

Projeto de um controlador de temperatura

27 de agosto de 2022

Andrea Mara Weber
Cristiano Koxne
Enzo Hashimoto
Julieli Spanholi
Laryssa Rayane Zortea
Wesley Augusto Catuzzo De Bona

1. Introdução

O presente trabalho tem como objetivo principal implementar um controlador de temperatura para um sistema em malha fechada. Tendo como propósito realizar o controle de temperatura utilizando um valor de tensão de entrada, tornar o sistema mais rápido e zerar o erro em regime permanente.

Foram realizados ensaios primeiramente para a modelagem da planta que se desejou controlar, nesse caso o sistema térmico, com o objetivo de obter a constante de tempo, o ganho, e por consequência, a função de transferência da planta.

Foi desenvolvido também um atuador para a planta, responsável por fazer o chaveamento da rede elétrica atuante sobre o sistema.

Por fim, a malha do sistema foi fechada com a realimentação da saída, e assim foi projetado um controlador do tipo proporcional integral para a planta.

2. Materiais utilizados

Protoboard
Recipiente metálico
Multímetro
Componente resistivo de 20, 95 Ω e 700W
Amplificadores operacionais
Osciloscópio
Fonte simétrica
Variac
Circuito Integrado N555
Sensor de temperatura LM35
Resistores de 130K Ω
Capacitores de 1 μ F, 10nF e 100nF

3. Modelo matemático utilizado

O sistema projetado é um sistema de controle de temperatura da água, o qual é representado pela equação de transferência de calor, descrita na Equação 1

$$Q = mc\Delta t \quad (1),$$

onde Q é a quantidade de calor em kcal, m é a massa em kg, c é o calor específico do material, que representa a quantidade de calorias necessárias para a variar em 1°C a temperatura de 1 kg de matéria, em kcal/kg°C. Já Δt é a variação de temperatura a qual o sistema foi submetido.

Como essa equação só considera o aumento da temperatura de em um sistema, é necessário considerar que há uma perda de calor para o ambiente, pois trata-se de um sistema real. Esse comportamento pode ser representado pela Equação 2.

$$Q_i - Q_o = mc \cdot \Delta t \quad (2)$$

Nesta equação, Q_i é o calor fornecido ao sistema e Q_o é o calor perdido para o ambiente.

Para que a equação seja mais funcional para o projeto, é necessário derivar os dois lados da Equação 2 em relação ao tempo, resultando numa equação diferencial que representa a taxa de variação de calor do sistema, representada pela Equação 3

$$\frac{Q_i - Q_o}{dt} = \frac{mcdT}{dt} \quad (3)$$

Onde Q_i/dt representa a taxa de calor de recebido pelo sistema e Q_o/dt representa a taxa de de calor perdido pelo sistema, resultando na Equação 4

$$h_i - h_o = \frac{mcdT}{dt} \quad (4)$$

Para aproximar-se do objetivo deste projeto, é necessário relacionar ao sistema uma grandeza física conhecida como resistência térmica R_t , em °C/kcal, a qual é a razão entre a Temperatura e a taxa de transferência de calor, retratada na Equação 5.

$$R_t = \frac{T}{h_o} \quad (5)$$

Isolando a Equação 5 em termos de h_o , obtém-se a Equação 6:

$$h_o = \frac{T}{R_t} \quad (6)$$

Substituindo a Equação 6 na Equação 4, é possível chegar na Equação 7:

$$h_i - \left(\frac{T}{R_t}\right) = \frac{mcdT}{dt} \quad (7)$$

Multiplicando a Equação 7 por R_t , obtém-se a Equação 8:

$$h_i R_t = \frac{mcdTR_t}{dt} + T \quad (8)$$

Esta equação diferencial rege o comportamento da temperatura do sistema de acordo com a energia fornecida ao longo do tempo, aplicando a Transformada de Laplace sobre a Equação 8, obtém-se a representação desse mesmo sistema no domínio do tempo, representada pela Equação 9.

$$RiHi(s) = Rt \cdot mc \cdot sT(s) + T(s) \quad (9)$$

A partir da equação 9, isola-se $T(s)$ e $Hi(s)$ e é possível chegar na seguinte função de transferência, representada pela Equação 10.

$$\frac{T(s)}{Hi(s)} = \frac{Rt}{RtCs + 1} \quad (10)$$

Essa equação representa a função de transferência do sistema térmico desejado, através dela, é possível estimar a resposta do sistema em Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) ao fornecer a ele uma certa quantidade de calor, através da conversão de energia elétrica em energia térmica, obtida através da dissipação de potência em um componente resistivo. Tal fenômeno é descrito pela Equação 11:

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (11)$$

A equação é descrita em *watts W*, sendo 1W equivalente a 1J/s (Joule/s). Para adequarmos com os valores usados no projeto, optou-se por usar quilocalorias como unidade de medida de energia. Logo, obtém-se o seguinte fator de conversão:

$$J = 1,239 \cdot 10^{-4} \text{ kcal} \quad (12)$$

4. Validação do modelo e modelagem da planta

A função de transferência $G(s)$ usada para representar o sistema que deseja-se controlar é representada pela seguinte equação:

$$G(s) = \frac{Rt}{RtCs + 1} \quad (13)$$

Onde Rt é a resistência térmica em $^{\circ}\text{C}/\text{kcal}$, C é a capacitância térmica em $\text{kcal}/^{\circ}\text{C}$, e RtC descreve a constante de tempo τ do sistema em s. Para obtenção dos dados necessários, realizou-se um ensaio prático.

$$G(s) = \frac{Rt}{\tau s + 1} \quad (13)$$

Dado a Equação 4, sabe-se que hi e ho , são respectivamente, a taxa de entrada de calor no sistema e a taxa de perda de calor do sistema para o ambiente. As constantes m e c , são a massa da água e seu calor específico. Cujo o produto entre elas é chamado de capacitância térmica, e o valor calculado para 400 mL de água, do qual o calor específico e massa são respectivamente, 1 kcal/kg $^{\circ}\text{C}$ e 1 kg/m 3 , foi de aproximadamente 400 cal/ $^{\circ}\text{C}$.

Para facilitar a modelagem do sistema, foi desprezada a perda de volume de água devido a evaporação causada pelo aquecimento.

Inicialmente, encheu-se o recipiente metálico com 400mL de água e aferiu-se uma temperatura inicial de 23 $^{\circ}\text{C}$. A tensão fornecida pelo variac ao componente resistivo foi de 25 Vrms. A energia dissipada pela resistência na forma de calor, foi parcialmente transferida para a água, e o restante foi perdido para o ambiente. O experimento teve duração de 2 horas e 3 minutos. As medidas de temperatura da

água foram realizadas em intervalos de 60s, resultando num total de 129 pontos coletados. Ao final do experimento, a temperatura estabilizou-se em 41,8°C. Com base nisso, foi possível chegar num valor de variação de temperatura ΔT , onde obteve-se:

$$\Delta T = 18,8^\circ$$

O gráfico obtido possui um offset de 23°C, que diz respeito à temperatura inicial da água e representa a variação da temperatura ao longo do tempo. Porém, optou-se por remover o offset para tornar a análise da variação de temperatura e o cálculo da constante de tempo mais práticos. A constante de tempo é obtida no instante em que a temperatura atinge 63,2% do valor final.

Com base nos dados obtidos, a curva que representa o comportamento da temperatura foi obtida utilizando o software MATLAB, conforme a figura 2.

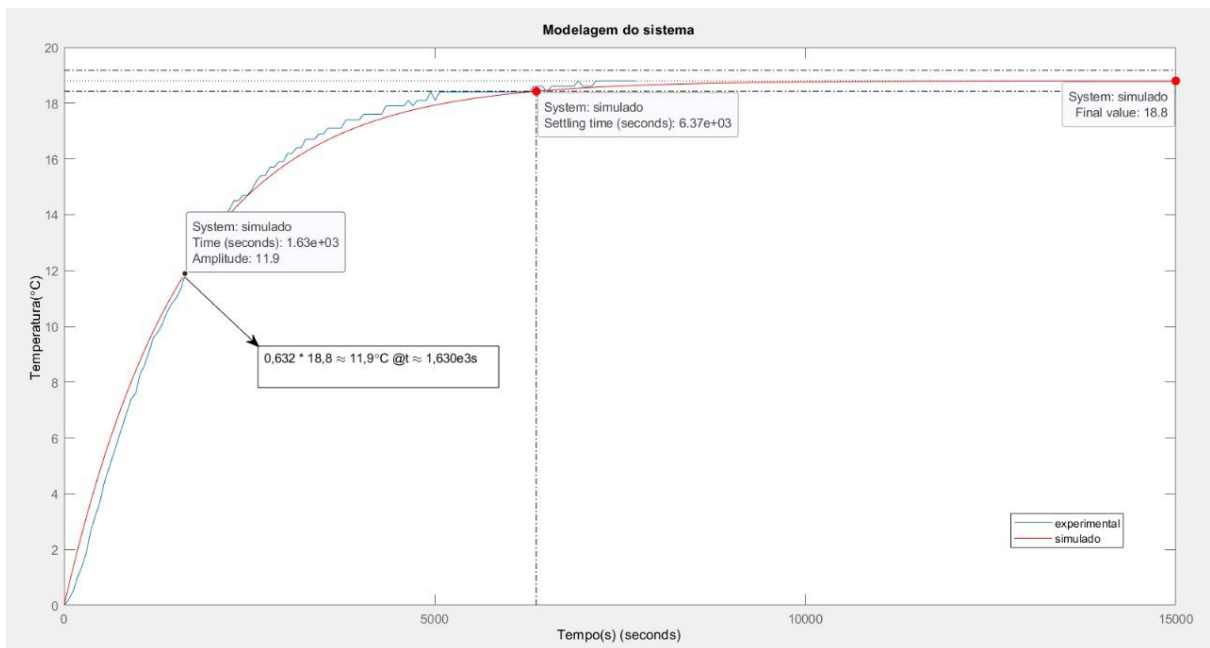


Figura 1: Comportamento do sistema em regime permanente

Fonte: Autoria própria

Com a variação de temperatura encontrada, foi possível obter o valor da resistência térmica, dada pela Equação 14:

$$RT = \frac{\Delta T}{\Delta h_i} \quad (14)$$

Onde ΔT é a variação térmica do sistema, equivalente a 18,8° e Δh_i é a variação de calor de entrada, a qual pode ser obtida através da Equação 11 e do fator de conversão de Watts para J/s:

$$h_i(0^+) = \frac{V_{in}^2}{R} \cdot 2,39 \cdot 10^{-4} \text{ kcal} \quad (15)$$

Baseado nos dados obtidos no ensaio, foi possível chegar a uma tensão de entrada V_{in} de 25 Vrms, obteve-se o valor de $h_i(0^+) = 7,131 \text{ cal/s}$.

Portanto, o valor da resistência térmica obtido foi de 2636,311 °Cs/kcal, já o valor calculado para a constante de tempo τ foi de $1,63 \cdot 10^3 \text{ s}$.

A partir desses valores, foi possível encontrar a função de transferência equivalente do sistema estudado, a qual pode ser representada pela Equação 16:

$$G(s) = \frac{2636.311}{1630s + 1} \quad (16)$$

5. Atuador

O controle de temperatura consiste no fornecimento de uma tensão para o componente resistivo, dissipando essa energia na forma de calor, e assim, aquecendo a água do sistema.

O controlador foi implementado através de amplificadores operacionais, porém, como não são capazes de fornecer altas tensões para o sistema, é necessário utilizar um atuador, responsável por fazer um chaveamento da alimentação da rede, a uma frequência de 60Hz. Portanto, é a frequência de chaveamento desse circuito que determina a tensão de saída no aquecedor.

Contudo, é preciso realizar um chaveamento sucessivo, variando o tempo em que a rede fica conectada ao aquecedor.

O chaveamento do presente circuito é realizado por um dispositivo chamado de relé de estado sólido, o qual possui o comportamento similar ao de um transistor do tipo MOSFET, pois o mesmo liga e desliga a conexão entre o circuito e a rede elétrica, de acordo com a potência desejada.

Desse modo, o atuador gera um sinal do tipo PWM (*pulse width modulation*), o qual consiste num pulso retangular, no qual varia a cada ciclo, entre um nível baixo e um nível alto. O período de tempo em que o sinal fica alto é representado por t_{on} .

Levando em conta t_{on} e o período do sinal, é possível definir um ciclo de trabalho, representado pela Equação 17:

$$D = \frac{t_{on}}{T} \quad (17)$$

Variando o ciclo de trabalho, ou seja, variando o tamanho de t_{on} , é possível controlar a frequência de chaveamento do nosso circuito, e consequentemente, aumentar ou diminuir a tensão média de saída do aquecedor.

Para a construção do atuador, optou-se pela utilização de um circuito integrado do modelo 555, o qual foi baseado num modelo de circuito encontrado no site Flípeflop. O circuito integrado atua como um circuito oscilador, responsável por gerar o sinal PWM, além disso, o modelo é apto para operar de três modos: monoestável, astável e biestável.

Entretanto, para o controlador projetado, optou-se por operar o circuito em modo astável, o qual consiste em alterar o sinal de saída do circuito através do controle da frequência de entrada. A frequência de entrada é definida pelos resistores e pelo capacitor conectados ao 555.

Capacitores possuem funcionamento semelhante ao de baterias, pois são dispositivos armazenadores de carga. Entretanto, capacitores podem carregar e descarregar instantaneamente, fornecendo toda a energia armazenada de uma vez só, enquanto baterias possuem limitações de corrente máxima.

Ao associar um resistor e um capacitor em série, é possível determinar com precisão o tempo que um capacitor leva para atingir um determinado valor de tensão, de modo que o circuito integrado possa usufruir dessa propriedade. A figura 4 ilustra o funcionamento do circuito nos momentos de descarga.

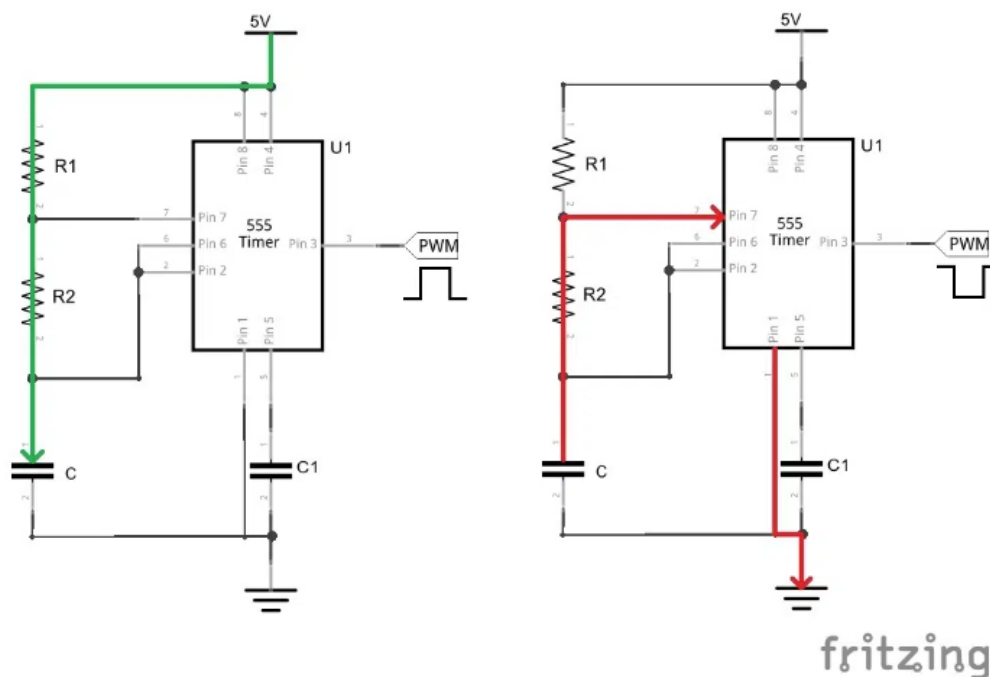


Figura 2: ilustração do circuito gerador de sinal PWM nos períodos de carga e descarga.

Fonte: Flípeflop

Para que o capacitor C entre no estado de carga, é necessário que a tensão no componente capacitivo seja inferior à $\frac{1}{3}$ da tensão de alimentação V_{cc} do circuito. De forma que, o sinal de saída do componente seja alto, o Pino 7 do 555 ficará aberto e o capacitor C é carregado através dos resistores R1 e R2.

Em contrapartida, para que o capacitor C entre em estado de descarga, a tensão no capacitor deve ser superior à $\frac{2}{3}$ da tensão de entrada V_{cc} . Dessa forma, o sinal de saída do componente é alto, e o resistor R2 descarrega o capacitor C através do pino 7, que é aterrado. Esse processo pode ser visto na figura 5.

*figura 5

Já o pino 5 fornece a tensão de referência $\frac{2}{3} V_{cc}$, essa tensão é utilizada pelo C1 para detectar borda de descida. Contudo, essa abordagem não foi utilizada no projeto, e ao invés da conexão do pino 5, foi utilizado um capacitor C1 de 100nF, para estabilizar o oscilador.

Para determinar o tempo em alto e o tempo em estado baixo da tensão de saída durante o período de carga, é necessário se atentar aos valores de R_1 e R_2 e para o capacitor C . Contudo, enquanto o processo de carga depende dos dois resistores, o processo de descarga depende apenas do resistor R_2 , consequentemente, no estado de carga o sistema levará mais tempo do que o processo de descarga, pois há mais um componente resistivo retardando a circulação da energia. Logo, o ciclo de trabalho sempre será maior que 50%.

Porém, como a razão cíclica desejada para o projeto é variável devido a presença de um potenciômetro, foi necessário desacoplar os resistores de carga e descarga. Além disso, foi necessário utilizar um diodo para separar o processo de carga e descarga. Uma vez que o diodo opera em curto quando polarizado diretamente e opera como uma chave quando polarizado reversamente.

Portanto, durante o estado de carga, o diodo D_1 estando em paralelo com o resistor R_2 , se comporta de maneira semelhante a um curto, dado que sua resistência é muito pequena. Sendo assim, a corrente só percorre o diodo, e não o resistor. Contudo, durante o processo de descarga, este circuito opera como uma chave, fazendo com que a corrente flua pelo resistor R_2 . Essa alteração foi o que possibilitou uma razão cíclica inferior a 50%.

No entanto, como o semiconductor escolhido foi um diodo de germânio, foi necessário contornar a queda de tensão de 0,3V provocada pelo componente, pois ela poderia interferir no processo de carga do capacitor, o que poderia comprometer consideravelmente seu tempo de carga e consequentemente alterar a frequência produzida. Para compensar esse problema, foi necessário adicionar um diodo D_2 em série ao resistor R_2 , de maneira que o diodo D_2 interferisse no processo de carga do capacitor, compensando o efeito.

Normalmente, para se produzir um sinal PWM, varia-se o tempo em que o sinal fica em alto, além de produzir uma variação igual e inversa do tempo em que o sinal fica em baixo. No circuito projetado, os tempos em baixo e alto são proporcionais aos resistores de carga e descarga. Logo, para aumentar o tempo em alto, é necessário controlar o resistor de carga, da mesma forma que para aumentar o tempo em baixo, é necessário controlar o resistor de descarga. Entretanto, para facilitar a implementação do circuito, foi usado um potenciômetro.

Para facilitar a compreensão, é necessário tratar o potenciômetro R_v como os dois resistores variáveis, logo, ao girar o componente para a esquerda, aumenta-se o valor do resistor da direita, ao passo que diminui-se o valor do resistor da esquerda.

6. Atuador: Simulações e implementação

Nessa etapa do projeto, não foi possível simular um sinal PWM a partir do circuito integrado N55, contudo, ao simular o circuito pelo software LTSpice, optou-se por utilizar um gerador de sinal de onda quadrada, como também foi possível gerar um sinal PWM na montagem do circuito. A frequência desejada para o sinal PWM era de aproximadamente 5Hz, contudo, foi possível gerar um sinal PWM de aproximadamente 4,5Hz.

Para o circuito gerador de sinal PWM, foram utilizados os seguintes componentes: um CI N555, dois resistores R1 e R2 de 130K Ω , um potenciômetro de 10K Ω , três capacitores de respectivamente 1 μ F, 100nF e 10nF e dois diodos 1N4007.

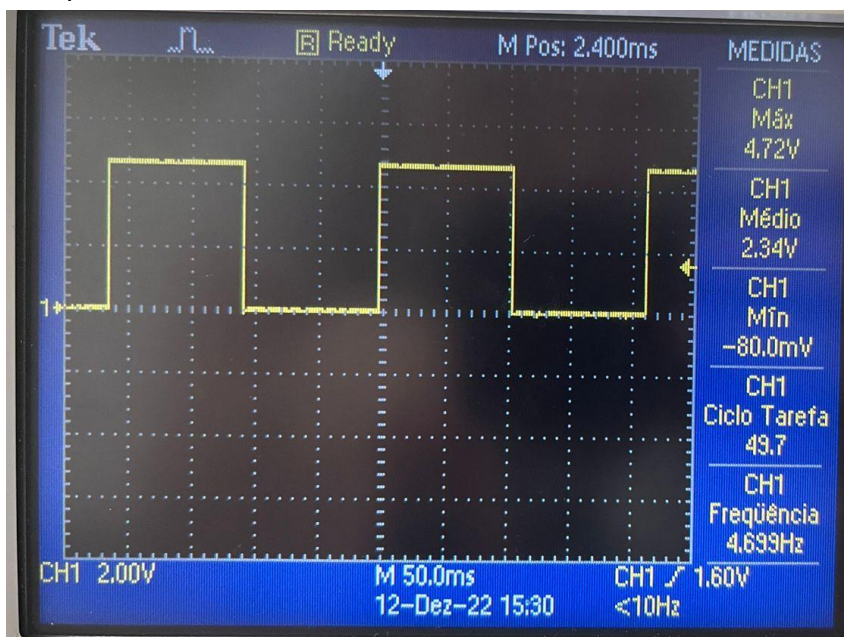


Figura 3: Sinal PWM gerado pelo modo astável do circuito integrado N555

Fonte: Autoria própria

7. Relé de estado sólido

O relé de estado sólido, ou em inglês *solid state relay* (SSR), é um componente baseado em semicondutores. Este dispositivo é capaz de executar as mesmas funções de contadores e relés eletromecânicos, que é acionar uma carga de alta potência utilizando uma baixa potência de entrada.

O que o difere de seus equivalentes eletrônicos é não possuir peças móveis em sua construção, evitando problemas de atraso e ruídos entre as mudanças de estado. Seu funcionamento ocorre a partir de semicondutores, ao invés de contatos físicos como, por exemplo, MOSFET e SCR. Devido à ausência de contatos físicos, o relé de estado sólido não gera arco elétrico.

Outra vantagem do relé de estado sólido é sua capacidade de chaveamento em um tempo muito menor.

De forma similar ao relé eletromecânico, ele possui isolamento completo entre os contatos de entrada, um sistema de controle, e os contatos de saída, um sistema de potência. Isso evita o risco de danificar os componentes eletrônicos, uma vez que não interagem diretamente com o sistema de potência.

O Novus SSR-4840 foi o relé escolhido para realizar o acionamento da carga no sistema a ser desenvolvido. Essa escolha deu-se à sua faixa de frequência de operação (47 a 70 Hz) incluir a frequência da rede elétrica (60 Hz). Além de também possuir tensão de controle entre 4 e 32 V_{cc} e corrente de controle entre 5 a 12 mA_{acc}. Também é capaz de chavear tensões entre 75 e 480 V_{rms}, assim como fornecer uma corrente de 40 mA_{rms} para a carga.

Com o objetivo de chavear o circuito, o relé faz com que este seja acionado pela vontade do usuário. O disparo das mudanças de estado ocorre através do cruzamento por zero. Isto é, o SSR somente altera o estado de aberto para fechado, e vice-versa, quando a tensão sobre os terminais de saída cruza o zero.

8. Sensor de temperatura

Para encontrar o erro do sistema é necessário um método de monitoramento da saída do sistema, assim, juntamente com os dados da entrada, é possível chegar ao erro produzido. Para esse monitoramento, dado que o sistema é térmico, foi necessário empregar um sensor de temperatura, o sensor é utilizado para capturar os dados da saída, para que com base nesses dados o controlador pudesse realizar a tomada de decisões.

Optou-se por utilizar um sensor LM35, pela facilidade do mesmo ser configurado em Celsius. As medições desse modelo de sensor atingem precisão de 0,5 °C a 25 °C, de qualquer temperatura que esteja entre a faixa de -55 °C e 150 °C.

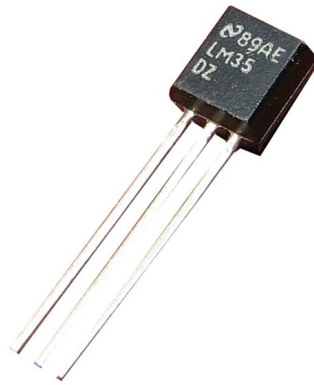


Figura 4: Sensor de temperatura LM35

Fonte: Vida de Silício - site.

A característica desse componente é de escala linear de ganho de 10 mV/°C, garantindo precisão para micro-circuitos. A temperatura máxima de saída é de 1V, e atinge essa temperatura com 100 °C, operando em uma faixa de alimentação de 4 a 30 V, com baixo consumo de corrente.

6. Adequação do sinal do sensor

O sinal obtido através do sensor LM35 varia cerca de 10 mV/ °C, por conta disso, é necessário amplificar esse sinal para poder utilizá-lo. Para isso foi utilizado um circuito amplificador constituído por duas etapas a partir de um amplificador operacional. O circuito do amplificador usado está descrito na figura 7:

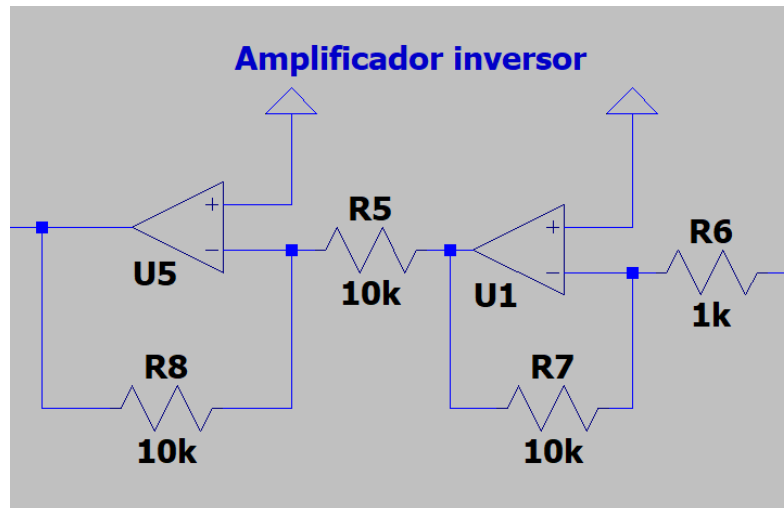


Figura 5: Circuito amplificador inversor simulado.
Fonte: Autoria própria.

A saída obtida para o sinal gerado pelo circuito amplificador inversor foi um sinal constante de 11,3V, variando 1,3V em relação ao cálculo do circuito, onde usava-se uma entrada de cerca de 1V e a partir dele seria possível obter um sinal de cerca de 10V. Tanto no cálculo quanto na implementação foi considerada uma tensão de entrada de 1V.

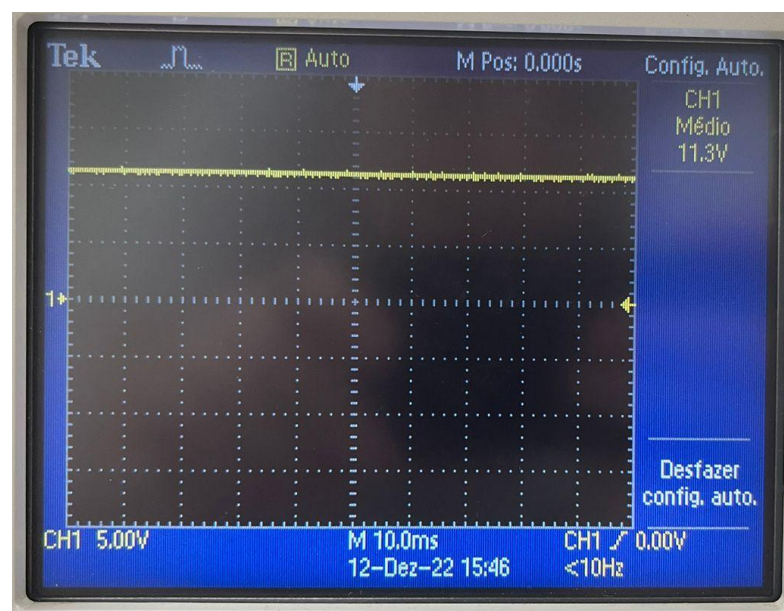


Figura 6: Sinal de saída do circuito amplificador inversor.
Fonte: Autoria própria

9. Circuito subtrator

Para que seja possível realizar o controle do sistema, com o objetivo de atingir um erro nulo em regime permanente, faz-se necessário fechar a malha do sistema, porém para que o erro encontrado entre a referência e a saída possa ser determinado, é necessário a presença de um circuito subtrator.

Trata-se de um circuito construído a partir de amplificadores operacionais, capaz de efetuar operações de subtração, a partir de valores de tensão aplicados na entrada do sistema, a tensão de saída é descrita pela Equação 18:

$$V_o = \frac{R_2}{R_1} (V_b - V_a) \quad (18)$$

O objetivo é obter um ganho unitário. Dessa forma, foram escolhidos resistores com os seguintes valores, $R_1 = R_2 = 10K$.

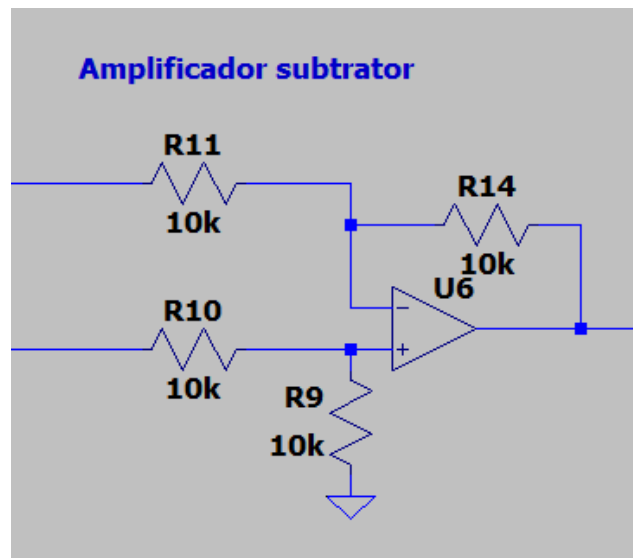


Figura 7: Circuito amplificador subtrator implementado.
Fonte: Autoria própria

Com o circuito pronto, é possível fechar a malha do circuito, utilizando como entrada a referência e a saída do sistema.

Ao implementar o circuito amplificador subtrator, obteve-se um resultado diferente do esperado, onde a tensão de entrada seria de 10V (seguindo os cálculos do circuito amplificador inversor) e a tensão de saída seria de cerca de -1V, contudo, a saída do circuito foi muito diferente do resultado esperado, sendo de -13V.

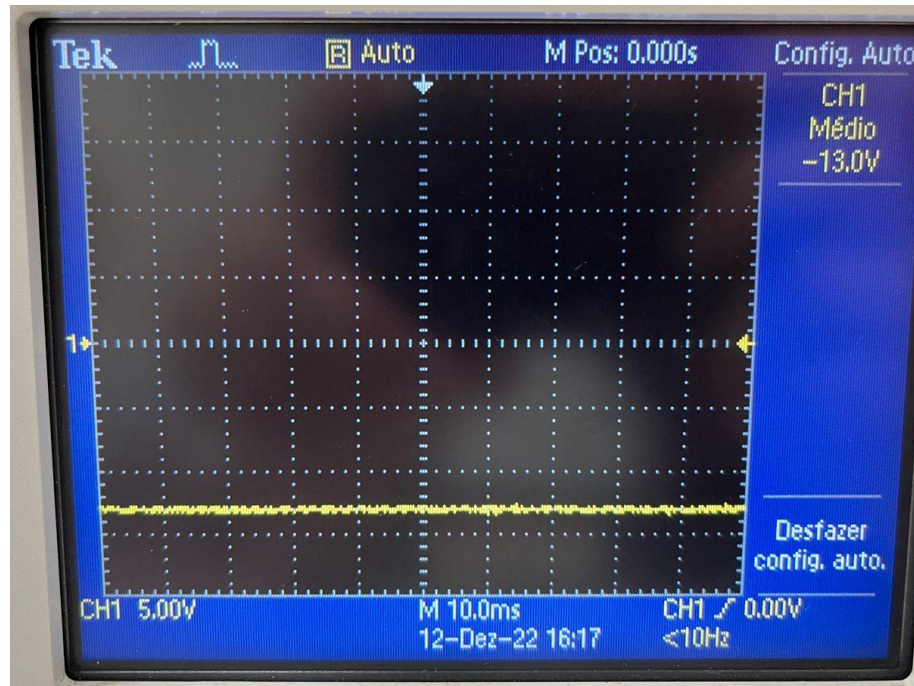


Figura 8: Sinal de saída do circuito subtrator.

Fonte: Autoria própria

10. Projeto do compensador

Conforme identificado na modelagem do sistema, a resposta do sistema em malha fechada apresenta erro em regime permanente, assim, iremos projetar um circuito proporcional integrador (PI) que tem como característica zerar o erro sem alterar de forma significativa a resposta transitória. Partindo da Fig. x, para projetar o controlador PI precisamos trabalhar com realimentação unitária, assim, será aplicado técnicas algébricas de blocos para remover o Ksensor da realimentação e inserir na planta do sistema, obtendo assim, uma nova planta para projetar o controlador.

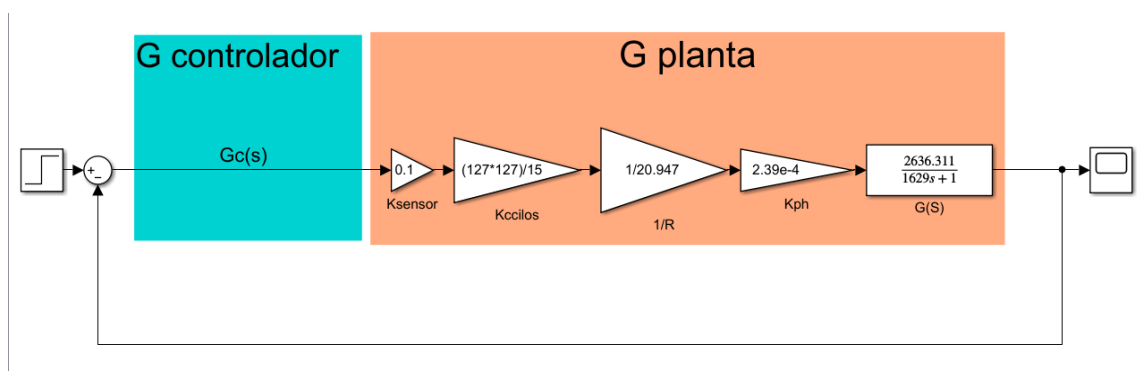


Figura 9: Representação da planta do sistema compensado em diagrama de blocos.
Fonte: Autoria própria

Para projeto do controlador onde não queremos um sistema que tenha ultrapassagem percentual em sua resposta, tempo de assentamento de 180 segundos e erro nulo em regime permanente, como intuito de não alterar a forma da resposta que é superamortecida o fator de amortecimento ζ será unitário, assim, obteremos a frequência natural ω_n da seguinte maneira.

$$\begin{aligned}\zeta &= 1 \\ T_s &= 820s \\ \omega_n &= 4 / (\zeta \cdot T_s) = 4,88 \cdot 10^{-3} \text{ rad/s}\end{aligned}\quad (19)$$

A partir da frequência natural é possível obter os pólos dominantes de malha de fechada, que nos fornece a resposta com as características desejadas, sendo.

$$s = -\zeta\omega_n \pm j\omega_n\sqrt{1-\zeta^2}\quad (20)$$

$$s = -4,88 \cdot 10^{-3}\quad (21)$$

O controlador PI possui um zero em $s = -1/T_i$ e um pólo em $s = 0$. Logo, a característica do controlador PI é possuir ganho infinito na frequência nula. Isso melhora as características de regime permanente. Entretanto, a inclusão da ação de controle PI no sistema aumenta em 1 o número que define o tipo do sistema compensado. Isso resulta em um sistema compensado menos estável ou, até mesmo, faz o sistema se tornar instável. Portanto, os valores de K_p e T_i devem ser escolhidos cuidadosamente para garantir uma resposta temporal apropriada. Projetando de maneira adequada o controlador PI, é possível fazer a resposta temporal à entrada em degrau e exibir um sobressinal relativamente pequeno ou nenhum. A velocidade de resposta, contudo, fica muito lenta. Isso ocorre porque o controlador PI, sendo um filtro passa baixa, atenua os componentes de alta frequência do sinal (Ogata, 2011). Para encontrar o ganho proporcional K_p e a constante T_i

$$G_c(s) = K_p \cdot (1 + 1/(T_i \cdot s))\quad (22)$$

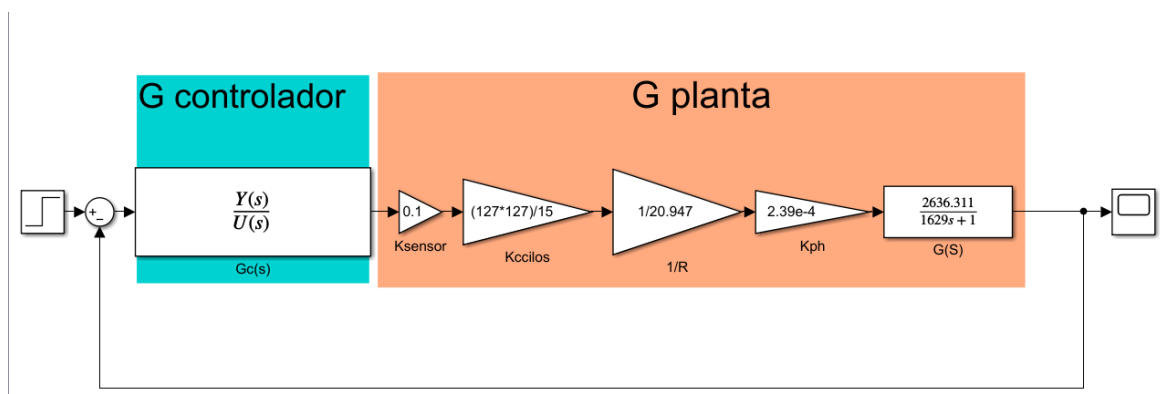


Figura 10: Representação da planta do sistema compensado em diagrama de blocos.

Fonte: Autoria própria

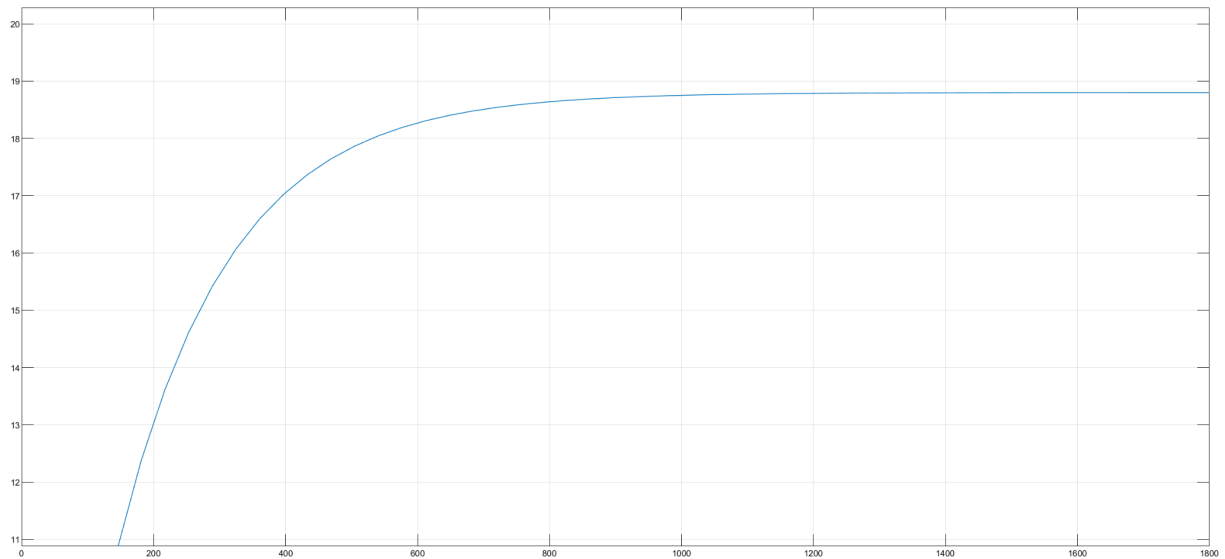


Figura 11: Representação da planta do sistema compensado em um trajeto.

Fonte: Autoria própria

11. Simulação do compensador escolhido

Para verificar a viabilidade do controlador, realizaram-se simulações utilizando o software LTSpice para simular o circuito obtido, juntamente com os componentes calculados, como podemos ver na figura a seguir:

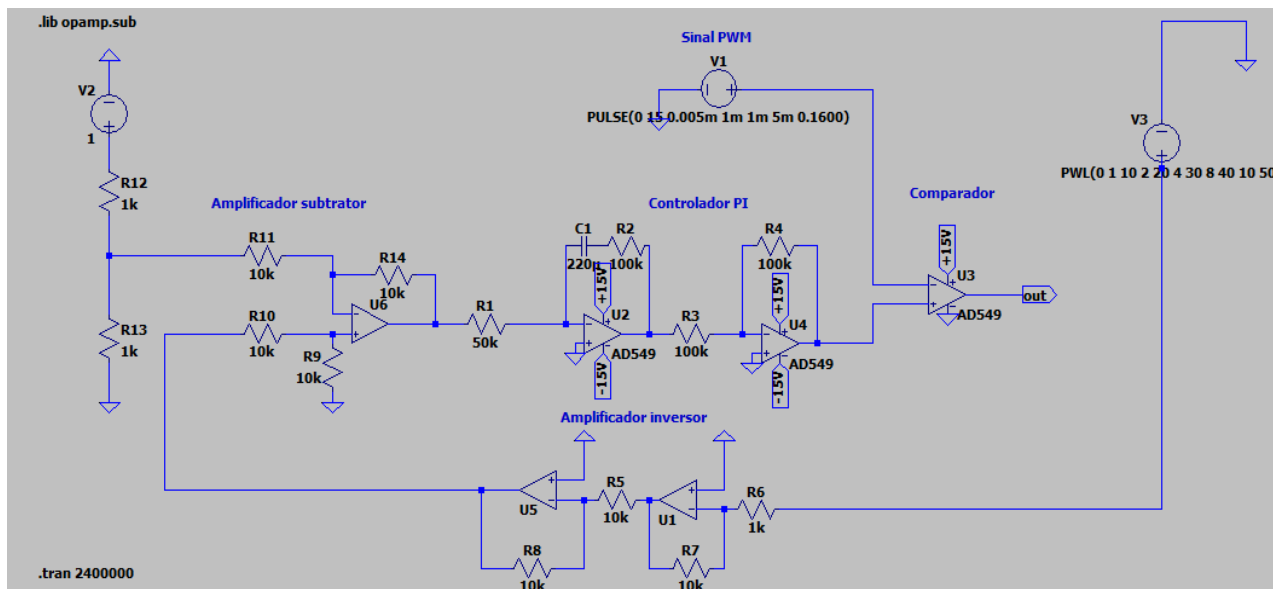


Figura 12: circuito projetado com as especificações de projeto obtidas.

Fonte: Autoria própria

Dado algumas limitações de componente do software alguns circuitos foram adaptados, para simular aqueles idealizados no projeto, como o do sinal PWM, que foi substituído por um fonte que gera pulsos periódicos, bem como a simulação do sinal que vem do sensor, que foi substituído por uma fonte com aumento periódico de tensão, as mudanças foram feitas para chegar a uma simulação o mais próximo possível da encontrada no circuito real.

Ainda por limitações de software, algumas partes do circuito não existem na simulação, como o relé de estados sólido, a água e o rabo quente, pois o software não possui métodos de simular esses elementos físicos.

12. Resultados obtidos

O objetivo geral do projeto de controlador de temperatura é aplicar conceitos práticos discutidos em cursos teóricos da disciplina de sistemas de controle 2. Um sistema de controle capaz de trazer a temperatura da água para referência de erro zero em estado estacionário.

Além disso, como requisito adicional, acelera o processo de estabilização da temperatura. A partir dos resultados mostrados, pode-se afirmar que todos os objetivos foram apresentados de forma satisfatória.

Além de zerar o erro entre a temperatura da água e temperatura necessária, o tempo de estabilização pode ser reduzido em aproximadamente 5200 s do circuito aberto em cerca de 240 segundos. Durante a execução do projeto, o principal problema enfrentado foi a montagem dos circuitos atuador e controlador. Levando em consideração que não foi possível obter bons resultados na implementação do circuito subtrator, a equipe não conseguiu corrigir os possíveis erros a tempo, o que acabou afetando os testes do circuito compensado com o controlador PI e do circuito comparador de tensão.

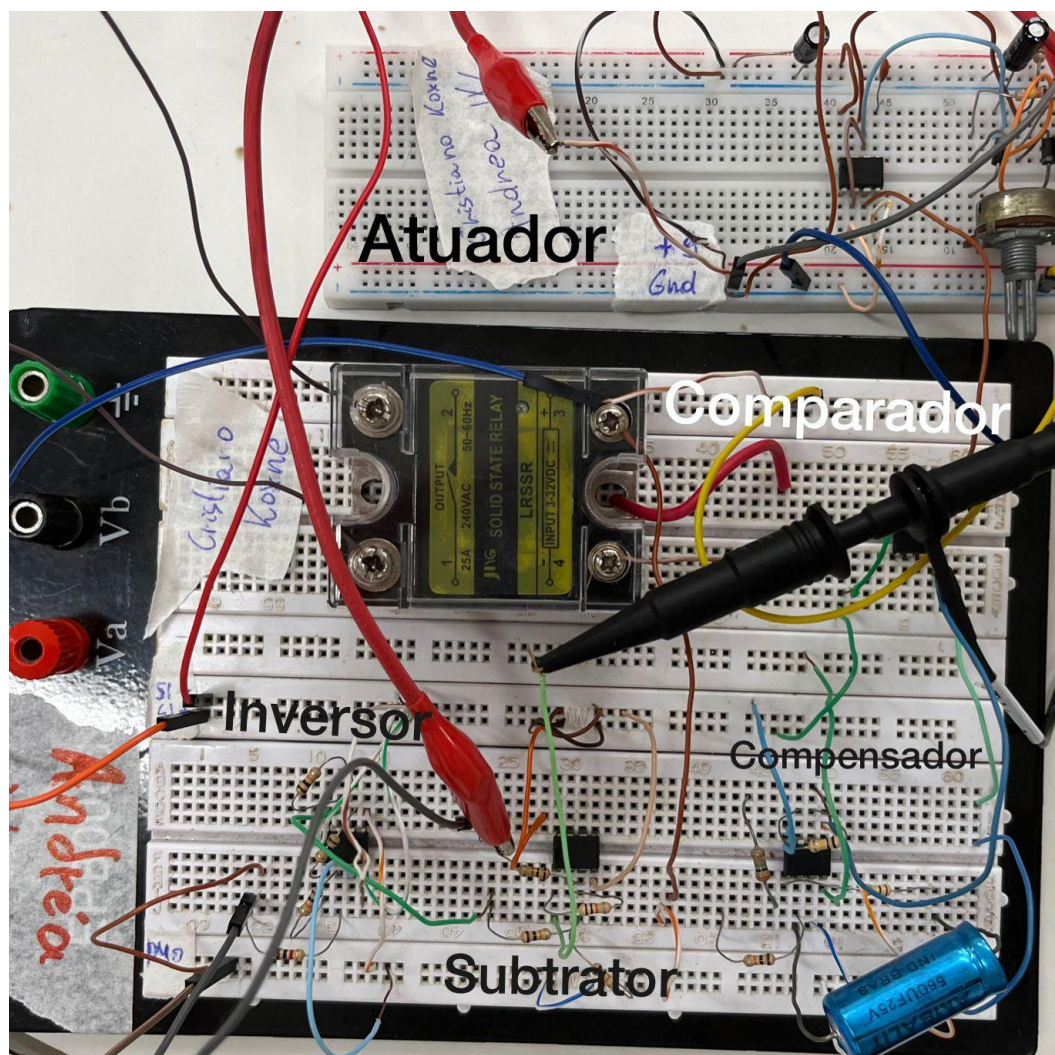


Figura 12: Implementação do projeto
Fonte: Autoria própria

13. Referências

DIAS, M. **Modulador PWM com CI 555: Como construir um modulador?** Disponível em: <<https://www.filipeflop.com/blog/modulador-pwm-com-um-ci-555/>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

GERADOR DE PWM COM 555 | Conheça Eletrônica! #081. Disponível em:
<<https://www.youtube.com/watch?v=dBAqxrlmzpk>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

LM35 Sensor de Temperatura. Disponível em:
<<https://www.vidadesilicio.com.br/produto/lm35-sensor-de-temperatura/#:~:text=Sensor%20de%20temperatura%20LM35>>. Acesso em: 12 dez. 2022.

BOYLESTAD, R. L. **Introductory circuit analysis.** [s.l.] Pearson Education India, 2003.

CARDOSO, R. **Material da disciplina de Sistemas de Controle 2.** UTFPR, 2022.

#33 Acionamento por Temperatura com Comparador de Tensão e LM35. Disponível em:
<<https://www.youtube.com/watch?v=N0IOzK2ERXk&t=46s>>. Acesso em: 12 dez. 2022.