

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DE BAIXO CUSTO NO ENSINO PRÁTICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

DOI: 10.37702/2175-957X.COBENGE.2023.4470

André de Abreu Dalton - andre.dalton@engenharia.ufjf.br
Universidade Federal de Juiz de Fora

Bartolomeu Henrique Lopes - bartolomeu.henrique@engenharia.ufjf.br
Universidade Federal de Juiz de Fora

Daniel de Almeida Fernandes - daniel.fernandes@engenharia.ufjf.br
Universidade Federal de Juiz de Fora

Resumo: Utilizar montagens que tornem o ensino das diversas áreas da Engenharia Elétrica mais atrativo e próximo aos alunos é um dos métodos práticos que auxilia professores na ampliação do engajamento nas disciplinas. Porém, estas, por vezes, podem acarretar um alto investimento de tempo e dinheiro, além de ser de difícil manuseio. Este trabalho apresenta um Sistema de Controle de Temperatura (SCT) que pode ser construído com materiais de baixo valor de aquisição e dependendo pouco tempo. Trata-se de um protótipo que correlaciona diversas áreas do desenvolvimento do estudante de Engenharia Elétrica, imprescindíveis para sua formação. Utilizando um circuito formado por amplificadores operacionais, dois transistores e dois sensores de temperatura, pode-se fazer o controle de temperatura de um sistema simples e facilmente replicável. Com a inserção de um Arduino Nano, um gráfico dos dados do SCT é mostrado em tempo real, auxiliando na apresentação prática de conceitos abstratos como: distúrbio de medição, energia do sistema, inversão de sinais de entrada e saída, etc.

Palavras-chave: Controle de temperatura, Arduino, Educação em Engenharia, Circuitos Eletrônicos, Estudos Práticos.

APLICAÇÃO DE UM SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DE BAIXO CUSTO NO ENSINO PRÁTICO DE ENGENHARIA ELÉTRICA

1 INTRODUÇÃO

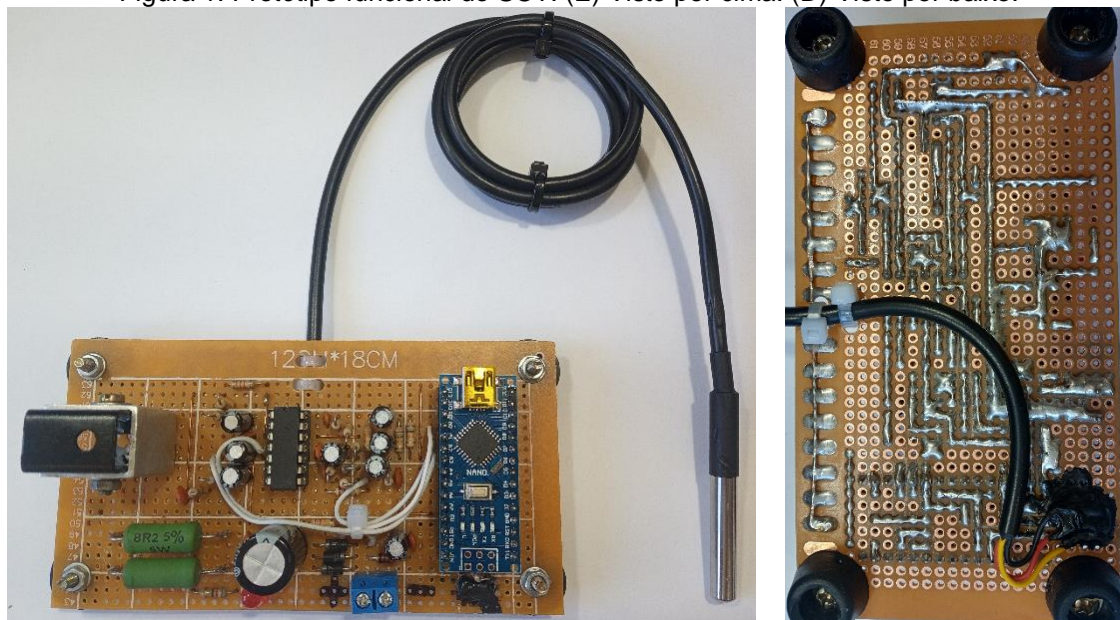
Encontramos nos cursos de ciências exatas, em especial nos cursos de engenharia em geral, a necessidade de capacitar os egressos ao entendimento de fenômenos físicos, químicos, etc., bem como à sua aplicação nos mais diversos setores industriais.

Uma das formas de possibilitar a ponte de ligação entre teoria e prática, além de auxiliar no estudo de conteúdos mais abstratos, tornando-os mais críveis e de mais fácil entendimento, é a utilização de um protótipo que simula ou recria certo fenômeno (VELHO; COSTA; GOULART, 2019). Quando este possui um baixo custo de construção e uma logística facilitada, seu valor educacional cresce ainda mais, visto que o mesmo pode ser facilmente replicado e apresentado, gerando assim, uma melhor capacitação dos discentes, conforme asseveram Lopes; Dalton; Fernandes (2023).

Este trabalho tem por objetivo apresentar um Sistema de Controle de Temperatura (SCT) de montagem simples e barata, de modo que se possa verificar, através de experimentos práticos realizados em sala de aula, conceitos importantes como energia, tempo de atraso, sobressinal (*overshoot*), entre vários outros, que são intrínsecos ao estudo de instrumentação e controle (DORF; BISHOP, 2018). O sistema de controle ainda permite verificar conceitos importantes de outras áreas, quais sejam eletrônicas analógica e digital, sinais e sistemas, programação, entre outras.

Um protótipo funcional do SCT é mostrado na Figura 1. Os transistores se encontram acoplados termicamente a um pequeno dissipador de calor feito de alumínio, onde também fica acoplado termicamente um sensor de temperatura do tipo termistor NTC. Um Arduino Nano realiza o controle da temperatura. O circuito ainda conta com uma sonda de temperatura que permite medir a temperatura ambiente, possibilitando fazer-se a diferenciação entre a temperatura externa (ambiente) e a interna (dissipador de calor).

Figura 1. Protótipo funcional do SCT. (E) Visto por cima. (D) Visto por baixo.



Fonte: Autores.

2 CIRCUITO ELETRÔNICO

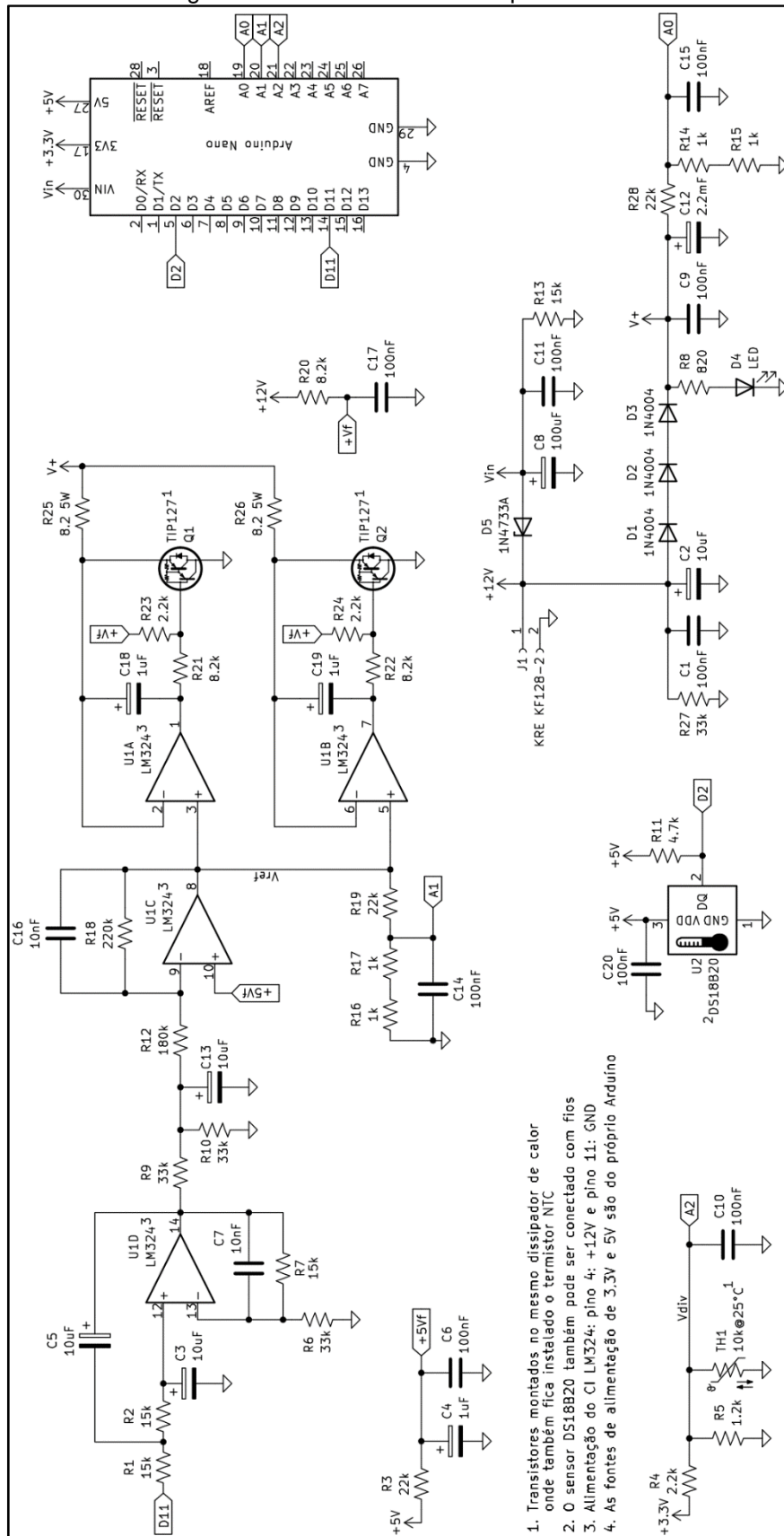
Faz-se necessária uma revisão de conceitos intrínsecos à operação da planta térmica para que seja possível prosseguir com a explicação do sistema de controle de temperatura. Um dos conceitos que será abordado nesta seção é da montagem do circuito com Amplificadores Operacionais (AOs). O circuito completo é mostrado na Figura 2.

O sinal que entra na planta (sinal de controle), vindo da saída digital do Arduino Nano (pino D₁₁), é uma onda retangular do tipo PWM, com frequência de aproximadamente 980 Hz. A faixa de operação segura da planta, que pode alcançar 100 °C, é limitada pela placa Arduino. O sinal PWM passa por um Filtro Passa-Baixas (FPB) ativo de 2ª ordem (R₁, R₂, R₆, R₇, C₃, C₅, C₇ e U_{1D}) (DALE, 1986), que tem o propósito de converter o sinal PWM em um sinal de tensão constante e proporcional à razão cíclica (*Duty Cycle* (DC)) deste, para que possa ser entregue aos transistores, aumentando a estabilidade de operação da planta. Ao sair do AO U_{1D}, o sinal atravessa outro FPB (R₉, R₁₀ e C₁₃), sendo dessa vez um filtro passivo de 1ª ordem (DALE, 1986). Esse filtro também atua como um divisor de tensão que ajusta a amplitude do sinal e o conduz a um amplificador inversor (SEDRA & SMITH, 2007; NILSSON & RIEDEL, 2009) (R₁₂, R₁₈, C₁₆ e U_{1C}), de ganho nominal de 1,2222... Ao atravessar o amplificador inversor, o sinal se torna a tensão de referência V_{ref} aplicada à entrada não inversora do AO U_{1A}, que, por sua vez, alimenta a base do transistor darlington PNP Q₁ (BOYLESTAD & NASHELSKY, 2013). A rede formada por R₂₁, R₂₃ e C₁₈ estabiliza a Fonte de Corrente Controlada por Tensão (FCCT) formada a partir do par U_{1A} e Q₁. A fonte de alimentação V₊, obtida através de três pequenas quedas de tensão consecutivas provocadas pela associação em série dos diodos D₁, D₂ e D₃, ligados à fonte de alimentação +12V, alimenta o resistor de potência R₂₅, uma resistência *shunt* através da qual se pode determinar a corrente de coletor de Q₁ e, a partir disso, também a potência dissipada por Q₁. A corrente imposta pela FCCT surge a partir da diferença de potencial (V₊ – V_{ref}). Logo, a corrente que atravessa R₂₅ e, como consequência, o transistor Q₁, pode ser determinada aproximadamente como $I_c \approx (V_+ - V_{ref})/8,2$. Tal componente, por sua vez, sofre aquecimento de acordo com a potência dissipada $P_{Q1} \approx V_{ref} I_c$. O calor é transferido para o dissipador de calor onde o componente é afixado, facilitado pela ação de algum tipo de pasta térmica — óxido de zinco ou silicone. Em relação ao transistor PNP Q₂, o circuito constituído por ele e por U_{1B}, R₂₂, R₂₄ e C₁₉ é gêmeo àquele da FCCT descrita anteriormente. A rede RC, formada pelo par R₂₀ e C₁₇, é de fundamental importância para a estabilidade de ambas as FCCTs. Sem ela, as FCCTs gêmeas podem apresentar oscilações sustentadas, uma vez que o ganho nominal em Malha Aberta (MA) para baixas frequência resulta elevadíssimo, pois é da ordem de 10⁵ para os AOs e 10³ para os transistores, além do que, ocorrem interações (realimentação) entre as FCCTs através das fontes de alimentação V₊ e +12V.

Cabe mencionar ainda as redes divisoras de tensão (NILSSON & RIEDEL, 2009) utilizadas para atenuar as amplitudes das tensões nas entradas analógicas A₀ e A₁ do Arduino Nano. A entrada A₂, recebe a tensão atenuada V_{div}, advinda de um divisor de tensão que utiliza como entrada a fonte de alimentação de +3,3V do próprio Arduino Nano. É através desta última que o Arduino mede a temperatura do dissipador de calor, produzida pelo par de transistores darlington TIP127, conforme descrito acima. Todas as leituras efetuadas pelo Arduino Nano devem ser calibradas previamente para terem utilidade prática.

A taxa de amostragem e atualização do controlador, cujo código é implementado através do Arduino Nano, é de 2 Hz, mas variações deste valor podem ser admitidas. Contudo, não é necessário elevar muito esta frequência porque a planta apresenta a resposta "lenta" que é característica dos sistemas térmicos, como ficará evidente na próxima seção.

Figura 2. Circuito eletrônico completo do SCT.



1. Transistores montados no mesmo dissipador de calor onde também fica instalado o termistor NTC
2. O sensor DS18B20 também pode ser conectado com fios
3. Alimentação do CI LM324: pino 4: +12V e pino 11: GND
4. As fontes de alimentação de 3.3V e 5V são do próprio Arduino

Fonte: Autores.

3 MODELAGEM DA PLANTA

Para simplificar a descrição matemática da planta, deve-se primeiro obter as Funções de Transferência (FTs) dos seus estágios para que se possa obter uma FT que represente o circuito eletrônico completo em seguida (NILSSON & RIEDEL, 2009; OGATA, 2011; DORF; BISHOP, 2018). O objetivo desta seção é evidenciar as etapas necessárias à construção de um modelo que permita um olhar crítico sobre o controle de temperatura. O FPB ativo de 2ª ordem, seguindo a configuração Sallen-Key (DALE, 1986), pode ser representado aproximadamente pela FT

$$G_1(s) \approx \frac{\frac{K}{R_1 R_2 C_3 C_5}}{s^2 + \left[\frac{1}{R_1 C_3} + \frac{1}{R_2 C_3} + \frac{(1-K)}{R_2 C_5} \right] s + \frac{1}{R_1 R_2 C_3 C_5}}$$

$$\approx \frac{64,64646465}{s^2 + 10,30303030s + 44,44444444} \quad (1)$$

sendo o ganho $K = 1 + (R_7/R_6) = 1,4545\dots$. À frente dele encontra-se o FPB passivo de 1ª ordem, que pode ser descrito aproximadamente através da FT

$$G_2(s) \approx \frac{\frac{1}{R_9 C_{13}}}{s + \left(\frac{R_9 + R_{10}}{R_9 R_{10} C_{13}} \right)} \approx \frac{3,03030303}{s + 6,06060606} \quad (2)$$

após a aplicação dos valores apresentados no circuito (ver Figura 2). O sinal segue então para o amplificador inversor, que pode ser representado através da FT

$$G_3(s) \approx \frac{\frac{-1}{R_{12} C_{16}}}{s + \left(\frac{1}{R_{18} C_{16}} \right)} \approx \frac{-R_{18} R_{12}}{1 + (R_{18} C_{16})s} \approx \frac{-1,22222222}{1 + 0,0022s} \quad (3)$$

após as devidas substituições pelos valores apresentados na Figura 2.

As FCCTs gêmeas, devido à relativamente maior complexidade de modelagem que impõem, e por não se constituir tal modelagem como objetivo principal do presente trabalho, são então modeladas de maneira simplificada como transcondutâncias apenas, tal que

$$G_4(s) \approx -1,165152090449 \quad (4)$$

Portanto, $G_E(s) = G_1(s)G_2(s)G_3(s)G_4(s)$, mas deve-se lembrar de que há outros polos "rápidos" não incluídos na modelagem apresentada e, também, os polos "lentos" do subsistema térmico, ou seja, o conjunto formado pelos transistores TIP127, dissipadores de calor e termistor NTC. Pode-se recorrer à divisão de polinômios para que a ordem de $G_E(s)$ seja reduzida. Em outras palavras, $G_E(s)$ pode ser simplificada, desprezando-se os polos mais "rápidos", de modo a facilitar a análise da planta. Por fim, uma FT que representa simplificada a parte eletrônica da planta é

$$G_{ES}(s) \approx \frac{-1,22222222}{s^3 + 16,3636s^2 + 106,8871s + 269,3603} \quad (5)$$

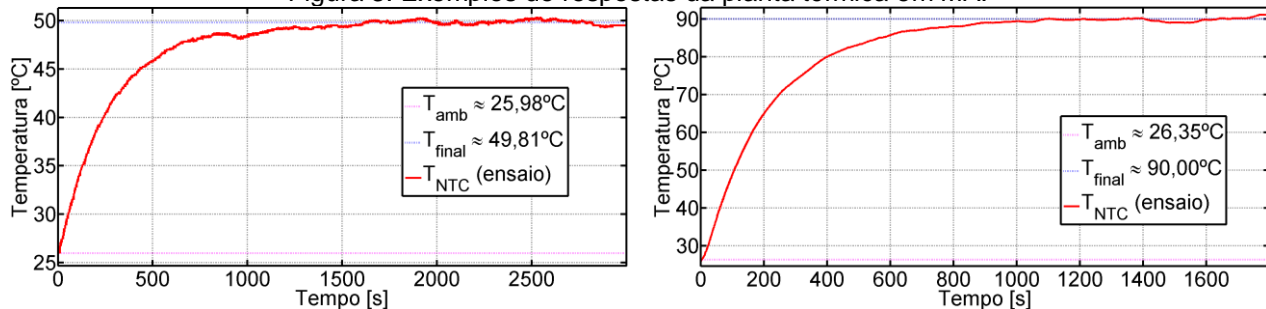
cujos três polos são $s_1 = -0,0606\dots$ e $s_{2,3} \approx -5,1515\dots \pm 4,23158789i$.

Uma FT simplificada, que representa somente a parte térmica da planta, é

$$G_T(s) \approx \frac{T_{NTC}(s)}{I_c(s)} \approx \frac{0,0002358}{s^2 + 0,04904s + 0,0002358} \quad (6)$$

A FT $G_T(s)$ captura os principais fenômenos manifestados no comportamento do sub-sistema térmico (transistores TIP127–dissipadores de calor–termistor NTC). Seus polos são “lentos”, tal que $s_1 \approx -0,0436315295$ e $s_2 \approx -0,0054051246$. Ela foi obtida empiricamente através da análise de curvas de resposta ao degrau em MA, como, por exemplo, aquelas mostradas na Figura 3. Ambas as curvas foram obtidas através da aplicação de sinais de controle constantes, ou seja, DC = 33% (esquerda) e DC = 67% (direita).

Figura 3. Exemplos de respostas da planta térmica em MA.



Fonte: Autores.

Finalmente, $G(s) = T_{NTC}(s)/DC(s) \approx G_T(s)G_{ES}(s)$ é a FT aproximada da planta. Porém, mais uma vez, como os polos de $G_{ES}(s)$ são muito mais “rápidos” que os polos “lentos” de $G_T(s)$, é possível simplificar ainda uma vez mais a FT, obtendo como resultado que a planta seja representada aproximadamente por

$$G_S(s) \approx \frac{T_{NTC}(s)}{DC(s)} \approx \frac{0,0002443}{s^2 + 0,04904s + 0,0002358} \quad (7)$$

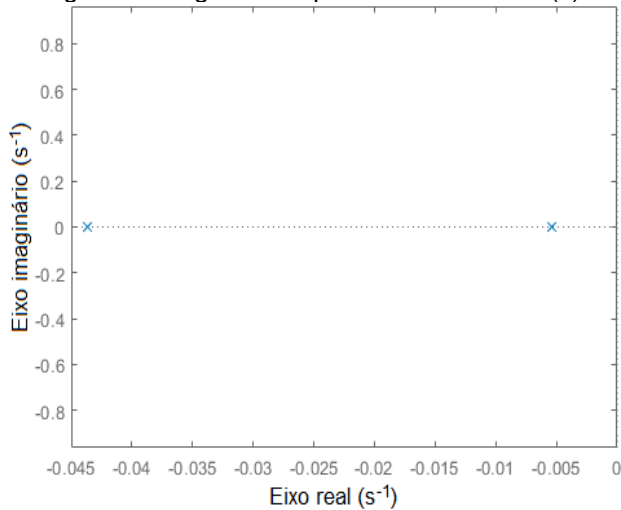
De acordo com o diagrama de polos e zeros mostrado na Figura 4, pode-se verificar imediatamente que $G_S(s)$ é estável e possui um polo real dominante.

4 CONTROLE

A técnica de controle empregada neste trabalho é o controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID). Para a sintonia do controlador PID, pode-se usar o 1º método de Ziegler-Nichols, também conhecido como método da curva de reação, visto que a resposta da planta (em MA) a um sinal de entrada do tipo degrau possui a forma de uma letra “S”, como mostra a Figura 5 (OGATA, 2011; DORF; BISHOP, 2018).

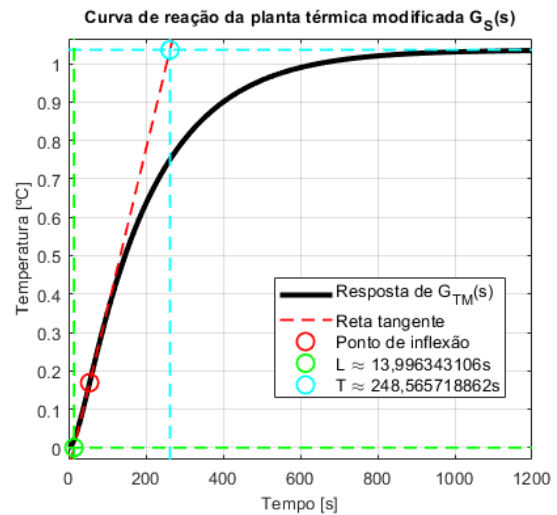
A Figura 5 apresenta o resultado da aplicação do método de sintonia supracitado em relação à FT apresentada em (7). A figura já indica o tempo de atraso L e a constante de tempo T , ambos necessários à determinação do ganho proporcional (K_p) e das constantes

Figura 4. Diagrama de polos e zeros de $G_S(s)$.



Fonte: Autores.

Figura 5. Curva de reação de $G_S(s)$.



Fonte: Autores.

de tempo integral (T_i) e derivativa (T_d), de acordo com a Tabela 1 (OGATA, 2011; DORF; BISHOP, 2018; FRANKLIN, POWELL & EMAMI-NAEINI, 2009).

Tabela 1. Regra de sintonia do controlador PID: 1º método de Ziegler-Nichols.

Controlador	K_p	T_i	T_d
P	T/L	∞	0
PI	$0,9(T/L)$	$L/0,3$	0
PID	$1,2(T/L)$	$2L$	$L/2$

Fonte: Ogata, 2011.

Substituindo os valores de L e T nas expressões mostradas na Tabela 1, como 14 e 249 segundos, respectivamente, obtém-se a seguinte expressão para o controlador PID:

$$PID(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \approx \frac{149,400s^2 + 21,343s + 0,762}{s} \quad (8)$$

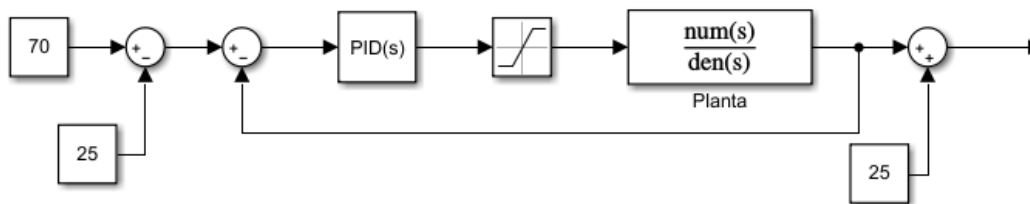
cujo ganho e constantes de tempo são $K_p \approx 21,343$, $T_i = 28$ s e $T_d = 7$ s, respectivamente.

Após uma busca na vizinhança dos valores acima declarados, encontrou-se uma nova sintonia para o PID (OGATA, 2011; DORF; BISHOP, 2018), obtendo-se dessa forma um controle mais fino para a temperatura da planta. Os valores adotados nesse trabalho são $K_p = 18,68$, $T_i = 32$ s e $T_d = 8$ s. A nova FT do PID é

$$PID(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) \approx \frac{149,44s^2 + 18,68s + 0,585}{s} \quad (9)$$

A FT do controlador PID pode ser então inserida no ramo direto do SCT, conforme mostra a Figura 6. É válido ressaltar que para uma simulação mais fiel à realidade, faz-se necessária a inserção de um sinal de saturação que possa retratar os limites observados em componentes reais, ou seja, o sinal de controle (sinal PWM emitido pelo pino D11 do Arduino Nano, conforme descrito na Seção 2) varia somente entre os limites 0% e 100%. Foram utilizados, em uma simulação do SCT em Malha Fechada (MF), os valores 70 °C,

Figura 6. Diagrama de blocos do SCT para simulação em Simulink/MATLAB®.

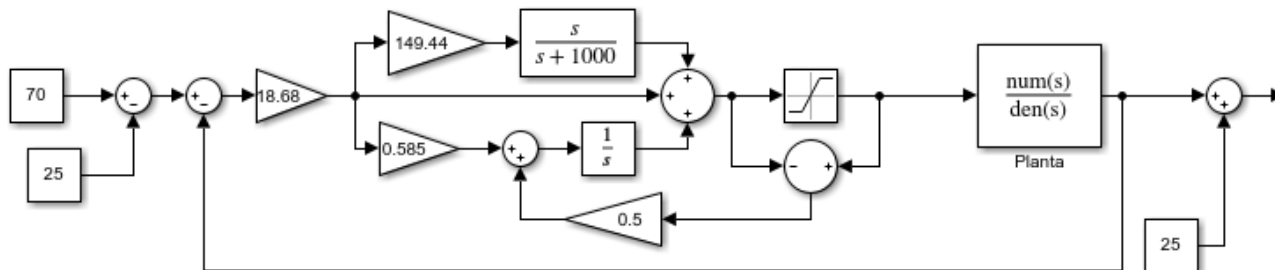


Fonte: Autores.

como sinal de referência de temperatura, e 25 °C, como a temperatura ambiente. O software utilizado na simulação foi o Simulink/MATLAB®.

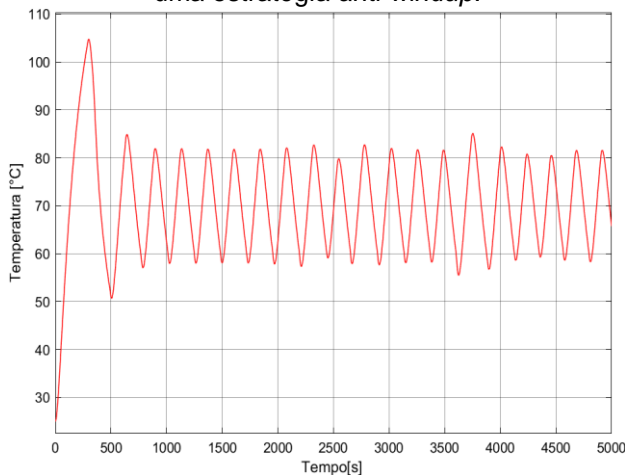
Verificando o sinal de saída obtido na simulação, mostrado na Figura 8, percebe-se que o mesmo possui oscilação com elevada amplitude em torno do valor de referência de temperatura. Uma opção para melhorar essa condição está na utilização de uma estratégia conhecida como *anti-windup*, que paralisa/suspende a função do integrador enquanto o sinal de controle permanece na zona de saturação (SILVA, 2000). Deve-se alterar o diagrama de blocos de modo a atender a inserção do ganho de retorno da estratégia *anti-windup*, conforme mostra a Figura 7. Por fim, a Figura 9 apresenta o sinal de saída de uma nova simulação, desta vez após a utilização da estratégia *anti-windup*. É fácil perceber que a amplitude da oscilação foi drasticamente reduzida, porém sem ocasionar desvio do valor médio do sinal de saída em regime permanente, que permanece idêntico à amplitude do sinal de referência de temperatura em degrau.

Figura 7. Diagrama de blocos do SCT com a inserção da estratégia *anti-windup*.



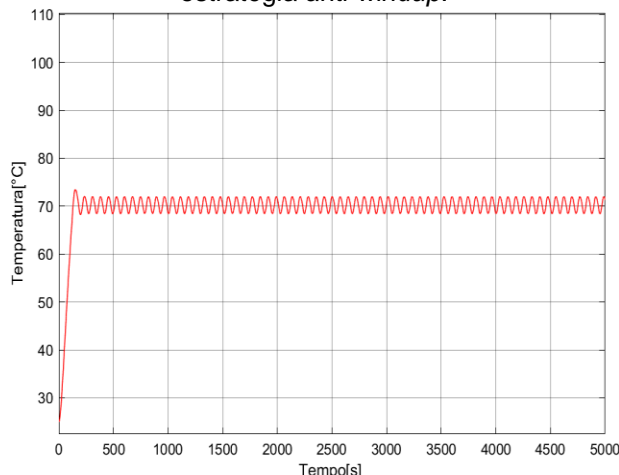
Fonte: Autores.

Figura 8. Saída simulada antes da utilização de uma estratégia *anti-windup*.



Fonte: Autores.

Figura 9. Saída simulada após a utilização de uma estratégia *anti-windup*.



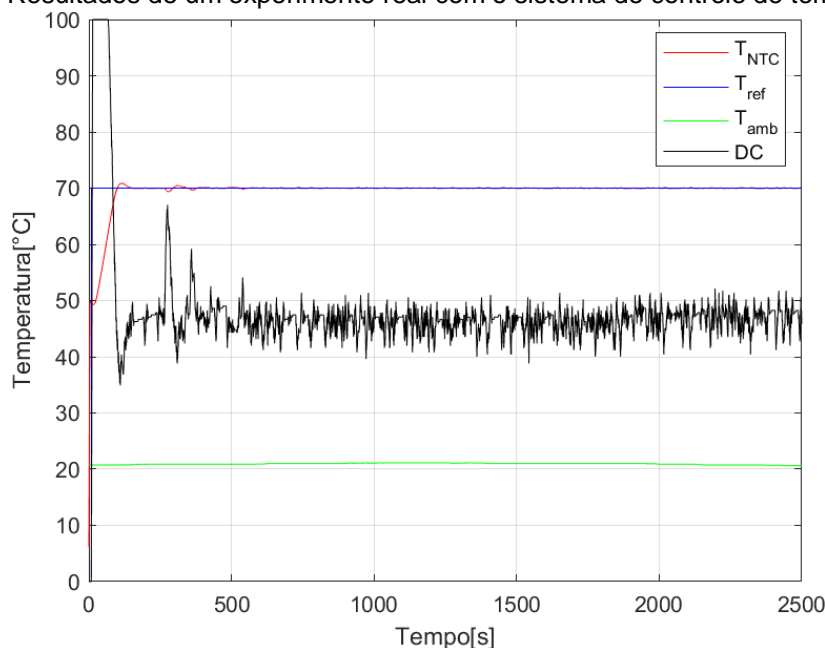
Fonte: Autores.

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Após as simulações do sistema de controle, realizadas via Simulink/MATLAB® (ver Figuras 6 a 9), procede-se à inserção dos ganhos do controlador PID no código a ser gravado no Arduino Nano com o intuito de verificar a operação do SCT real. Resultados de experimentos reais são mostrados nas Figuras 10, 13 e 14.

Os resultados de um experimento real são mostrados na Figura 10. Introduziu-se o valor desejado do sinal de referência de temperatura em degrau na linha de comando da ferramenta *Monitor serial* do Ambiente de Desenvolvimento Integrado (IDE, em inglês) do Arduino e coletou-se os dados apresentados na figura. Percebe-se a elevação do sinal de controle DC (traçado na cor preta), o que acarreta a elevação do sinal de saída, isto é, da temperatura nos dissipadores de calor T_{NTC} (traçado na cor vermelha) até o valor do sinal de referência T_{ref} (traçado na cor azul). Verifica-se também que o sinal de controle diminui na medida que a temperatura se aproxima do valor de referência desejado, isto é, 70 °C.

Figura 10. Resultados de um experimento real com o sistema de controle de temperatura.



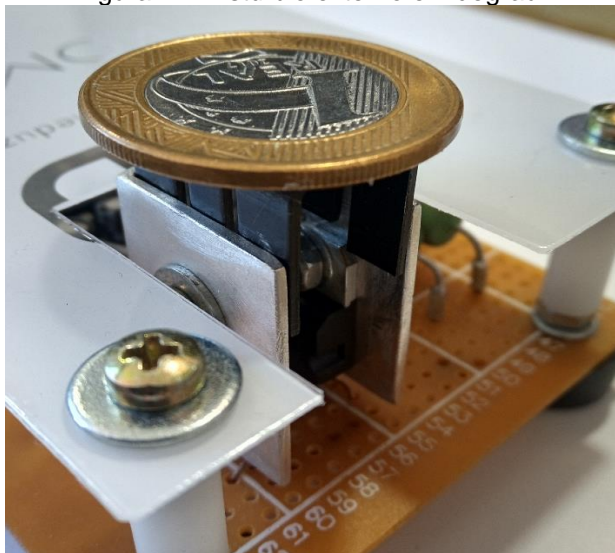
Fonte: Autores.

Distúrbios externos podem ser aplicados na planta de modo a evidenciar o trabalho realizado pelo controlador PID. Neste trabalho, foram aplicados distúrbios em degrau de duas naturezas diferentes: i) contato de uma moeda de R\$ 1,00, armazenada em temperatura ambiente, com o pequeno dissipador de calor preto (ver Figura 1), conforme mostra a Figura 11, e ii) deposição de uma gota d'água, também em temperatura ambiente, sobre o mesmo dissipador de calor, conforme mostra a Figura 12. Ambos os distúrbios foram aplicados separadamente, mas eles poderiam ter sido aplicados simultaneamente. Vale ressaltar que é fundamental ter bastante cuidado ao tentar depositar a gota d'água com o circuito eletrônico em funcionamento — e é exatamente este o intuito de tal experimento prático! — pois a gota não deve ser volumosa o suficiente para não escorrer e, dessa forma, não atingir e prejudicar o funcionamento do circuito eletrônico sob os dissipadores de calor.

Os resultados de experimentos reais, com a inserção dos distúrbios descritos acima, são mostrados nas Figuras 13 e 14. Nesses experimentos, o sinal de referência T_{ref} , perma-

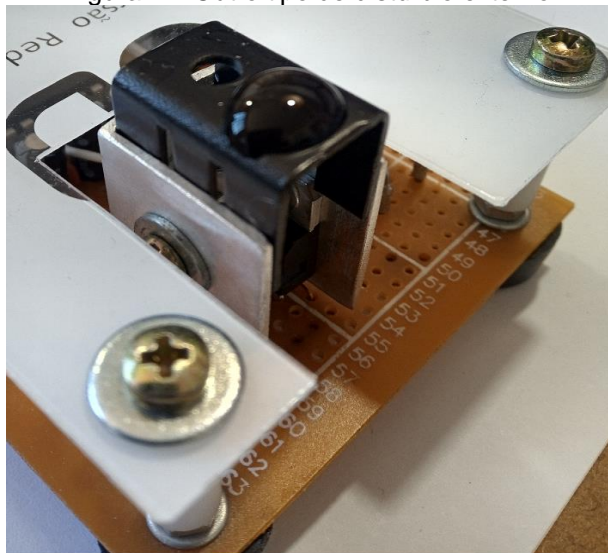
neceu idêntico ao anterior (70 °C). Os testes foram realizados de modo a verificar a reação do sistema de controle em MF. E, conforme está evidente nas figuras, o distúrbio que provocou maior esforço ao PID foi a moeda, visto que sua massa e sua área de dissipação de calor são maiores que aquelas da gota d'água. O distúrbio provocado pela gota d'água desapareceu progressivamente na medida que a água aqueceu e evaporou.

Figura 11. Distúrbio externo em degrau.



Fonte: Autores.

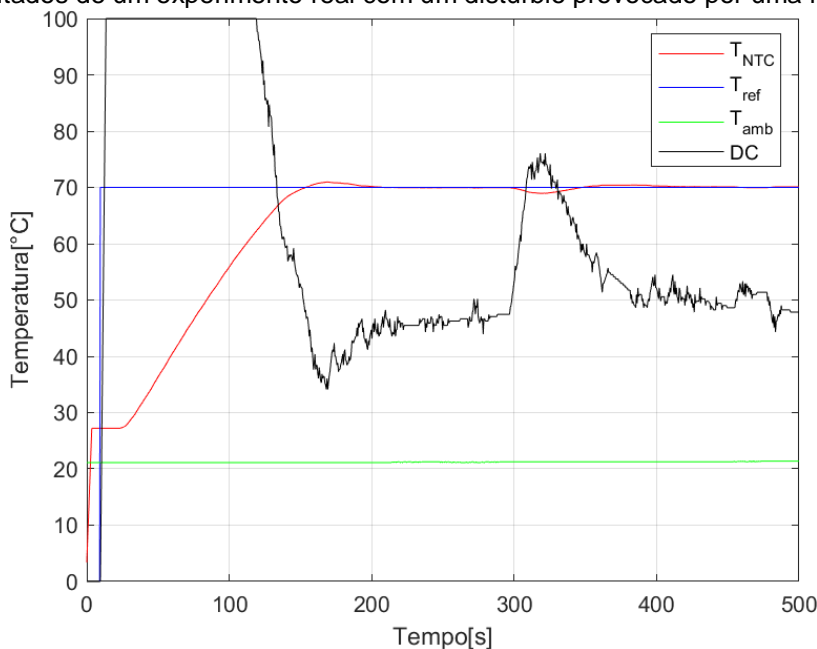
Figura 12. Outro tipo de distúrbio externo.



Fonte: Autores.

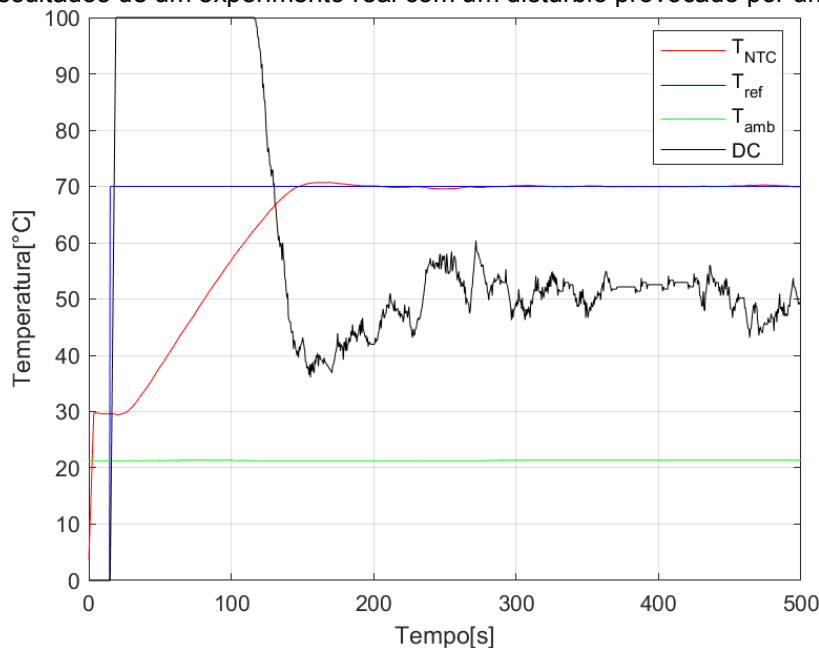
Vale mencionar finalmente que o código gravado no Arduino ainda permite outras formas de operação do sistema de controle de temperatura, como a inserção do nível de sinal DC desejado, referências de temperatura em degraus sucessivos e senoidais, entre outros. Estas formas de operação são abordadas com mais detalhes em Dalton; Lopes; Fernandes (2023).

Figura 13. Resultados de um experimento real com um distúrbio provocado por uma moeda de R\$ 1,00.



Fonte: Autores.

Figura 14. Resultados de um experimento real com um distúrbio provocado por uma gota d'água.



Fonte: Autores.

6 CONCLUSÕES

Este artigo apresentou um sistema de controle de temperatura de baixo custo e de fácil construção e operação. Para operar plenamente, ele requer somente uma fonte de alimentação de 12 V (12 W) e um computador/notebook capaz de executar o IDE do Arduino. E pode ser facilmente replicado tanto por docentes quanto por discentes que possuam algum conhecimento na área de eletrônica. Simples e interativo, ele pode facilitar a compreensão de conceitos teóricos mais abstratos das áreas de controle automático de sistemas dinâmicos, eletrônicas analógica e digital, sinais e sistemas, programação, entre outras.

E, por mais simples que a montagem do SCT possa parecer, ela representa uma grande oportunidade para a abordagem de diferentes assuntos, como os previamente apresentados neste trabalho, além de outros, a saber: programação da placa Arduino Nano, com destaque para a modelagem de sistemas e otimização dos ganhos de controlador através de linguagens de programação/softwares matemáticos; estudo de capacidade térmica e fenômenos ligados ao transporte de calor, entre outros mais.

O SCT ao qual este trabalho se refere foi recentemente montado e apresentado em uma aula expositiva para os alunos da disciplina "Teoria de Controle I" da Universidade Federal de Juiz de Fora, onde os discentes se mostraram interessados e participaram dos ensaios realizados durante a seção. Este por si só representa um grande passo no que tange a inserção de práticas educacionais no ensino de matérias teóricas do curso de Engenharia Elétrica. O SCT deverá passar por mais seções de teste que possam avaliar e quantificar sua eficácia no ensino de disciplinas teóricas, no despertar do interesse por parte dos alunos e seu posterior impacto na formação dos egressos.

Por fim, espera-se que os ensaios apresentados neste trabalho sejam suficientemente motivadores de outros estudos, a fim de despertar o interesse e facilitar ainda mais a compreensão dos discentes. Sugere-se a realização de ensaios práticos com diferentes parâmetros, tais como: diferentes técnicas de controle (compensadores, etc.), outras

sintonias para o controlador PID, sinais de referência diferentes (rampas, exponenciais, etc.), etc.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de expressar sua gratidão ao Eng. Matheus do Sacramento Constantino por sua colaboração no projeto. Ele elaborou o esquema eletrônico (Figura 2) e roteou uma PCI para facilitar a montagem do circuito eletrônico.

REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, Robert L.; NASHELSKY, Louis. **Dispositivos eletrônicos e teoria de circuitos**. 11. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda. 2013.

DALE, David. **Linear circuits applications**. Dallas, EUA: Texas Instruments. 1986.

DALTON, André de A.; LOPES, Bartolomeu H.; FERNANDES, Daniel de A. Sistema de controle de temperatura educacional compacto, portátil e de baixo custo. In: XVII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI), 2023, Manaus. **Anais**. Submetido.

DORF, Richard C.; BISHOP, Robert H. **Sistemas de controle modernos**. 13. ed. Rio de Janeiro: LTC — Livros técnicos e Científicos Editora Ltda. 2018.

FRANKLIN, Gene F.; POWELL, J. David; EMAMI-NAEINI, Abbas. **Feedback control of dynamic systems**. 6. ed. Upper Saddle River, EUA: Pearson Education, Inc. 2009.

LOPES, Bartolomeu H.; DALTON, André de A.; FERNANDES, Daniel de A. A utilização de um sistema de controle de temperatura de fácil construção para ensino prático nas disciplinas de engenharia elétrica. In: 51º Congresso Brasileiro de Educação em Engenharia (COBENGE), 2023, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro.

NILSSON, James W.; RIEDEL, Susan A. **Circuitos elétricos**. 8. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda. 2009.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de controle moderno**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda. 2011.

SEDRA, Adel S.; SMITH, Kenneth C. **Microeletrônica**. 5. ed. São Paulo: Pearson Education do Brasil Ltda. 2007.

SILVA, J. M. G. da. **Wind-up da ação integral**. Disponível em: <http://www.ece.ufrgs.br/~jmgomes/pid/Apostila/apostila/node31.html>. Acesso em: 03 jun. 2023.

VELHO, Léa Maria S.; COSTA, Janaina O. P. da; GOURLART, Fernanda L. Gargalos na formação em engenharia no Brasil: uma perspectiva dos engenheiros. **Revista Tecnologia e Sociedade**, Curitiba, v. 15, n. 35, pp. 1–18, 2019.

APPLICATION OF A LOW COST TEMPERATURE CONTROL SYSTEM IN PRACTICAL ELECTRICAL ENGINEERING TEACHING

Abstract: *Using assemblies that make the teaching of the various areas of Electrical Engineering more attractive and close to students is one of the practical methods that assists teachers in expanding the engagement in the disciplines. However, these can sometimes lead to a high investment of time and money, and are difficult to handle. This work presents a Temperature Control System (TCS) that can be built with materials of low acquisition value and spending little time. It is a prototype that correlates several areas of the development of the Electrical Engineering student, essential for their training. Using a circuit formed by operational amplifiers, two transistors and two temperature sensors, one can make the temperature control of a system simple and easily replicable. With the insertion of an Arduino Nano, a graph of the SCT data is shown in real time, assisting in the practical presentation of abstract concepts such as: measurement disturbance, system power, inversion of input and output signals, etc.*

Keywords: *Temperature Control, Arduino, Engineering Education, Electronical Circuits, Practical Studies.*