785 * 50 + b \Leftrightarrow b = -3,925$$

Assim, o ganho é dado por:

$$\left( \frac{0.178571}{0.1186} \right) = 1.50566 \text{ V/V}$$

Calculando agora os valores das resistências do amplificador diferencial:

$$V_{ccs2} = \left( \frac{(R_1 + R_2)R_4}{(R_3 + R_4)R_1} V_{o2} - \frac{R_2}{R_1} \right)$$

Se se considerarem as resistências  $R_2$  e  $R_4$  iguais, assim como também as  $R_1$  e  $R_3$  também iguais uma a outra, obtém-se a seguinte formula:

$$V_{ccs2} = \left( \frac{R_2}{R_1} \right) * (V_{o2} - V_{Ref})$$

Sendo que  $\left( \frac{R_2}{R_1} \right)$  é o ganho da fórmula, este deverá ser igual a 1.50566, desta forma:

$$0.178571t - 3.925 = 1.50 * (0.1186t - 1.227 - V_{Ref})$$

Considerou-se o ganho igual a 1.5 visto que é mais fácil de obter.

Assim,  $V_{Ref} = 1.39$  e se  $R_1 = 1k$  obtém-se  $R_2 = 1.5k$

Dado que se pretende utilizar apenas 1 fonte de tensão, decidiu-se adicionar um divisor de tensão.

Tendo em conta isto, poder-se-ia vir a sofrer de efeito de carga pelo que foi decidido adicionar mais um ampop como buffer de tensão. Este buffer elimina o efeito de carga que iria ser criado quando utilizado o divisor de tensão visto que tem uma resistência de entrada muito alta e uma de saída muito baixa. Além disso, este, apresenta um ganho unitário pelo, que apenas se tem o divisor como preocupação.

Para tal, tem-se de dimensionar resistências:

$$\frac{R_6}{R_5 + R_6} * 15 = 1.39 \text{ e obtém-se } R_5 = 9.79865 R_6$$

Assim,  $R_5 = 9.79865k$  e  $R_6 = 1k$ .

Dado que não existem valores comercializados para esta resistência, decidiu-se arredondar  $R_5 = 10k$  pelo que se obtém o seguinte circuito:

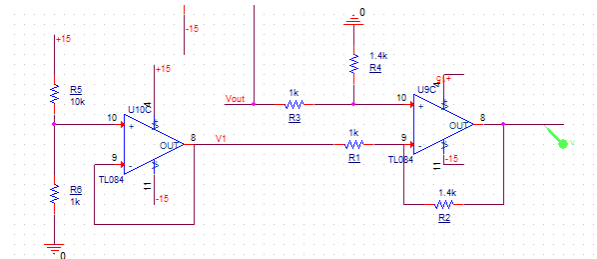


Figura 10. Circuito do condicionamento de sinal 2

Assim como no Ccs1, foi possível verificar o circuito anteriormente obtido através da sua simulação no Pspice, onde se verificou que para  $t=50$  a tensão passava dos 5v, devido a pequenas variações, quer na fórmula da reta, quer no dimensionamento. De forma a se ajustar alterou-se o valor de R1 e R2 para 1.4k como já poderia ser verificado no gráfico anterior, pelo que a sua tensão de saída foi obtida no seguinte gráfico:

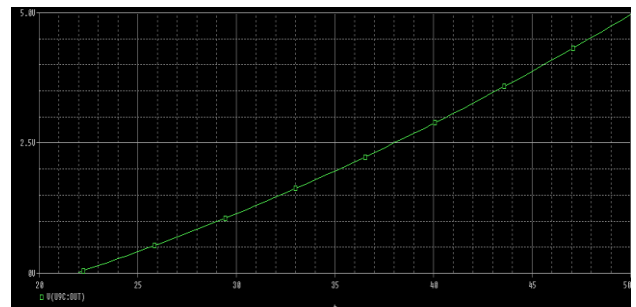


Figura 11. Gráfico da tensão de saída  $V_{ccs2}$  após amplificação

Assim como no condicionamento anterior, primeiramente foi testada a sua sensibilidade[5], que pode ser calculada derivando a sua equação, pelo que se obtém um  $S=0.178571$ , pelo que se verifica que no condicionamento de sinal 1 temos um S superior como seria de esperar.

## D. Circuito idealizado

Assim, dado que os resultados já são os esperados, obtém-se então o circuito final através da junção de todos os circuitos apresentados anteriormente:

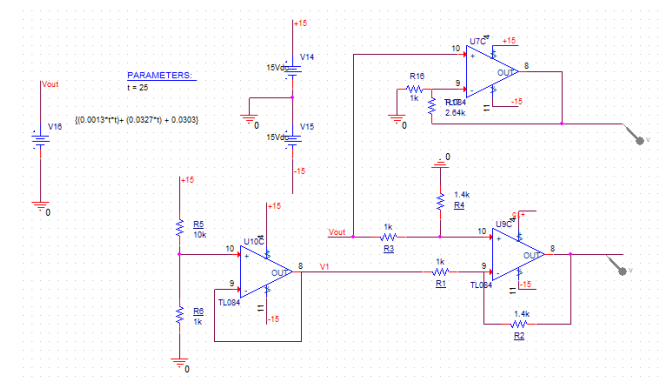


Figura 12. Circuito idealizado



Além disso, como pode ser verificado na figura anterior devido a problemas computacionais foi realizada a simplificação do circuito de pré-condicionamento de sinal, sendo que este foi substituído pela fonte com a equação definida na figura 5.

Para se ter uma melhor ideia do resultado final as duas retas foram sobrepostas:

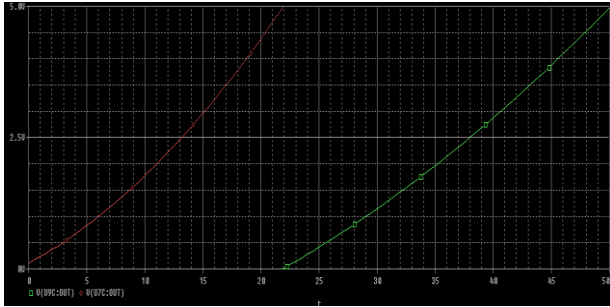


Figura 13. Gráfico da tensão de saída  $V_{ccs2}$  a verde e  $V_{ccs1}$  a vermelho após ampliações.

De forma a analisar o comportamento mais provável do circuito, efetuam-se simulações de Monte Carlo[3], para cada condicionamento de sinal, sendo que as mesmas também devem ter um comportamento de uma distribuição normal. Ao simular foram obtidos histogramas de probabilidades com o comportamento mais provável da tensão de saída para a saída dos condicionamentos quando deviam ser esperados 5v, ou seja, para ccs1 temos 1.3789V de entrada e para css2 5v, e também quando deviam ser esperados 0V, ou seja, para ccs1 temos 0V e para css2 temos 1.3789V

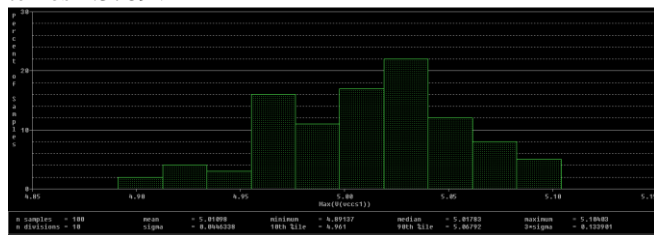


Figura 14. Simulação de Monte Carlo condicionamento de sinal 1 para 5V

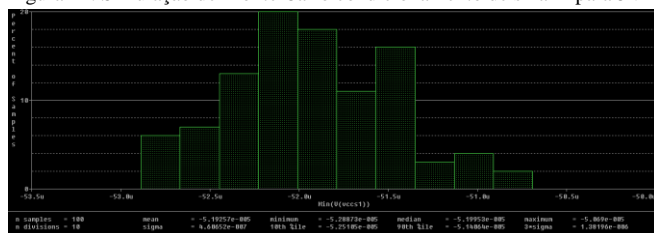


Figura 15. Simulação de Monte Carlo condicionamento de sinal 1 para 0V

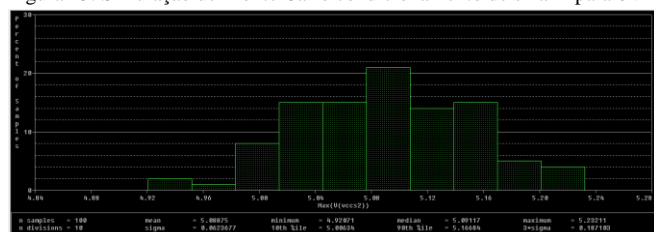


Figura 16. Simulação de Monte Carlo condicionamento de sinal 2 para 5V

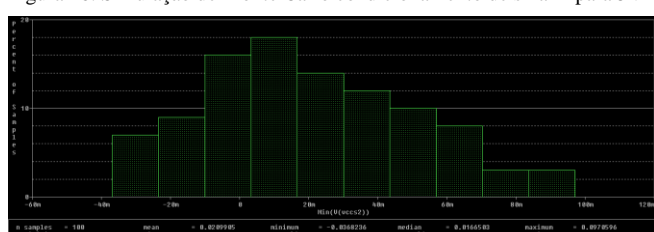


Figura 17. Simulação de Monte Carlo condicionamento de sinal 2 para 0V

Ao ver os gráficos é possível observar quatro distribuições normais e tensões muito próximas das esperadas. Desta forma, é possível verificar que o circuito foi bem dimensionado.

#### IV. CONCLUSÕES

Com este trabalho, é possível concluir que este circuito de condicionamento de sinal é de grande importância, assim como o seu precedente, isto pois, neste caso, este é indispensável na linearização das retas de tensão de saída, além disso irá facilitar a interpretação dos dados por parte do ADC anteriormente escolhido. Sendo assim uma boa escolha do ponto de comutação permite que sejam obtidas retas com melhor índice, pelo que, com estas se obtém um melhor resultado. Derivando a mesma obtém-se a sua sensibilidade e quanto melhor esta for, melhor será a leitura do valor da temperatura.

*Unidades:*

- V – Volt (Tensão)
- A – Ampère (Corrente Elétrica)
- $\Omega$  - Ohm (Resistência Elétrica)
- $^{\circ}\text{C}$  – Graus Celsius (Temperatura)

*Abreviaturas e Acrónimos:*

$V_{o1}$  – Tensão diferencial de saída da ponte de wheatstone;  
 $V_{o2}$  – Tensão de saída do amplificador instrumental;  
 $V_{ccs1}$  – Tensão de saída do condicionamento de sinal 1;  
 $V_{ccs2}$  – Tensão de saída do condicionamento de sinal 2;  
 $R_1, R_2, R_3, R_T, R_{gain}, R_{gain1}, R_{gain2}$  – Resistências;  
 $t$  – Temperatura;  
 $M$  – Declive;  
 $\text{AmpOps}$  – Amplificadores operacionais;  
 $\text{NTC}$  – Negative Temperature Coefficient;

#### REFERÊNCIAS

- [1] «Wheatstone\_bridge». Acedido: Mar. 24, 2020. [Em linha]. Disponível em: [https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone\\_bridge](https://en.wikipedia.org/wiki/Wheatstone_bridge).
- [2] «PT\_ponte\_AI». Acedido: Abr. 30, 2020. [Em linha]. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/324859/mod\\_folder/content/0/02\\_PT\\_ponte\\_AI.pdf?forcedownload=1](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/324859/mod_folder/content/0/02_PT_ponte_AI.pdf?forcedownload=1).
- [3] «monte-carlo-sampling-for-probability». Acedido: Mar. 24, 2020. [Em linha]. Disponível em: <https://machinelearningmastery.com/monte-carlo-sampling-for-probability/>.
- [4] «arduino». Acedido: Abr. 30, 2020. [Em linha]. Disponível em: <https://www.arduino.cc/>.
- [5] «03\_PT\_Conceitos\_Terminologias.pdf». Acedido: Abr. 29, 2020. [Em linha]. Disponível em: [https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/323729/mod\\_folder/content/0/03\\_PT\\_Conceitos\\_Terminologias.pdf?forcedownload=1](https://moodle.isep.ipp.pt/pluginfile.php/323729/mod_folder/content/0/03_PT_Conceitos_Terminologias.pdf?forcedownload=1).