

Relatório da Atividade de Condicionamento de Sinais

Ferdando Farias Dimas¹, Frank B. Ferreira Boa Morte¹, Mercedes M. B. Diniz¹

¹Instituto de Tecnologia - ITEC - Universidade Federal do Pará (UFPA)
Caixa Postal 479 - 66075-110 - Belém - PA - Brazil

`fernando.dimas@itec.ufpa.br, frank.morte@itec.ufpa.br`

`mercedes.diniz@itec.ufpa.br`

Abstract. *This report has evaluative purposes for the curricular component Hardware and interfacing design and corresponds to the activity on signal conditioning, with the objective of presenting the modeling of the selected sensor and the design of the conditioning circuit.*

Resumo. *Este relatório tem fins avaliativos para a componente curricular Projeto de hardware e interfaceamento e corresponde a atividade sobre condicionamento de sinais, tendo como objetivo a apresentação da modelagem do sensor selecionado e o projeto do circuito de condicionamento.*

1. Teoria de funcionamento do Sensor de temperatura LM35

O sensor LM35 utiliza o princípio básico do diodo, conforme a temperatura aumenta, a voltagem através do diodo aumenta a uma taxa conhecida. Ao se amplificar com precisão a mudança de tensão, é possível gerar um sinal analógico diretamente proporcional à temperatura. [Pedroni 2010]

Os diodos são frequentemente usados como sensores de temperatura em uma ampla variedade de aplicações de medições de temperatura moderada. Ter coeficientes de temperatura linear, através da operação de temperatura fazem o diodo uma ótima solução para aplicações de baixo custo e com flexibilidade. [Texas Instruments 2018]

O circuito apresentado na Fig.1 mostra o diagrama de blocos interno do CI LM35. O mesmo está configurado internamente em torno de um par de amplificadores operacionais (A1 e A2), sendo primeiro configurado como um sensor de temperatura preciso através de um loop de feedback formado por um par de TBJs configurados como um espelho de corrente. Esse espelho garante uma detecção de temperatura perfeitamente linear e estabilizada e evita disparos falsos ou leituras de temperatura imprecisas na saída.

A temperatura detectada é produzida no lado emissor do espelho de corrente a uma taxa de 8,8 mV por grau Celsius. A saída é aplicada a um estágio de buffer usando outro amplificador operacional que é configurado como um seguidor de tensão de alta impedância. Este estágio ele atua como um buffer para reforçar a conversão de temperatura em tensão, e a apresenta no pino de saída final do CI através de outro estágio TBJ de alta impedância configurado como seguidor de emissor.

A saída final torna-se assim altamente isolada do estágio do sensor de temperatura real e fornece uma resposta de detecção de temperatura altamente precisa.



A série LM35 é composta por sensores de temperatura com circuito integrado de precisão, tendo uma tensão de saída linearmente proporcional à temperatura centígrada (fator de escala de $10mV/^{\circ}C$). Esses dispositivos tem a vantagem de não precisar converter a escala para obter uma escala centígrada conveniente, além de não precisa de nenhuma calibração ou ajuste externo para fornecer precisões típicas de $\pm \frac{1}{4}^{\circ}C$ em temperatura ambiente e $\pm \frac{3}{4}^{\circ}C$ em uma faixa de temperatura de $-55^{\circ}C$ a $150^{\circ}C$. [Texas Instruments 1999]

A baixa impedância de saída, a saída linear e a calibração inerente precisa do dispositivo LM35 tornam a interface para leitura ou circuito de controle especialmente fácil. O dispositivo é usado com fontes de alimentação simples ou com fontes de mais e menos. Como o dispositivo LM35 consome apenas $60\mu A$ do suprimento, ele apresenta um autoaquecimento muito baixo, inferior a $0.1^{\circ}C$ no *still air*, mas que para aplicações cujo a acurácia é importante, essa variação deve ser levada em conta. [Texas Instruments 1999]



Na imagem mais a direita Fig.2 é possível ver o tipo de ligação mais comum para o LM35. Para essa configuração, a escala de medição deste sensor vai de 2°C até 150°C, e sendo assim a tensão de saída do sensor varia, de forma correspondente, de 20mV à 1, 5V, dado o condicionamento interno do LM35.

2. Modelagem do sensor

Para o estudo aqui apresentado, será desconsiderado o condicionamento interno do sensor LM35 descrito do tópico 1, sendo o sensor modelado da seguinte forma (Fig.3):

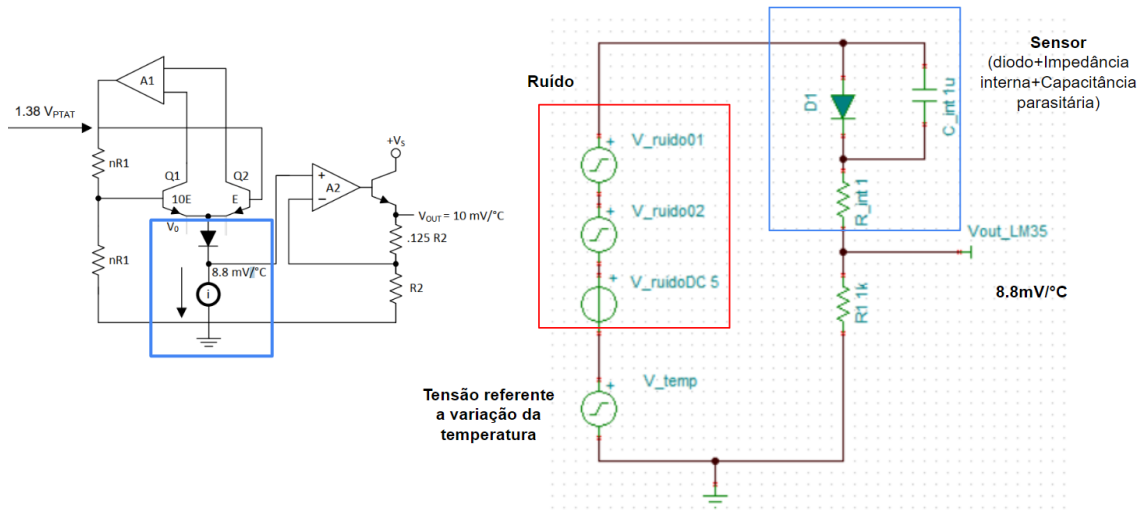


Figura 3. Modelagem do sensor de temperatura

Neste ponto teremos uma tensão de saída linearmente proporcional ao fator de escala de $8.8mV/^{\circ}C$ antes do condicionamento. Dessa forma, na faixa de medição de $2^{\circ}C$ até $150^{\circ}C$, essa tensão estará no intervalo de $17,6mV$ à $1,32V$.

A fonte de tensão V_{temp} representa a variação da temperatura, a mesma está sendo ilustrada como um sinal senoidal de $10Hz$ (baixa variação é uma característica da temperatura) com amplitude de $668mV$. A amplitude foi obtido através da media entre as tensões máxima e mínima da saída do sensor (Eq.1),

$$A = \frac{17,6m + 1,32}{2} \cong 668mV \quad (1)$$

O sensor em si é uma aplicação de diodos como destacado no bloco azul da Fig.3, logo ele será representado pelo mesmo associado com um resistor e capacitor que representaram, respectivamente, a impedância e capacitância internas, cujo os valores serão 0.5Ω (impedância de saída típica conforme o datasheet) e $1\mu F$ (capacitância parasitaria do diodo que modifica suas características em altas frequências).

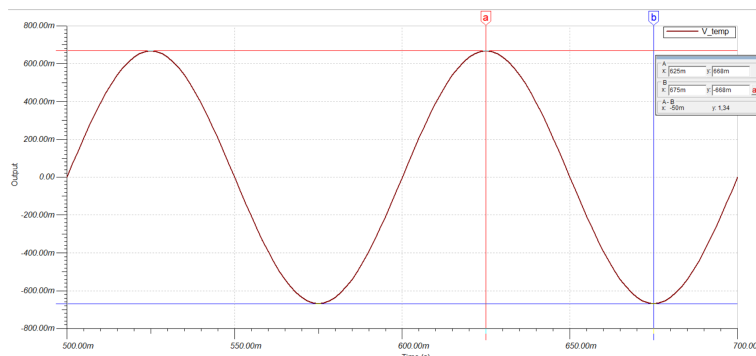


Figura 4. Sinal V_{temp} sem ruído e não condicionado.

2.1. Modelagem do ruído

Como em todo sistema real, estamos sujeitos a sinais indesejáveis que distorcem os sinais de dados. Para ilustra-los no nosso modelo utilizamos fontes de tensão em série com o nosso sinal de interesse (V_{temp}). Aqui foi considerado: o ruído da fonte de alimentação que gera um pequeno acréscimo de temperatura ao sensor ($V_{ruídoDC}$), o ruído branco que apesar de ser definido como um sinal aleatório (sem "forma" definida), aqui estamos representando como uma senoide de amplitude de $5\mu A$ e frequência de $500Hz$ ($V_{ruído01}$) e o ruído da rede elétrica modelado como um sinal senoidal de amplitude de $1\mu V$ e frequência de $60Hz$ ($V_{ruído02}$).

3. Especificações básicas do circuito de condicionamento

Para as etapas seguintes foi utilizado o amplificador operacional LM318, alimentado com $12V$ e $-12V$ seguindo as especificação do datasheet. [Texas Instruments 1998]

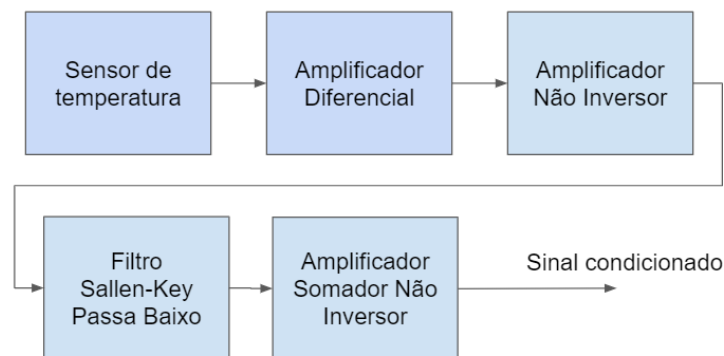


Figura 5. Diagrama de Blocos

Na implementação do circuito de condicionamento foram aplicados os seguintes procedimentos com AmpOps:

3.1. Ajuste de nível DC antes da etapa de Amplificação

Dado que o ruído de alimentação ($V_{ruídoDC}$) é um sinal DC, o mesmo deve ser eliminado antes da etapa de amplificação do sinal. Se o ruído passar para a próxima etapa, o mesmo irá se escalado causando assim a saturação do sinal na saída do amplificador.

A solução aplicada para lidar com esse problema foi ajustar esse sinal DC subtraindo de um valor correspondente. Utilizamos aqui um amplificador de diferenças de ganho unitário, para tal todos os resistores usado na configuração da Fig.6 são iguais ($1k\Omega$) e o V_2 é igual a 4, 5V.

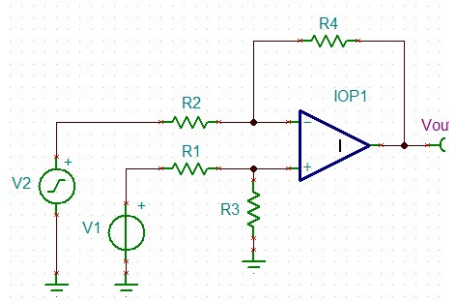


Figura 6. Configuração do Amplificador Diferencial

$$V_{out} = \left(\frac{R_3}{R_1 + R_3} \cdot \frac{R_2 + R_4}{R_2} \right) \cdot V_1 - \frac{R_4}{R_1} \cdot V_2 \quad (2)$$

3.2. Amplificação do Sinal

Para amplificar o sinal de saída do sensor ($V_{out_{LM}}$) usaremos a configuração do Amplificador não-inverso implementada com AmpOps (Fig.7), cujo a relação de ganho é dada pela equação 3.

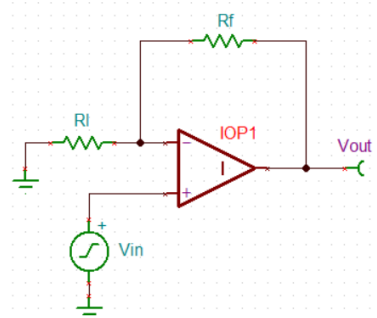


Figura 7. Configuração do Amplificador Não-Inversor

$$G = 1 + \frac{R_f}{R_i} \quad (3)$$

Sendo assim, para obter um ganho de 2 definimos R_f e R_i como $1k\Omega$.

3.3. Filtragem do ruído

Para eliminar os sinais indesejáveis que distorcem o sinal V_{temp} (de 10Hz) iremos passa o sinal $V_{out_{LM}}$ primeiramente por um filtro (de topologia Sallen-Key) passa-baixas, uma vez que os ruídos ($V_{ruídoDC}$, $V_{ruído01}$ e $V_{ruído02}$) estão nas frequências de 0Hz, 500Hz e 60Hz,

respectivamente. Para auxiliar nessa etapa foi utilizado a ferramenta da Texas Instruments chamada de *Filter design*, segue abaixo o filtro de referência.

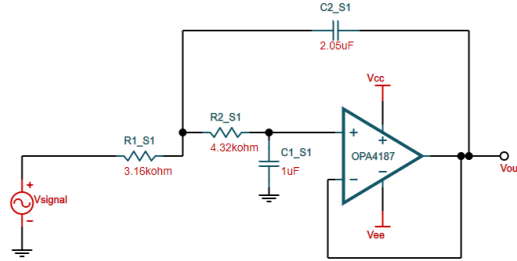


Figura 8. Filtro gerado pela ferramenta

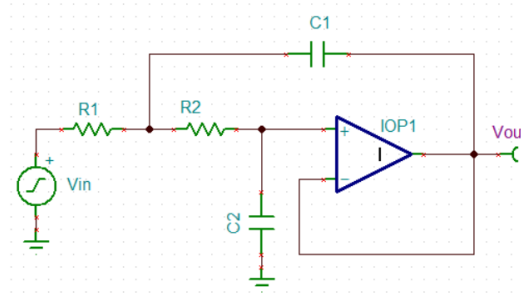


Figura 9. Configuração do Filtro Sallen-Key (Passa-baixas)

$$\begin{aligned} \text{Função de Transferência: } H(s) &= \frac{\omega_o^2}{s^2 + 2\alpha s + \omega_o^2} \\ \omega_o &= 2\pi f_o = \frac{1}{\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}} \\ 2\alpha &= \frac{1}{C_1} \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} \right) = 1.414 \end{aligned} \quad (4)$$

Dado as relações definidas na equação 4 e os valores da frequência de corte de f_o de $30Hz$ e ganho unitário, temos:

$$f_o = 30Hz \Rightarrow \omega_o = 2\pi f_o = 2\pi 30 \cong 188,5 rad/s$$

Função de transferência normalizada de 2º ordem: $s^2 + 1,414s + 1$

Pré-cálculo p/ 1Hz e ganho 1 (Butterworth): $H_n(s) = \frac{1}{s^2 + 2\alpha s + 1}$

$$H(s) = \frac{\omega_o^2}{\left(\frac{s}{\omega_o}\right)^2 + 1,414 \cdot \left(\frac{s}{\omega_o}\right) + 1} = \frac{188,5^2}{\left(\frac{s}{188,5}\right)^2 + 1,414 \cdot \left(\frac{s}{188,5}\right) + 1}$$

$$\Rightarrow H(s) = \frac{1262481309}{s^2 + 266,539 \cdot s + 35532,25}, \text{ e assim temos: } 2\alpha = 266,539$$

Considerando valores dos resistores R_1 e R_2 iguais a $3,16k\Omega$ e $4,32k\Omega$, respectivamente, e 2α igual a 266,539, temos os valores correspondentes dos capacitores igual

a:

$$C_1 = \frac{1}{266,539} \cdot \left(\frac{1}{3,16k} + \frac{1}{4,32k} \right) \cong 2,05\mu F$$

$$C_2 = \frac{1}{3,16k \cdot 4,32k \cdot 2,05\mu \cdot 30^2} \cong 1,32\mu F$$

3.4. Ajuste de nível DC

Para deslocar o sinal, de forma que o mesmo fique na faixa de operação de $-1V$ à $5V$ de um converso AD hipotético e na faixa característica do senso, foi implementado a configuração do amplificador somador não inversor de ganho unitário ($R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 1k\Omega$) e com $V_{ajuste} = 1,29V$.

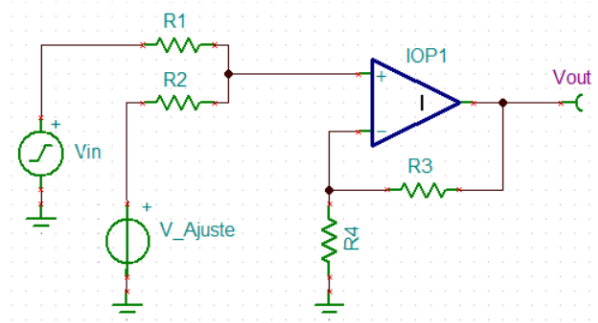


Figura 10. Configuração do Amplificador Somador para ajuste de nível DC

4. Projeto do circuito de condicionamento

Na imagem a abaixo temos o circuito completo a onde está implementado todas as etapas do condicionamentos, e logo a seguir, encontra-se também o gráfico com o sinal antes e depois de passa pelo mesmo.

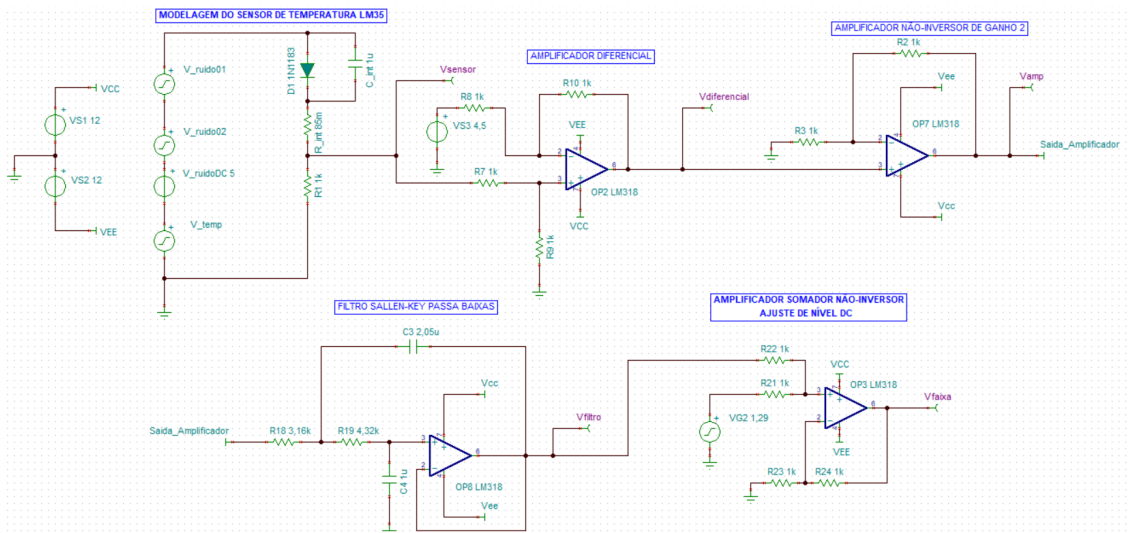


Figura 11. Circuito Completo

4.1. Simulações

Para simular os estágios do circuito de condicionamento, apresentaremos à seguir cada uma das fases separadamente.

4.1.1. Sensor de Temperatura

Em função da Fonte de alimentação DC o sinal é deslocado verticalmente alcançando a tensão máxima e mínima de 3,85V e 5,18V, respectivamente.

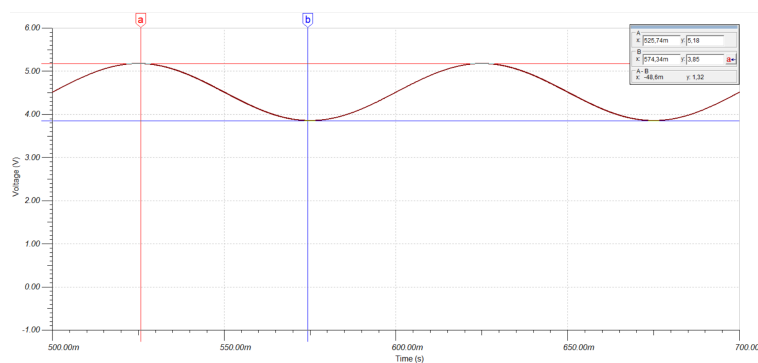


Figura 12. Sinal de saída do sensor

4.1.2. Amplificador Diferencial

No amplificador diferencial a tensão DC é eliminada centralizando o sinal em 0V, com a saída variando de 667,18mV à -656,35mV.

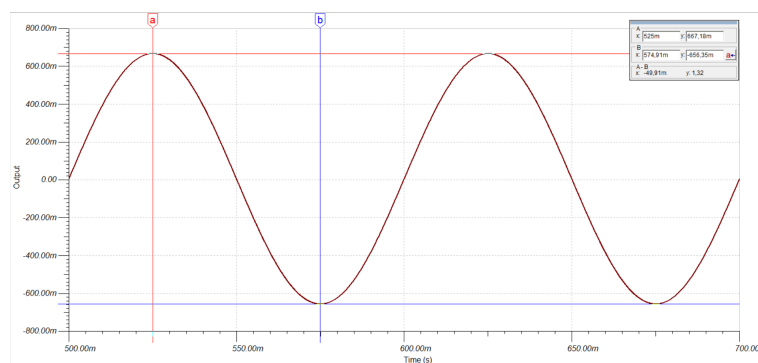


Figura 13. Sinal de saída Amplificador diferencial

4.1.3. Amplificador Não-Inversor

No Amplificador Não-Inversor o sinal é amplificado em 2 vezes.

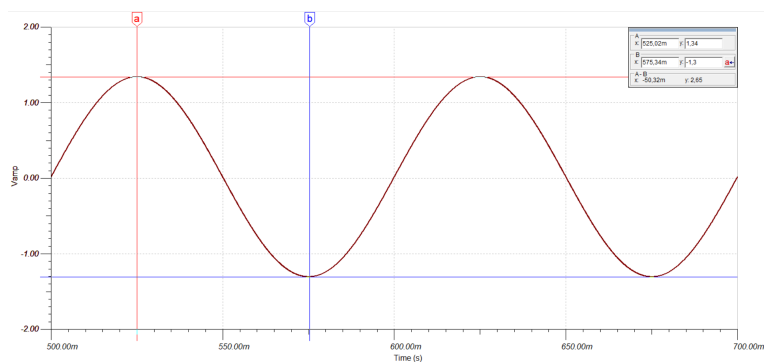


Figura 14. Sinal de saída Amplificador Não-Inversor

4.1.4. Filtro Sallen-Key Passa-Baixas

Para a simulação do Filtro foi necessário separá-lo do circuito completo, visto que a simulação em função da frequência suporta apenas uma fonte de alimentação.

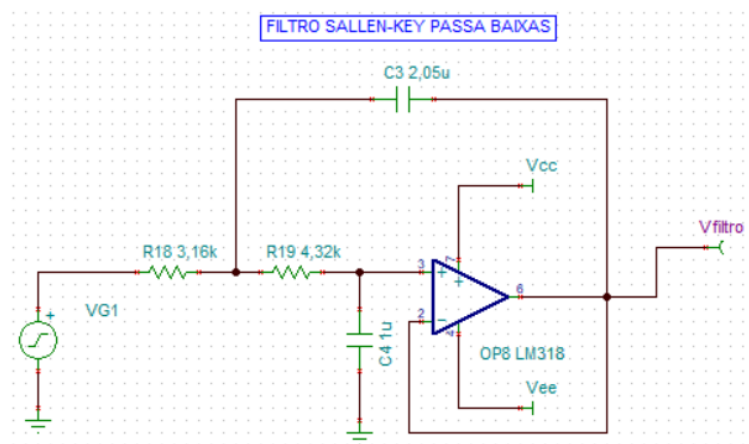


Figura 15. Simulação do circuito do filtro

Observando o gráfico, notasse que a partir da frequência de corte (30Hz) ocorre a atenuação do sinal.

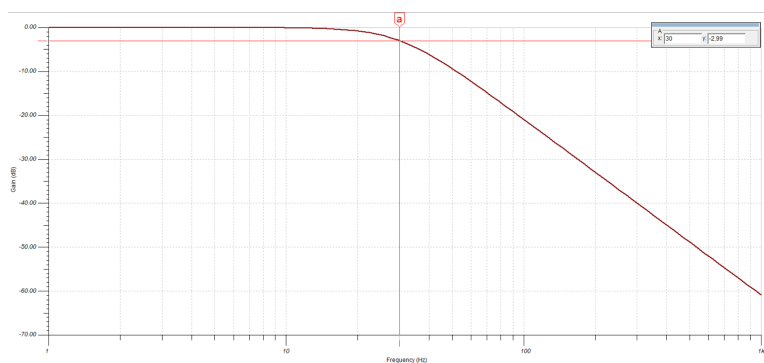


Figura 16. Simulação do Filtro Passa-Baixa

4.1.5. Amplificador Ajuste de Nível DC

Por fim, para ajustar o nível de saída foi somado 1,29V DC ao sinal, obtendo o valor máximo e mínimo de 2,64V e 4,18mV, respectivamente.

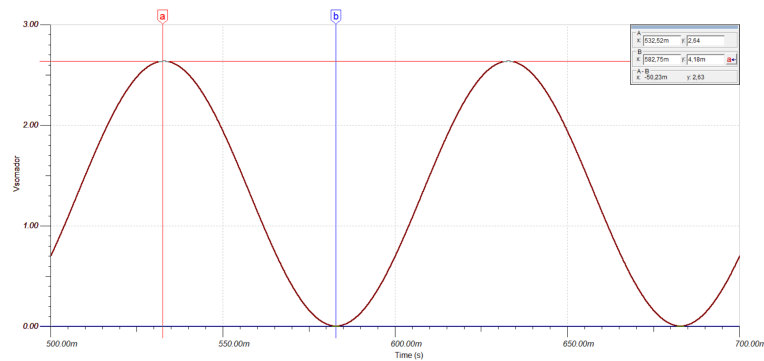


Figura 17. Simulação do Amplificador Somador

4.1.6. Resultado final

Abaixo segue o gráfico comparativo entre o sinal de entrada V_{temp} e o de saída V_{final} .

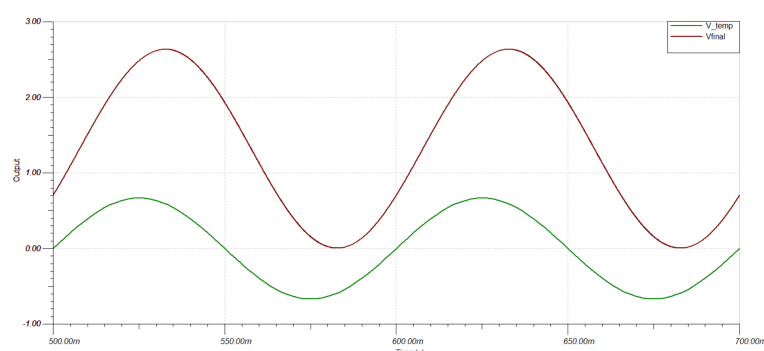


Figura 18. Comparação entre sinal de entrada e saída

5. Aplicação

Ao fim do condicionamento, o sinal encontra-se no intervalo de 4,18mV à 2,64V. Dado que esses valores de pico representam a faixa de temperatura de 2°C à 150°C, podemos estimar a temperatura com a relação linear dessa reta:

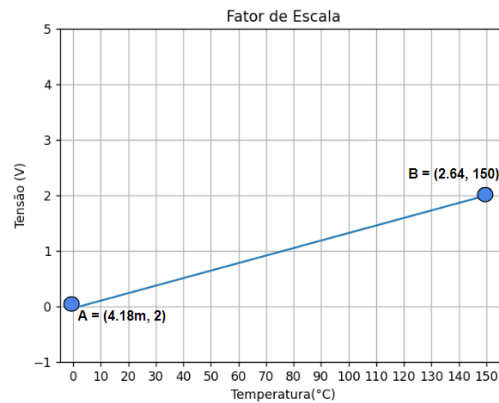


Figura 19. Relação da Temperatura com o Sinal condicionado do sensor

$$\begin{aligned} \text{Coeficiente angular: } \alpha &= \frac{\Delta V}{\Delta T} = \frac{2,64 - 4,18m}{150 - 2} \cong 17,8mV/^{\circ}C \\ \text{Coeficiente Linear: } &-0,03142 \\ \text{Relação Linear: } T(V) &= 1,765 + \frac{V}{17,8 \cdot 10^{-3}} \end{aligned} \quad (5)$$

A aplicação do sensor LM35 é apenas medir as temperaturas de acordo com a tensão que passa através dele. Sendo assim, com a relação definida na Eq. 5 é válida para medir a faixa de temperatura proposta, como podemos observa em:

$$\begin{aligned} T(2,64V) &= 1,765 + \frac{2,64}{17,8 \cdot 10^{-3}} \cong 150^{\circ}C \\ T(4,14mV) &= 1,765 + \frac{4,14 \cdot 10^{-3}}{17,8 \cdot 10^{-3}} \cong 2^{\circ}C \end{aligned}$$

Referências

- Pedroni, V. A. (2010). *Eletrônica digital moderna e VHDL*. Elsevier.
- Texas Instruments (1998). Lm118-n/lm218-n/lm318-n operational amplifiers. (SNOSBS8C). Rev. 03.13.
- Texas Instruments (1999). Precision centigrade temperature sensors. (SNIS159H). Rev. 12.17.
- Texas Instruments (2018). Diode-based temperature measurement. (SBOA277A). Rev. 05.19.