

Módulo didático portátil baseado do controle de temperatura de um sensor NTC

Victor Coutinho Vieira Santos* Tito Luís Maia Santos*

* Departamento de Engenharia Elétrica e de Computação (DEEC),
Universidade Federal da Bahia (UFBA), BA, (e-mail:
victor.coutinho@ufba.br, tilsantos@ufba.br).

Abstract: Didactic modules are important to consolidate fundamental concepts as well as to prepare and to develop key abilities required to design and implement closed-loop control techniques. From experimental tests, practical aspects such as noise attenuation, constraints effect mitigation, robustness and non-linearities can be characterized. In this work, the NTC (Negative Coefficient Temperature) temperature control is presented from a low cost perspective in the context of control engineering education. This kind of didactic module can be highlighted due to the combination of low cost and portability with an expressive non-linearity. Hence a brief systematic discussion is presented based on the phenomenological model, the materials and methods, and some experimental results for providing emphasis on ingredients such as the portability, low-cost requirement, and on the non-linear property.

Resumo: Módulos didáticos cumprem um papel importante na consolidação de conceitos fundamentais, bem como na capacitação e no desenvolvimento de habilidades voltadas ao projeto e implementação de técnicas de controle. Em testes experimentais, torna-se possível contextualizar e caracterizar objetivamente aspectos práticos como atenuação de ruído, mitigação do impacto das restrições, robustez e não-linearidades. Neste trabalho, apresenta-se o problema de controle de temperatura de um sensor NTC (*Negative Coefficient Temperature*) na forma de um módulo didático portátil de baixo custo. Este tipo de módulo didático se destaca pela combinação da portabilidade e do baixo custo com uma não-linearidade representativa. Neste sentido, é realizada uma sistematização do modelo fenomenológico, dos materiais e métodos empregados e de alguns resultados experimentais ilustrativos com ênfase na portabilidade, no custo e no efeito da não-linearidade.

Keywords: Didactic module; non-linearity; robustness; measurement systems; engineering education.

Palavras-chaves: Módulo didático; não-linearidade; robustez; sistemas de medição; ensino de engenharia.

1. INTRODUÇÃO

O desenvolvimento de módulos didáticos portáteis voltados para o ensino de sistemas de controle tem despertado o interesse da academia. De acordo com Lima (2007), sempre houve uma preocupação do ser humano em sistematizar a informação, guardando-a para ter a oportunidade de recuperá-la outrora, ou seja, uma preocupação com a organização da informação e do ensino. Mais do que simplesmente transmitir o conhecimento, é recorrente na história da pedagogia a necessidade de se unir teoria e prática, pois conforme FREIRE (1996), ambas se completam. Cabe destacar que Universidades Federais têm vivenciado uma diminuição nos seus orçamentos nos últimos anos (Reis et al., 2022). Neste sentido, o desenvolvimento de kits de baixo custo surge como uma alternativa importante,

tendo em vista a importância da realização de atividades práticas no processo de aprendizagem e a dificuldade para realização de novas compras de módulos educacionais de laboratório no contexto de redução orçamentária. A despeito da realidade local, iniciativas semelhantes vem sendo desenvolvidas em instituições de outros países (Park et al., 2020; de Moura Oliveira et al., 2020; Wang et al., 2021).

Os módulos didáticos têm sido bastante difundidos no ensino de engenharia no Brasil (Amorim et al., 2015; Braga et al., 2008; Lima et al., 2018). Kits experimentais portáteis de baixo custo permitem que os alunos tenham maior flexibilidade na realização de testes experimentais, por evitar a necessidade de utilização de laboratórios especializados. O controle de temperatura de sensores termorresistivos tem sido aplicado a sistemas de medição de diversas grandezas, a exemplo da temperatura ambiente, velocidade de fluido e irradiação solar (Ferreira et al., 2001; Atanasijevic and Mihailovic, 2019; Bandyopadhyay et al., 2015). Os termistores do tipo NTC - do inglês, *Negative Coefficient Temperature* - são caracterizados por uma relação exponencial entre a variação de sua temperatura

* O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001 e do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Projetos 425606/2018-0 e 309675/2018-9.

e o valor de sua resistência associada. Neste sentido, o controle de temperatura de um sensor NTC apresenta um conjunto de propriedades desejadas, a saber: baixo custo, peso reduzido, dimensões reduzidas, baixas tensões envolvidas e não-linearidades consideráveis.

Partindo de um objetivo complementar, considerando trabalhos relacionados recentes (Park et al., 2020; de Moura Oliveira et al., 2020; Wang et al., 2021), será proposto o módulo portátil de um sistema de baixo custo com não-linearidade significativa. A principal contribuição da presente proposta advém da representatividade da não-linearidade presente entre a variável manipulada - corrente do sensor - e a variável controlada - temperatura do sensor. Neste sentido, o módulo didático proposto permite explorar a não-linearidade estática do sensor NTC como objeto de estudo experimental no contexto de um sistema de controle. Desta maneira, alunos e alunas poderão consolidar a compreensão das potencialidades e limitações de técnicas de controle lineares aplicadas ao controle de sistemas não-lineares. Em particular, o presente trabalho está centrado na apresentação do problema de controle de temperatura do sensor NTC para fins didáticos. Um exemplo inicial baseado na sintonia de um controlador PI será apresentado para ilustrar o impacto da não-linearidade na resposta em malha fechada.

O presente trabalho é organizado da seguinte maneira: na Seção 2 é revisto o problema de controle, na Seção 3 são avaliados os materiais e métodos envolvidos, na Seção 4 são apresentados alguns resultados experimentais e na Seção 5 são apontadas algumas conclusões.

2. CONTROLE DE SENSORES NTC

A motivação para a realização de um estudo experimental a partir do controle de temperatura de um sensor NTC pode ser formulada a partir do universo de aplicações em sistemas de medição. Este tipo de sistema de medição tem sido usado, por exemplo, em anemômetros (Atanasijevic and Mihailovic, 2019; Ferreira et al., 2001) e aplicações biomédicas (Cuadras and Casas, 2006; Bandyopadhyay et al., 2015).

A despeito de ser um objeto de estudo com temas consolidados (Steinhart and Hart, 1968), o mesmo ainda tem sido explorado no contexto da pesquisa. O termistor é particularmente interessante devido a sua não-linearidade significativa. Com relação ao interesse acadêmico, apesar de existirem diversos estudos no contexto de sistemas analógicos de medição (Ferreira et al., 2001), há aspectos em aberto no que diz respeito aos sistemas de controle e medição digital (Souza and Santos, 2020; Santos and Santos, 2022). Portanto, o problema de controle de temperatura de um Sensor NTC pode ter uso didático ou acadêmico, mas a sua motivação decorre de um interesse prático que surge nos sistemas de medição realimentados.

2.1 Modelo Fenomenológico

O modelo para controle de um termorresistor NTC pode ser obtido a partir de duas equações fundamentais, a saber: (i) descrição estática e (ii) representação dinâmica. O modelo estático relaciona temperatura e resistência, havendo múltiplas alternativas de representação (Liua et al.,

2018). O modelo à três parâmetros é uma das mais populares. Este será apresentado por atender aos principais objetivos ilustrativos do presente trabalho (Steinhart and Hart, 1968), como segue

$$R_s(t) = R_0 e^{\left(\frac{B}{T_s(t)} - \frac{B}{T_0}\right)}, \quad (1)$$

sendo $T_s(t)$ a temperatura do sensor, $R_s(t)$ o valor da resistência em função da temperatura do sensor e R_0 um parâmetro fixo, definido como a resistência do sensor submetido à temperatura T_0 . Tipicamente os valores das resistências são definidos em Ohms, os valores das temperaturas são determinados em Kelvin e B é uma constante. Alternativamente, a Equação (1) pode ser descrita por

$$R_s(t) = A e^{\frac{B}{T_s(t)}}, \quad (2)$$

sendo A e B constantes, usualmente fornecidas pelo fabricante em unidades de resistência e temperatura respectivamente. Alternativamente, A e B podem ser caracterizados experimentalmente caso não se conheça o *Datasheet* do sensor, o que é comum em elementos de baixo custo disponibilizados na internet.

Além da relação estática, o termistor também possui uma equação dinâmica, relativa às trocas de energia entre o sensor e o meio. Assim, o comportamento dinâmico da temperatura do sensor pode ser representado como segue

$$\alpha SH(t) + P_s(t) = G_{th}(T_s(t) - T_a(t)) + C_{th} \frac{dT_s(t)}{dt}, \quad (3)$$

na qual $T_s(t)$ e $T_a(t)$ representam, respectivamente, a temperatura do sensor e a temperatura ambiente, $P_s(t)$ descreve a potência do sensor, $G_{th}(T_s(t) - T_a(t))$ representa a troca de energia do sensor com o meio, com G_{th} sendo a constante de dissipação, dependente da velocidade do fluido ao qual o sensor está inserido, $\alpha SH(t)$ é a energia incidente por radiação, C_{th} é a capacidade térmica do sensor e $\frac{dT_s(t)}{dt}$ descreve a variação na temperatura do sensor. Neste caso, $P_s(t) = R_s(t)I_s(t)^2$, sendo $I_s(t)$ a corrente que passa pelo sensor.

Neste trabalho, será proposto um módulo didático baseado numa fonte de corrente regulada por comando de tensão. Para fins de controle, a variável manipulada será estabelecida como o valor da corrente que passa pelo sensor NTC. Assim, definindo a saída controlada, $T_s(t) = y(t)$, variável manipulada, $I_s(t) = u(t)$, e o sinal de perturbações, $\omega(t) = \alpha SH(t) + G_{th}T_a(t)$, chega-se ao seguinte modelo fenomenológico:

$$C_{th} \frac{dy(t)}{dt} = -G_{th}y(t) + R_s(t)u(t)^2 + \omega(t). \quad (4)$$

Alternativamente, verifica-se

$$\frac{dy(t)}{dt} = -\frac{G_{th}}{C_{th}}y(t) + \frac{A}{C_{th}}e^{\frac{B}{y(t)}}u(t)^2 + \frac{1}{C_{th}}\omega(t). \quad (5)$$

Nesta representação, pode-se notar o papel da não-linearidade causada pela parcela $\frac{A}{C_{th}}e^{\frac{B}{y(t)}}u(t)^2$, sendo esta uma das principais características do módulo didático em discussão no presente trabalho.

2.2 Modelos linearizados

O projeto de controladores lineares pode ser realizado para operar em torno de um ponto de operação por

meio da abordagem baseada em linearização. Assim, é possível utilizar a Eq. (5) diretamente para fins de obtenção de um modelo não-linear. No entanto, o conhecimento de várias informações do *Datasheet* do fabricante do sensor se faz necessário para estabelecer as constantes C_{th} , G_{th} , A e B . Com vistas a utilizar sensores do tipo NTC sem a necessidade da informação do *Datasheet*, propõe-se utilizar diretamente métodos de identificação baseados em resposta ao degrau.

O módulo didático proposto possui flexibilidade no que diz respeito ao nível de não-linearidade. Uma realimentação linearizante parcial pode ser aplicada tal que $v(t) = I_s^2(t)$ torna-se um sinal de controle virtual como implementado em trabalhos recentes (Souza and Santos, 2020). Neste caso, o modelo não-linear é dado por

$$\frac{dy(t)}{dt} = -\frac{G_{th}}{C_{th}}y(t) + \frac{A}{C_{th}}e^{\frac{B}{y(t)}}v(t) + \frac{1}{C_{th}}\omega(t), \quad (6)$$

sendo $v(t)$ definido por um controlador e $I_s(t) = \sqrt{v(t)}$ a variável manipulada efetivamente aplicada. Assumindo uma relação nominal entrada-saída em torno de um ponto de operação sem perturbações, a função de transferência de $V(s)$ para $Y(s)$ é dada aproximadamente por

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K_u^{\bar{y}}}{\tau_u^{\bar{y}}s + 1}, \quad (7)$$

sendo $K_u^{\bar{y}}$ e $\tau_u^{\bar{y}}$ estimados em torno de um equilíbrio \bar{y} . Alternativamente,

$$\frac{Y(s)}{V(s)} = \frac{K_v^{\bar{y}}}{\tau_v^{\bar{y}}s + 1} \quad (8)$$

sendo $K_v^{\bar{y}}$ e $\tau_v^{\bar{y}}$ estimados em torno de um equilíbrio \bar{y} . As variações de $K_u^{\bar{y}}$ são mais sensíveis ao ponto de equilíbrio do que as observadas com $K_v^{\bar{y}}$ devido ao efeito da realimentação linearizante parcial. Aqui, cabe ao professor selecionar qual a natureza do problema que se pretende trabalhar. No modelo de $v(t) = I_s(t)^2$ para $y(t) = T_s(t)$, a fonte de não-linearidade concentra-se em $R_s(t) = e^{B/T_s(t)}$, o que simplifica a explicação do fenômeno. Caso a opção seja por um modelo de $u(t) = I_s(t)$ para $y(t) = T_s(t)$, o efeito quadrático eleva o nível de não-linearidade, pois $P(t) = e^{B/y(t)}u(t)^2$, permitindo ressaltar ainda mais o efeito da escolha do ponto de equilíbrio. Portanto, esta flexibilidade é uma das características didáticas particularmente interessante do kit experimental apresentado.

2.3 Controlador proposto

O módulo proposto permite avaliar controladores lineares baseados em modelos linearizados e controladores robustos, bem como controladores baseados em escalonamento de ganhos. Neste sentido, há uma ampla gama de oportunidades. Considerando o modelo identificado e os objetivos do presente trabalho, será utilizado um controlador Proporcional Integral (PI) para fins ilustrativos, o qual atende a diversos requisitos de projeto. Há de se ressaltar que um controlador PI possibilita a alocação total de polos de malha fechada de um modelo de primeira ordem. Assim, considera-se

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s}, \quad (9)$$

sendo K_p e K_i os ganhos do controlador. Nesta etapa do projeto, torna-se possível discutir sobre métodos de sintonia, requisitos de controle, efeito de polos e zeros,

filtro de referência, transferência sem salto e, a depender dos elementos do módulo didático, falar sobre saturação e ação *anti-windup*. O controlador pode ser discretizado usando técnicas convencionais, a exemplo da aproximação pelo método de Tustin, ou, pode ser projetado diretamente em tempo discreto.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O kit experimental é controlado por meio de uma lei de controle PI implementada na forma de equação de diferença em um processador de um Arduino UNO. Do ponto de vista físico, o sistema é composto por: (i) uma etapa de filtragem analógica, para eliminar as componentes de alta frequência do sinal PWM, aproximando o sinal de controle de um comando analógico teórico (sem modulação PWM); (ii) um circuito principal responsável pela implementação da fonte de corrente e (iii) a etapa de medição com um circuito seguidor (*buffer*) para diminuir a interferência da resistência do sensor com a impedância de entrada do Arduino, melhorando a qualidade da medida de tensão do NTC. Cabe destacar que a etapa de filtragem do sinal PWM não se faz necessária caso se utilize microcontroladores, Arduinos ou placas de aquisição de dados que contam com saída analógicas. A resistência do NTC é obtida por $V_s(t)/I_s(t)$, sendo $V_s(t)$ a tensão medida e $I_s(t)$ a corrente imposta. A relação $T_s(t) = B/[\log(R_s(t)/A)]$ é usada para obter $T_s(t)$. Assim, A e B devem ser constantes conhecidas ou caracterizadas experimentalmente. A integração das etapas é ilustrada na Figura 1.

Com vistas a aumentar a portabilidade e devido às baixas potências envolvidas, optou-se por alimentar os Amplificadores Operacionais (AMPOPS) com baterias de 9V. Assim, para a montagem do módulo didático, utiliza-se a seguinte lista de componentes:

- Protoboard (ou placa de fenolite)
- CI LM324N
- 2 baterias 9V
- 2 conectores para baterias 9V
- 16 jumpers
- 2 resistores de 10kΩ
- 1 resistor de 1,65kΩ
- 1 resistor de 1,5kΩ
- 1 capacitor de 330μF
- Arduino UNO
- Cabo USB tipo A/B

A escolha do CI LM324N, se deu pelo uso de 4 amplificadores operacionais no projeto. Para o uso com o termorresistor, para filtrar o sinal do Arduino, para inverter o sinal entrada no primeiro AMPOP e para medir o sinal de saída.

O custo total dos componentes é de aproximadamente R\$ 50, a depender da loja em que se faça a compra. O componente mais caro é o microcontrolador com o cabo A/B, que em versões iguais ou semelhantes pode variar de aproximadamente 23 reais até 140 reais. Os resistores, capacitores e *jumpers* tem seus custos individuais inferiores a 1 real, somando cerca de 6 reais. O CI LM324N e os conectores de bateria 9V podem ser encontrados por até 2 reais cada um. A *protoboard* varia de 5 a 10 reais e a bateria de 9V tem valores diversos ao depender da marca,

mas podem ser encontradas por 5 reais a unidade. Uma imagem do kit montado propositalmente em *Protoboard* é apresentado na Figura 2. Aqui assume-se que há um computador ou notebook disponível para realização do tratamento de dados, programação do Arduino e acompanhamento dos experimentos. Esses valores devem ser lidos à luz do período de submissão de artigos do Congresso Brasileiro de Automática 2022, tendo o papel de ilustrar uma expectativa de custo.

3.1 Filtro passa-baixas com AMPOP na configuração seguidor de tensão

Para definição do sinal de controle, foi implementado um filtro RC simples passa-baixas para atenuar as altas frequências do sinal PWM, reduzindo a percepção de uma resposta contaminada com ruído. Assim, o sinal PWM se aproxima de um comando analógico teórico. Além disso, com vistas a isolar as impedâncias de entrada e saída do sinal filtrado, foi necessário utilizar um AMPOP na configuração seguidor de tensão, para que o circuito seguinte não alterasse as propriedades do filtro.

A frequência do sinal PWM no pino utilizado do Arduino (pino 3) é de 490Hz, dessa forma, escolhemos um resistor de 1500Ω e um capacitor de $330\mu\text{F}$, que atenua o sinal e possui constante de tempo ($\tau = R \times C$) de 0,495 segundos (mais de 100 vezes o período do sinal PWM). A constante de tempo não foi arbitrariamente aumentada pois seu valor deve ser inferior a constante de tempo do termistor em malha aberta, que é estimada entre 6 a 15 segundos (depende do NTC), para não afetar a dinâmica dominante do processo. Essa escolha do filtro RC permitiu um isolamento entre os estágios, proporcionando o resultado esperado. Não obstante, outras configurações de filtros passa-baixa podem ser utilizadas sem prejuízo ou perda de generalidade.

3.2 AMPOP na configuração inversora de tensão

O Arduino UNO é utilizado para medir valores positivos de tensão, e, como a saída do AMPOP com a medida final do sensor está na configuração inversora, o sinal a ser medido tem uma tensão abaixo da referência do Arduino. Após mudanças na topologia da ligação do microcontrolador com o circuito, a solução escolhida foi introduzir um novo amplificador operacional com o objetivo de inverter o sinal de tensão que chegava do filtro, antes de ir para o AMPOP principal, fazendo com que a sua saída esteja acima da referência do Arduino.

3.3 AMPOP na configuração seguidor de tensão

Conforme brevemente discutido anteriormente, o circuito seguidor cumpre o papel de separar as impedâncias de saída do sensor NTC da impedância de entrada do Arduino. Nos testes realizados, este circuito cumpriu um papel importante na melhoria da qualidade do sinal medido. Assim, recomenda-se a manutenção deste elemento sem qualquer prejuízo no que diz respeito ao custo do módulo didático.

Após a medição, utiliza-se um filtro de tempo discreto de primeira ordem implementado no Arduino com o

objetivo de mitigar o efeito de ruído em malha fechada sem comprometer o efeito da constante de tempo dominante.

3.4 Sintonia do controlador

Para o projeto, definiu-se o uso de um controlador proporcional-integral (PI), pois este atende aos principais requisitos didáticos de ilustrar o impacto da não-linearidade em função do ponto de operação. Além disso, o PI permite alocação total dos polos de malha fechada tendo em vista o modelo de primeira ordem. Não obstante, outras técnicas de controle, como realimentação linearizante e controle por escalonamento de ganhos, podem ser exploradas com o kit experimental apresentado.

Foi realizado um teste de resposta ao degrau conforme ilustrado na Figura 3. Conforme esperado, não há atraso perceptível neste problema. Optou-se por utilizar um modelo médio de primeira ordem sem atraso no qual se calcula a média entre os valores de subida e descida dos ganhos e das constantes. Os ganhos foram calculados a partir da relação entre a variação em regime permanente da temperatura do sensor pela variação da corrente. As constantes de tempo foram aproximadas pelo intervalo de tempo que a variação da resposta atinge 63,2%. Não obstante, outros métodos podem ser utilizados no contexto de ensino de identificação, sendo a esta escolha meramente ilustrativa. O modelo médio obtido de $u(t)$ para $y(t)$ é dado por

$$G(s) = \frac{3,124}{13,5 \cdot s + 1}. \quad (10)$$

Caso o modelo fenomenológico venha a ser considerado, a constante de tempo do modelo linearizado é dada pela expressão $\tau_{\bar{y}} = \left[\frac{G_{th}}{C_{th}} + \frac{AB(e^{B/\bar{y}})\bar{u}^2}{C_{th}\bar{y}^2} \right]^{-1}$ e o ganho pode ser obtido através da equação $K_{\bar{y}} = 2\tau_{\bar{y}} \frac{A}{C_{th}} (e^{B/\bar{y}})\bar{u}$.

Partindo da função de transferência de malha aberta do termistor, utilizou-se o projeto baseado em lugar das raízes combinado com o conceito de dominância modal. Neste projeto, o zero do controlador será alocado próximo ao polo de malha aberta. A título ilustrativo, o gráfico do lugar das raízes é indicado na Figura 4.

Neste problema, devido a configuração do lugar das raízes, os critérios de tempo de acomodação para o modelo linearizado podem ser atendidos através da definição dos ganhos k_p e k_i . Cabe destacar que não há um problema específico para definição de tempo de acomodação e sobressinal. Aqui há margem para gerar ou induzir uma avaliação crítica dos alunos e alunas a respeito do papel dos requisitos de resposta transitória. Considerando $\tau = 13,5$, definiu-se $k_i/k_p = 1,05/\tau$ com o intuito de alocar o zero de malha aberta do controlador à esquerda do polo de malha aberta (folga de 5% do valor do polo). Assim, o zero do controlador PI já foi arbitrado previamente. Num segundo momento o ganho proporcional foi obtido via lugar das raízes tal que o polo mais lento de malha fechada fique alocado na posição 20% a esquerda do polo de malha aberta no caso nominal. Essa sintonia mitiga significativamente o sobressinal causado pelo zero na região de dominância, facilitando a discussão sobre o comportamento em pontos de operações distintos. Os ganhos proporcional e integral do problema em questão são dados por $k_p = 0,514$ e $k_i = 0,04$, mas estes valores dependem dos requisitos e

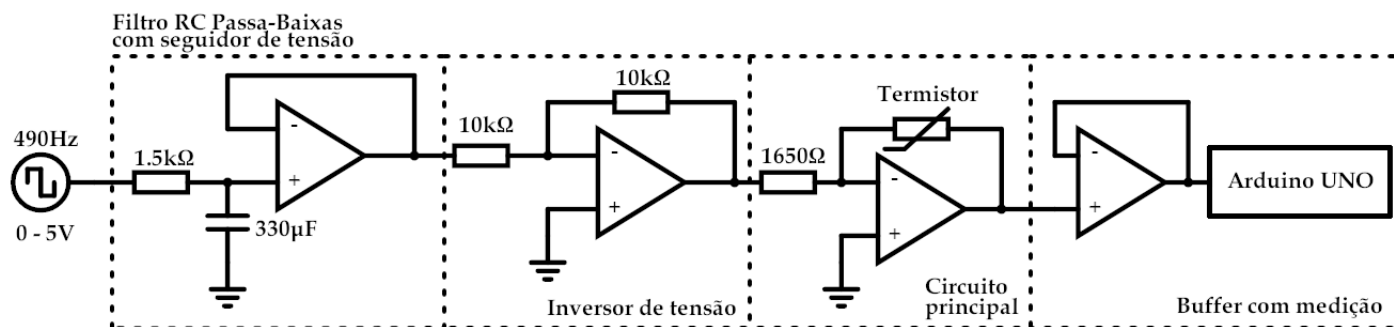


Figura 1. Esquemático do circuito utilizado para o kit didático

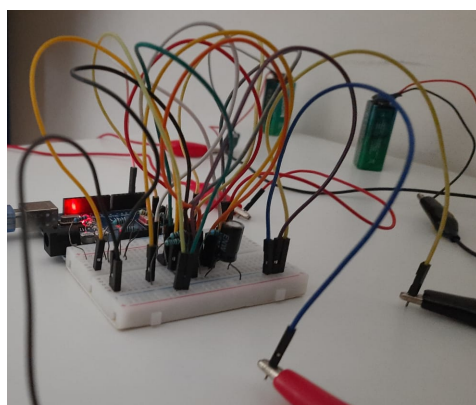


Figura 2. Imagem do kit didático montado em Protoboard.

dos elementos envolvidos no módulo experimental. Esta sintonia tem um papel ilustrativo, mas o leque de oportunidades é mais amplo, indo além do escopo da apresentação realizada no presente trabalho.

Com a função do controlador com o ganho projetada em um sistema contínuo, foi utilizada a discretização pelo método de Tustin e um tempo de amostragem de 0,5 segundos, gerando a seguinte função de transferência em tempo discreto

$$C(z) = \frac{0,5243z - 0,5043}{z - 1}. \quad (11)$$

4. UM CASO ILUSTRATIVO

Nesta seção são apresentados resultados experimentais com o objetivo de ilustrar o efeito da não-linearidade em malha fechada. Para minimizar o efeito de perturbações externas, o kit foi coberto durante os experimentos. Uma sequência de mudanças de referência e seu respectivo efeito na ação de controle serão apresentados na Figura 5. Pode-se observar que o sistema de controle de temperatura alcança o objetivo de seguimento de referência devido ao efeito da ação integral do controlador PI. Os valores das constantes do termorresistor são dadas por $A = 0,005289681 \Omega$ e $B = 3950 K$. A corrente é limitada por $u_{min} \leq u(t) \leq u_{max}$ com $u_{min} = 0,37 mA$ e $u_{max} = 3,04 mA$ como decorrência da fonte de corrente controlada por tensão. Nesta fonte, tensões entre 0,6 V e 5 V são mapeados por correntes entre $0,6/R_{in} A$ e $5/R_{in} A$, sendo $R_{in} = 1644\Omega$.

O efeito da não-linearidade se manifesta no tempo de resposta em malha fechada em função do ponto de equilíbrio. Maiores valores de temperatura implicam em menores valores de resistência, o que reduz o ganho de malha aberta. Isto ocorre na medida que a mesma variação de corrente com maiores valores de temperatura (menores valores de resistência) implicarão numa menor variação de potência e menor variação de temperatura, por consequência. Menores ganhos em malha aberta implicam em polos mais lentos em malha fechada no problema em questão. Este efeito pode ser observado na diferença do seguimento de referência numa mudança de 34 para 36 graus Celsius se comparada à mudança de 36 graus para 34 graus Celsius. Esse mesmo impacto pode ser analisado por meio do sinal de controle indicado pela corrente do sensor. Portanto, o módulo didático portátil e de baixo custo proposto se diferencia pela presença de uma não-linearidade estática efetivamente visível, a qual pode ser explorada por métodos de identificação do tipo resposta ao degrau ou via discussão baseada no modelo fenomenológico.

Outro ponto relevante, que pode ser explorado, decorre da propriedade da atenuação de ruído em malha fechada. O efeito do ruído em malha aberta é perceptível na Fig. 3 como esperado num sistema de controle real sem realimentação. No entanto, o seu efeito em malha fechada pode ser significativamente atenuado em função do projeto do controlador em malha fechada. A variância de um conjuntos de dados pode ser explorada para quantificar esse tipo de benefício das técnicas de controle em malha fechada.

O universo complementar de possibilidades é amplo. Pode-se forçar a saturação da ação de controle para ocasionar o efeito *windup* em comparação com estratégias *anti-windup*. Técnicas de transferência do modo manual para o modo automático com salto e sem salto também podem ser exploradas a partir do controlador PI. Técnicas de controle baseadas em realimentação linearizante e ganho escalonado podem ser exploradas em comparação com controladores lineares em decorrência do grau de não-linearidade do módulo didático. Em outras palavras, os resultados apresentados servem apenas para ilustrar uma das diversas possibilidades do módulo em discussão.

5. CONCLUSÃO

Neste artigo foi proposto um kit experimental portátil de baixo custo baseado no controle de temperatura

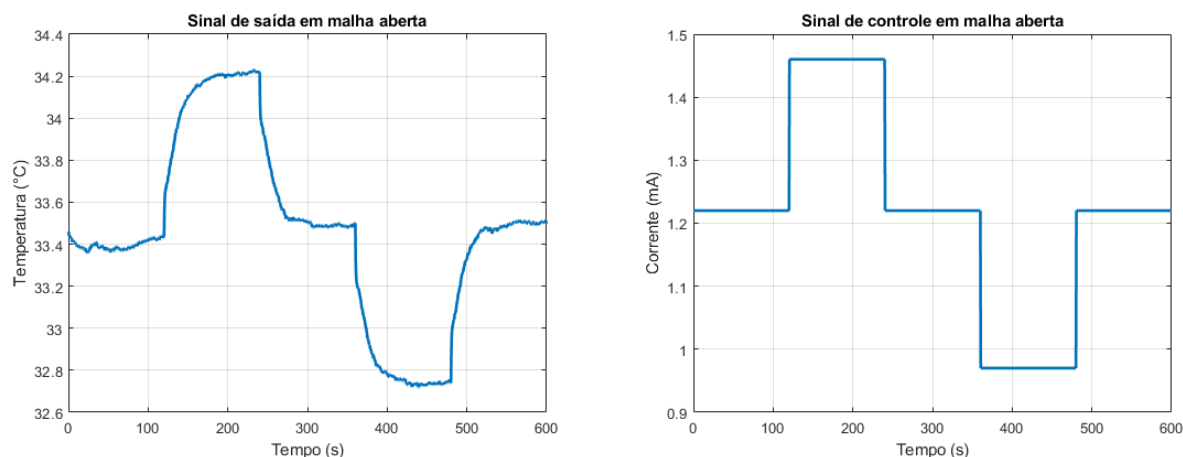


Figura 3. Temperatura e corrente do sensor obtidos por meio de testes de malha aberta.

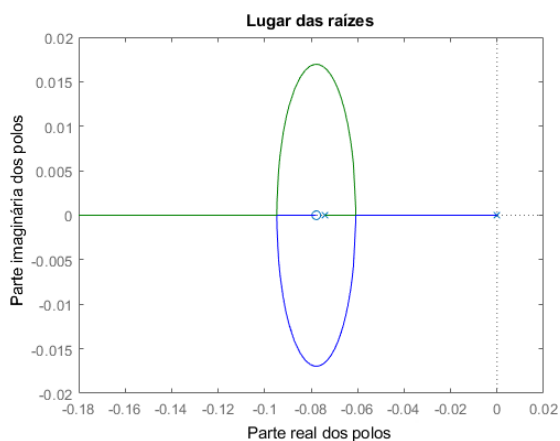


Figura 4. Gráfico do lugar das raízes considerando o modelo e o controlador com ganho proporcional a ser definido.

de um sensor NTC voltado ao ensino de engenharia de controle na forma de módulo didático. A principal contribuição do kit proposto decorre da combinação da portabilidade e do baixo custo com uma dinâmica não-linear significativa. Os elementos constitutivos do kit, uma discussão sobre expectativa de custo, o modelo fenomenológico e o problema de controle foram tratados de maneira resumida e sistematizada. O problema de controle é apresentado para fins educacionais, mas o mesmo pode ser utilizado no contexto de validação de resultados de pesquisa. Para facilitar a reprodução do mesmo, é disponibilizado o código do algoritmo de controle para Arduino¹. O kit pode ser montado diretamente em *Protoboard* ou implementado numa placa de circuito impresso. Com este tipo de módulo experimental, é possível contextualizar a importância dos controladores baseados em modelos linearizados para fins de implementação de sistemas de controle realimentados com comportamento dinâmico não-linear. A sistematização do modelo fenomenológico, das etapas que compõem o módulo didático, da implementação do algoritmo de controle em Arduino e possíveis resultados experimentais no contexto de sistemas de controle é o problema motivador do presente trabalho. Entre as inúmeras possibilidades de

¹ <https://github.com/ViktorCVS/ControleNTC>

trabalhos futuros, há de se destacar as seguintes propostas: (i) aprofundamento das possibilidades pedagógicas no contexto de diversificação de experimentos, saberes a serem trabalhados e capacitações a serem desenvolvidas e (ii) avaliação a respeito do impacto da utilização dos kits em laboratórios com supervisão em comparação com a utilização dos kits de pelos discentes de forma autônoma e sem supervisão.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) - Projetos 425606/2018-0 e 309675/2018-9 e do Programa de Bolsas de Iniciação Científica - PIBIC/UFBA. Victor C.V. Santos é bolsista PIBIC/UFBA-CNPq.

REFERÊNCIAS

- Amorim, H.D., Dias, M., and Soares, V. (2015). Sensores digitais de temperatura com tecnologia one-wire: um exemplo de aplicação didática na área de condução térmica. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 37(4), 4310.
- Atanasijevic, P. and Mihailovic, P. (2019). Temperature compensation of ntc thermistors based anemometer. *Sensors and Actuators A: Physical*, 285, 210–215.
- Bandyopadhyay, S., Das, A., Mukherjee, A., Dey, D., Bhat-tacharyya, B., and Munshi, S. (2015). A linearization scheme for thermistor-based sensing in biomedical studies. *IEEE Sensors Journal*, 16(3), 603–609.
- Braga, A., Passos, L., Jr, C., and Polito Braga, C. (2008). Projeto e implementação de um módulo didático para abordagem integrada de instrumentação, controle e automação. In *XVII Congresso Brasileiro de Automática*. CBA.
- Cuadras, A. and Casas, O. (2006). Determination of heart rate using a high-resolution temperature measurement. *IEEE Sensors Journal*, 6(3), 836–843.
- de Moura Oliveira, P., Hedengren, J.D., and Rossiter, J. (2020). Introducing digital controllers to undergraduate students using the tclab arduino kit. *IFAC-PapersOnLine*, 53(2), 17524–17529.

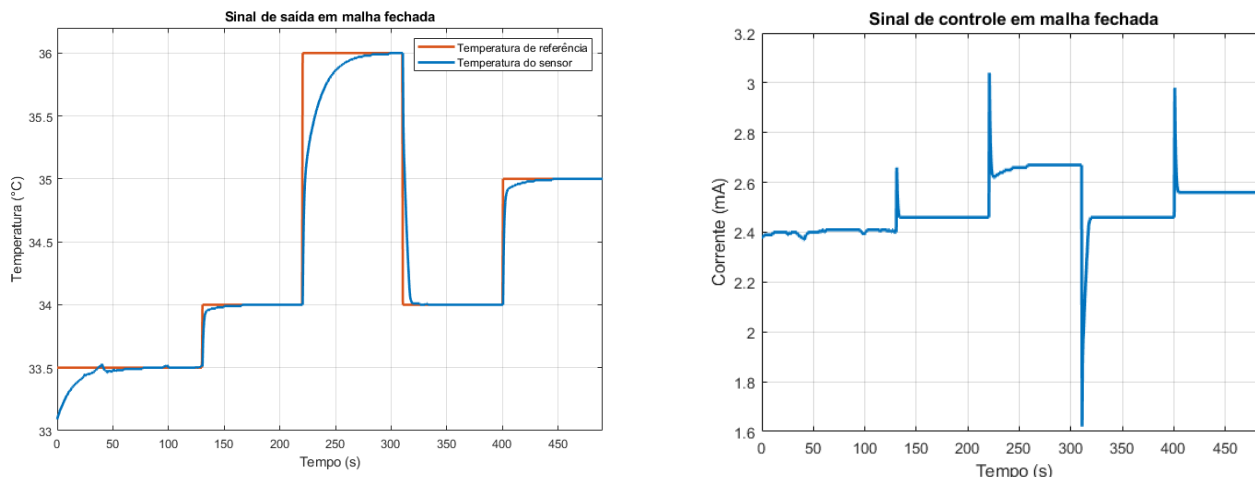


Figura 5. Temperatura e corrente do sensor obtidos por meio de testes de malha fechada.

- Ferreira, R., Freire, R., Deep, C., de Rocha Neto, J., and Oliveira, A. (2001). Hot-wire anemometer with temperature compensation using only one sensor. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 50(4), 954–958.
- FREIRE, P. (1996). *Pedagogia da autonomia*. Paz e Terra, São Paulo.
- Lima, A., Barros, P., and Acioli Junior, G. (2018). Módulo didático para ensino de teoria de controle. In *XXII Congresso Brasileiro de Automática*. CBA.
- Lima, G. (2007). A transmissão do conhecimento através do tempo: da tradição oral ao hipertexto. *Revista Interamericana de Bibliotecología*, 30, 67–85.
- Liua, G., Guoa, L., Liua, C., and Wu, Q. (2018). Evaluation of different calibration equations for ntc thermistor applied to high-precision temperature measurement. *Measurement*, 120, 21–27.
- Park, J., Martin, R.A., Kelly, J.D., and Hedengren, J.D. (2020). Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control. *Computers & Chemical Engineering*, 135, 106736.
- Reis, B., Cardoso, G., and Adamczyk, W. (2022). Financiamento de instituições públicas de ensino superior: análise exploratória do orçamento e gastos federais. Technical report, Escola Nacional de Administração Pública - Universidade de Brasília - Março-2022. URL <http://repositorio.enap.gov.br/handle/1/7053>.
- Santos, V.C.V. and Santos, T.L.M. (2022). On the variance propagation of thermistor-based measurements with a digital temperature controller. *Measurement*, 110863.
- Souza, E.L.d.J. and Santos, T.L. (2020). Transient compensation for thermistor-based sensors in constant temperature configuration. *Sensors and Actuators A: Physical*, 305, 111920.
- Steinhart, J. and Hart, S. (1968). Calibration curves for thermistors. *Deep-Sea Research*, 15, 497–503.
- Wang, S., Zhang, F., Tang, Q., Zhang, X., and Zhao, R. (2021). A take-home motor control teaching experiment platform for control engineering-related courses. *IEEE Transactions on Education*, 65(2), 115–123.