

## CONTROLE DE TEMPERATURA DE UM FORNO ELÉTRICO A RESISTÊNCIA UTILIZANDO O MICROCONTROLADOR ARDUINO

Lukas Valongo Kunieda – [lukasvalongo@gmail.com](mailto:lukasvalongo@gmail.com)  
Paloma Wietky Garcia – [paloma-wietky@hotmail.com](mailto:paloma-wietky@hotmail.com)  
Heloi Francisco Gentil Genari – [heloi.genari@ufabc.edu.br](mailto:heloi.genari@ufabc.edu.br)  
Denise Consonni – [denise.consonni@ufabc.edu.br](mailto:denise.consonni@ufabc.edu.br)  
Universidade Federal do ABC  
Av. dos Estados, 5001  
CEP 09210580 – Santo André – SP

**Resumo:** Os fornos elétricos são utilizados em grande escala na indústria, sendo o controle preciso de temperatura um requisito fundamental para manter a qualidade do produto final, pois a temperatura interfere diretamente nas propriedades dos materiais. Nesse contexto, esse artigo investiga o processo de controle de temperatura em um protótipo de um forno de resistência construído para aplicação acadêmica, visando principalmente a integração de habilidades adquiridas no curso de graduação em engenharia, nos temas relacionados a eletrônica de potência, circuitos elétricos, instrumentação, identificação de sistemas lineares, controle de sistemas dinâmicos e sistemas embarcados. O protótipo do forno foi construído com uma caixa de madeira revestida por um filme isolante de alumínio, materiais que objetivam minimizar as trocas térmicas entre o volume interno do forno com o meio externo. O forno contém quatro resistências elétricas para o aquecimento, um sensor de temperatura interno e um exaustor para garantir uma temperatura de segurança máxima de operação de 110°C. Um microcontrolador Arduino UNO é usado para embarcar um controlador proporcional-integral-derivativo, projetado utilizando-se o método de Ziegler-Nichols. O sistema de controle usa a diferença entre a temperatura de referência e o valor instantâneo de temperatura para criar um sinal de controle que atua em um sistema de potência, isto é, controlando a alimentação aplicada às resistências elétricas do forno. O sistema de controle foi testado em diferentes condições de temperatura de referência, mostrando que o método de controle empregado é eficaz para atingir as temperaturas desejadas rapidamente e de forma automática.

**Palavras-chave:** Controle de temperatura. Controle PID. Sistema embarcado. Atraso de tempo. Controle de potência.

### 1 INTRODUÇÃO

Os fornos elétricos são utilizados em diversas aplicações na indústria, como por exemplo, nos setores metalúrgico, siderúrgico, alimentício, petrolífero, dentre outros. Uma importante utilização de fornos é na fundição de alumínio, tendo o objetivo de elevar a temperatura do metal até o ponto de fusão para que o material resultante tenha as propriedades adequadas na fundição (SILVA, 2016). A utilização em larga escala dos fornos deve-se ao baixo investimento inicial, ao controle de temperatura preciso e à obtenção de bons rendimentos térmicos em diversas faixas de operação (STASI, 2002).

Devido à importância do controle de temperatura nos processos industriais, diversos estudos na área de controle buscam desenvolver métodos que proporcionem um acréscimo de desempenho em relação às respostas transitórias e permanentes, aliados a uma boa estabilidade relativa do sistema em malha fechada. A estratégia de controle usando o controlador proporcional-integral-derivativo (PID) satisfaz de forma eficaz essas exigências, sendo muito investigada e aperfeiçoada para o controle de temperatura. Por exemplo, Guerra (2006) projetou um controlador PID e o embarcou em um microcontrolador PCI-1711 para o controle da taxa de temperatura de um forno elétrico. Na identificação, dois modelos foram utilizados: um sistema de primeira ordem com atraso para o forno aquecendo e um sistema de primeira ordem sem atraso com o forno resfriando. Para projetar o controlador, utilizou-se o método do lugar das raízes, e a validação experimental do sistema de controle foi feita utilizando o Real Time Windows Target do Simulink®. Gaiowski, Kozakevitch e Menezes (2015) desenvolveram a parte eletrônica e o protótipo de um forno elétrico a resistência para a implementação do controle PID através do microcontrolador Tiva C Series TM4C123G. O acionamento do forno é feito utilizando um sinal PWM, usado para acionar um sistema de potência baseado em um relé a estado sólido. Cordeiro *et al* (2017) projetaram um controlador PID para o controle de temperatura de um forno resistivo para soldagem de componentes SMDs (do inglês, *Surface-Mount Devices*) seguindo o perfil de temperatura *reflow*. Foi utilizado um sensor de temperatura do tipo termopar e o sistema de controle foi implementado em um microcontrolador PIC18F4550, obtendo resultados satisfatórios na soldagem de placas com circuito contendo SMDs.

Neste artigo, é investigada a metodologia PID para o controle de temperatura de um forno elétrico, utilizando a estratégia de sintonia de Ziegler-Nichols (OGATA, 2003). O forno foi construído utilizando-se uma caixa de madeira revestida por alumínio para diminuir as trocas de calor entre o volume interno do forno com o meio externo. Foi instalado um exaustor para regular a temperatura interna máxima do forno em 110°C, medida por um sensor de temperatura LM35. O forno foi modelado como um sistema de primeira ordem com retardo de transporte, que foi em seguida simplificado utilizando-se a aproximação de Padé (OGATA, 2003). O microcontrolador Arduino UNO foi usado para embarcar o controlador PID, no qual a diferença entre a temperatura desejada do forno e a temperatura adquirida é utilizada como entrada para o controlador. Um sistema de potência dedicado foi construído usando um *triac*, tendo o sinal de controle a função de prover o ângulo de disparo de forma a variar o sinal aplicado nas resistências do forno e, por consequência, controlar sua temperatura interna. Após a realização de alguns experimentos com diferentes temperaturas de referência, foi possível verificar que o sistema de controle é eficaz em regular adequadamente a temperatura do forno de forma automática. O protótipo construído e a metodologia de projeto empregada mostraram-se adequados para aplicação acadêmica, promovendo aos alunos a oportunidade para integração de conhecimentos nas áreas de eletrônica de potência, circuitos elétricos, instrumentação, identificação de sistemas lineares, controle de sistemas dinâmicos e sistemas embarcados.

## 2 FORNO A RESISTÊNCIA ELÉTRICA

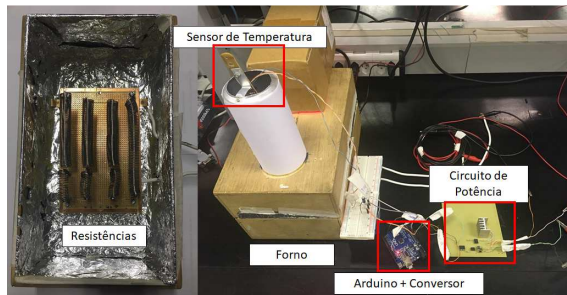
A fotografia do protótipo, bem como o correspondente diagrama de blocos do forno, incluindo os módulos de instrumentação e acionamento, estão dispostos nas Figuras 1 (a) e (b) respectivamente. O sensor de temperatura do forno possui saída de tensão linear em relação à temperatura, fornecendo para a entrada analógica do Arduino UNO a tensão em milivolts. O usuário pode configurar o forno para operar até a temperatura de 110°C, devido a um exaustor de saída volumétrica constante que regula essa temperatura máxima de operação. O



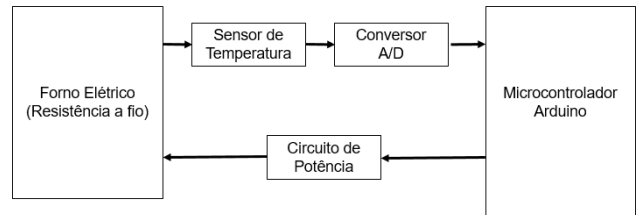
microcontrolador controla a potência dissipada no resistor através do algoritmo do controlador PID embarcado e de um sistema de potência. O acionamento é composto basicamente por um *triac*, que recebe um sinal de pulso do microcontrolador para configurar a tensão de alimentação disponibilizada para as resistências e, conseqüentemente, a potência dissipada nas resistências, regulando-se assim a temperatura do forno elétrico.

Figura 1 - Controle de temperatura do forno elétrico.

(a) Protótipo do forno.



(b) Diagrama de blocos do controle de temperatura.

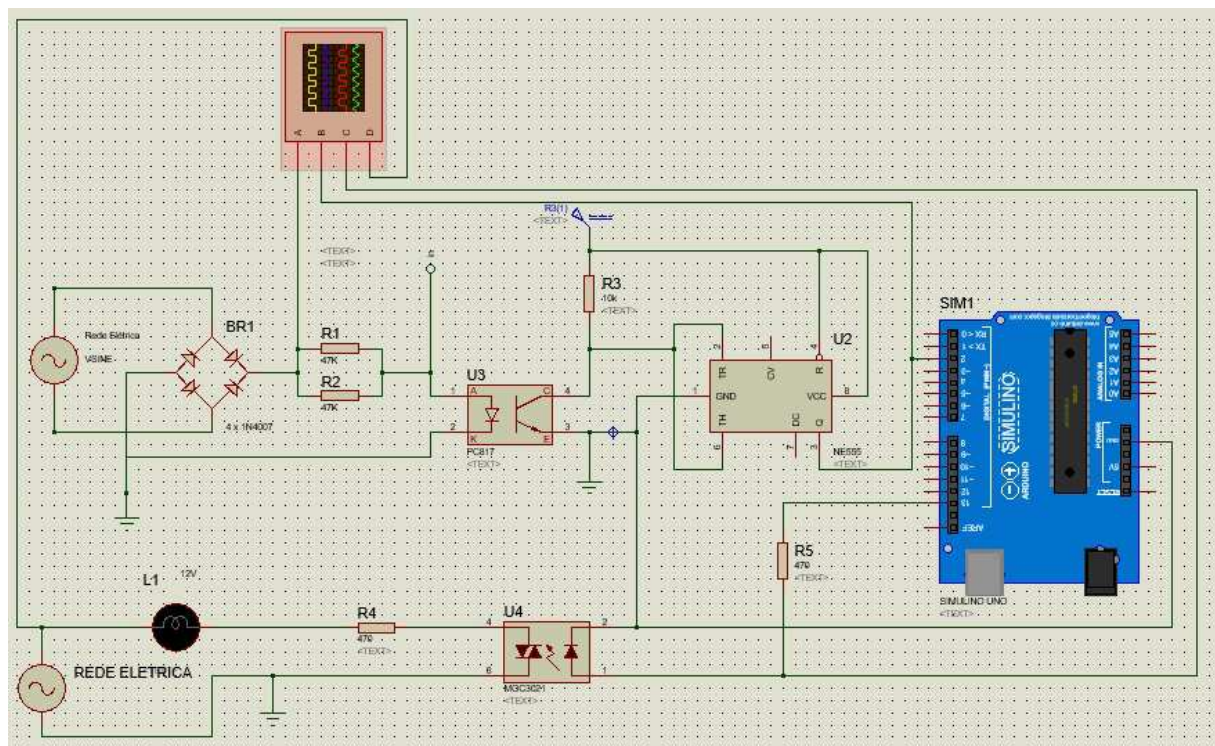


Fonte: Próprios autores

### 3 CIRCUITOS DE ACIONAMENTO E INSTRUMENTAÇÃO

A Figura 2 mostra o circuito de acionamento, o circuito de instrumentação e o microcontrolador Arduino UNO, desenhados e simulados utilizando-se o software Proteus®.

Figura 2 - Diagrama do circuito de acionamento (software Proteus®).



Fonte: Próprios autores

O circuito de instrumentação é composto pelo circuito de sincronismo e pelo sensor de temperatura LM35. O componente LM35 é um sensor de precisão com saída de tensão

analogica, adquirida diretamente pelo Arduino UNO. O sensor é alimentado com a tensão de 5V do microcontrolador e fornece uma saída proporcional à temperatura, ou seja, para cada 10mV tem-se 1°C, com precisão de  $\pm 0,5^\circ\text{C}$ . O circuito de sincronismo é composto principalmente por um retificador de onda completa, um foto-acoplador e um circuito *Schmitt trigger*. Neste projeto, o circuito de retificação é composto por dois resistores de 47 k $\Omega$  ( $R_1$  e  $R_2$ ) em paralelo entre si e em série com uma ponte formada por diodos 1N4007. Os resistores têm como função limitar o valor de corrente que passará pela ponte de diodos. O foto-acoplador PC817 é usado para isolar o circuito de sincronismo que é conectado ao Arduino UNO. Por fim, o último elemento do circuito de sincronismo é o *Schmitt trigger*. O *Schmitt trigger* utilizado no projeto é o NE555N alimentado com 5V e que possui saída invertida, de forma que, quando a tensão de referência do *Schmitt trigger* for maior ou igual ao limiar superior, sua saída terá nível lógico baixo e, quando for menor ou igual ao limiar inferior, a saída apresentará nível lógico alto. No circuito da Figura 2, quando a tensão entregue ao *Schmitt trigger* for maior ou igual a 3,3 V, o *Schmitt trigger* não enviará sinal para o Arduino e quando a tensão for inferior ou igual a 1,7 V, o Schmitt Trigger enviará um pulso para o microcontrolador.

O circuito de acionamento é composto por um isolador-disparador óptico com foto-triac, uma resistência  $R_4$  de 470 $\Omega$  e uma lâmpada que, na simulação, representa as resistências do forno. A função do circuito de acionamento é a de permitir a passagem da tensão da rede elétrica para as resistências de aquecimento quando o Arduino enviar um pulso de tensão para o triac. O acionamento usa o isolador-disparador óptico BT137 para disparar o foto-triac e para isolar a saída do Arduino da carga, protegendo o microcontrolador de possíveis oscilações da fonte. O triac permite controlar o início da condução da senoide, aplicando um pulso em um ponto/ângulo pré-determinado do ciclo de corrente alternada. Esse pulso no pino de disparo (*Gate*) é da ordem de miliampères e, assim, pode-se controlar grandes cargas AC com uma baixa corrente de acionamento. Para realizar corretamente o disparo, é necessário identificar a passagem pelo zero da senoide, processo feito pelo circuito de sincronismo. Quando o triac recebe o pulso do microcontrolador, a carga é ativada, e só é desligada após a tensão alternada passar pelo zero novamente. Através desse tempo de disparo, associado a um ângulo relativo ao período da senoide, é possível controlar a potência média dissipada na carga.

O Arduino UNO tem a função de otimizar e automatizar o controle de temperatura do forno elétrico. Esse objetivo é atingido através do controle do ângulo de disparo determinado pelo controlador PID. Na programação do microcontrolador, foi definida uma variável auxiliar relativa ao ângulo de disparo real, de tal forma a ser diretamente proporcional à potência dissipada na resistência elétrica, visando facilitar a modelagem da planta no sistema de controle. O ângulo de disparo foi então definido como:  $power\_time = ((180 - fase)/180.0) \times 8333$ , em que se divide o ângulo de disparo em 180 valores. Com essa abordagem, o ângulo de disparo controla diretamente e proporcionalmente a potência dissipada nas resistências. O resultado da expressão  $(180 - fase)/180$  é multiplicado por 8333, pois a frequência da onda retificada é 120 Hz com período de 8333  $\mu\text{s}$ . Assim, o Arduino UNO, após receber o sinal de cruzamento do zero pelo circuito de sincronismo, envia um pulso para o triac com duração de 500  $\mu\text{s}$ , valor esse definido experimentalmente. Portanto, quanto menor o ângulo de disparo definido, maior será o valor da variável  $power\_time$ , e mais rapidamente o pulso será entregue ao triac, aplicando o sinal senoidal à carga resistiva. Ângulos de disparo maiores corresponderão a valores mais baixos do  $power\_time$ , que resultarão em intervalos menores da onda senoidal aplicada às resistências, produzindo menor potência.



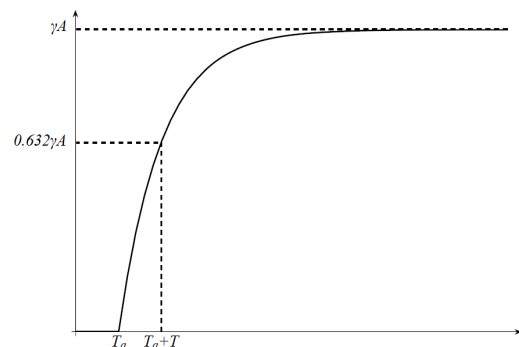
#### 4 MODELO DO FORNO ELÉTRICO

Os fornos elétricos possuem respostas livres semelhantes a um sistema de primeira ordem com atraso de tempo e são modelados como (CORDEIRO *et al*, 2017):

$$P(s) = \frac{\gamma}{Ts + 1} e^{-T_a s}, \quad (1)$$

em que  $\gamma$  representa o ganho estático,  $T$  é a constante de tempo,  $T_a$  representa o atraso de tempo e  $s$  é o operador de Laplace. A resposta geral do sistema com atraso quando a entrada é um degrau de amplitude  $A$  é representada pela Figura 3. Assim, os parâmetros do modelo podem ser estimados experimentalmente utilizando-se a resposta a um degrau. Inicialmente, aplica-se à entrada do sistema uma excitação em degrau e, em seguida, registra-se a resposta. Após isso, utilizando-se a análise gráfica, podem-se determinar os valores do ganho estático, da constante de tempo e do atraso de tempo.

Figura 3 - Resposta de um sistema com atraso de tempo.



Fonte: Próprios autores

#### 5 CONTROLADOR PID

O controlador PID é composto por três ações de controle independentes, sendo elas: proporcional, integral e derivativa. O controle PID une as vantagens de estratégia de controle de cada ação e, assim, minimiza o erro entre a referência e a saída da planta. O controle PID é descrito pela seguinte expressão:

$$u(t) = K_p e(t) + \underbrace{\frac{K_p}{T_i}}_{K_i} \int_0^t e(t) dt + \underbrace{K_p T_d}_{K_d} \frac{de(t)}{dt}, \quad (2)$$

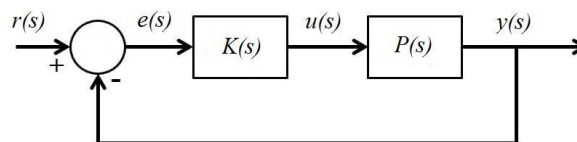
em que  $u(t)$  representa o sinal de controle,  $e(t)$  é o sinal de erro entre o sinal de referência  $r(t)$  e a saída da planta  $y(t)$ ,  $K_p$  é o ganho proporcional,  $K_i$  é o ganho integral e  $K_d$  é o ganho derivativo. Aplicando-se a transformada de Laplace na Equação (2), a função de transferência do controlador é definida como:

$$K(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left( 1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right). \quad (3)$$

A Figura 4 mostra o diagrama de blocos da estrutura de controle com realimentação unitária utilizada nesse trabalho. As variáveis iniciais  $K_p$ ,  $T_d$  e  $T_i$  do controlador são obtidas utilizando o método de Ziegler-Nichols (OGATA, 2003). Esse método consiste em determinar os parâmetros iniciais do controlador de forma prática. Entretanto, nem sempre esses parâmetros iniciais obtidos pelo método levam o sistema de controle a um desempenho adequado. Desse modo, muitas vezes é necessário o processo de sintonia fina do controlador, sendo a eficácia final da sintonia ligada diretamente à experiência do projetista. Inicialmente, o método Ziegler-Nichols utiliza somente o ganho proporcional, i.e., considera  $T_i = \infty$  e  $T_d = 0$ . Nessas condições, aumenta-se o valor de  $K_p$  de zero até o valor crítico  $K_{cr}$ , levando à estabilidade marginal, na qual as vibrações têm período  $P_{cr}$  e amplitudes constantes. Os valores das variáveis  $K_p$ ,  $T_d$  e  $T_i$  são obtidas em relação ao ganho crítico  $K_{cr}$  e ao período crítico  $P_{cr}$  da seguinte forma (OGATA, 2003):

$$K_p = 0,6K_{cr}, T_i = 0,5P_{cr} \text{ e } T_d = 0,125P_{cr}. \quad (4)$$

Figura 4- Sistema de controle em malha fechada e realimentação unitária.



Fonte: Próprios autores

## 6 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Esta seção apresenta e discute: a identificação do modelo do forno com retardo de transporte; o método utilizado para sintonizar o controlador PID; e a validação experimental do sistema de controle.

### 6.1 Identificação do modelo do forno

Para a identificação do sistema em malha aberta, alguns testes experimentais foram realizados para se obter a variação de temperatura em função do ângulo de disparo: aplicação de degraus de entradas com as amplitudes de 30, 60, 90, 120 e 150 graus. A função de transferência tem como saída a variação da temperatura do forno e, como entrada, o ângulo de disparo. A Tabela 1 mostra para todos os testes, a tensão eficaz aplicada às resistências do forno, a constante de tempo ( $T$ ), a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) e o atraso de tempo ( $T_a$ ). Nota-se que a constante de tempo e o atraso de tempo têm uma pequena discrepância entre as medidas, variação que está diretamente relacionada ao método simples de identificação, pois utiliza apenas a análise gráfica para extração dos parâmetros. Nota-se também que a variação de temperatura muda significativamente com o ângulo de disparo. Entretanto, quando normalizada pela amplitude do degrau de entrada, procedimento para se determinar o ganho estático  $\gamma$  na Equação (1), verifica-se que a diferença entre os valores cai substancialmente. Desse modo, como o controlador PID é robusto para pequenas variações, os dados obtidos com a média dos resultados para o ângulo de disparo de 90 graus foram utilizados para fazer a identificação do modelo a ser usado no projeto do controlador. As respostas da identificação e

do modelo para o ângulo de disparo de 90 graus são comparadas na Figura 5, mostrando uma boa correlação. O modelo identificado tem a seguinte função de transferência:

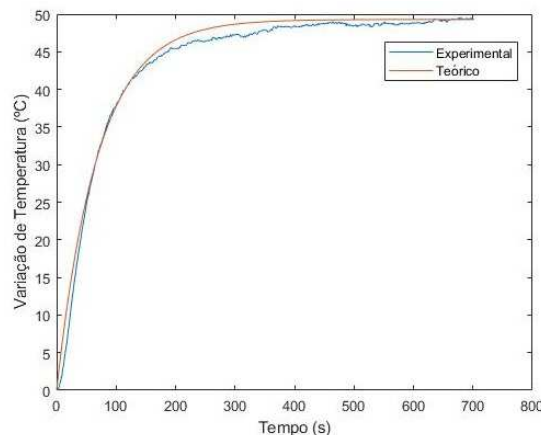
$$P(s) = \frac{\Delta T(s)}{\hat{\text{Angulo}}(s)} = \frac{49,3}{69s+1} e^{-4s} = \frac{0,55}{69s+1} e^{-4s}. \quad (5)$$

Tabela 1- Parâmetros obtidos pelos testes do sistema em malha aberta.

| Ângulo de disparo (graus) | Tensão eficaz nas resistências do forno (V) | T  | $\Delta T$ (°C) | $T_a$ (s) |
|---------------------------|---|----|-----------------|-----------|
| 30                        | 26,1  | 60 | 2,6             | 2         |
| 60                        | 60,9  | 71 | 20,3            | 3         |
| 90                        | 94,3  | 69 | 49,3            | 4         |
| 120                       | 115,1                                       | 70 | 72,8            | 2         |
| 150                       | 123,5                                       | 72 | 84,1            | 3         |

Fonte: Próprios autores

Figura 5: Variação de temperatura correspondente ao ângulo de disparo de 90 graus.



Fonte: Próprios autores

Para transformar a Equação (5) em uma função racional, utiliza-se a aproximação de Padé de ordem 1, dada pela seguinte equação (OGATA,2003):

$$e^{-T_a s} = \frac{2 - T_a s}{2 + T_a s}. \quad (6)$$

Desse modo, o modelo da planta pode ser escrito na forma de função racional como:

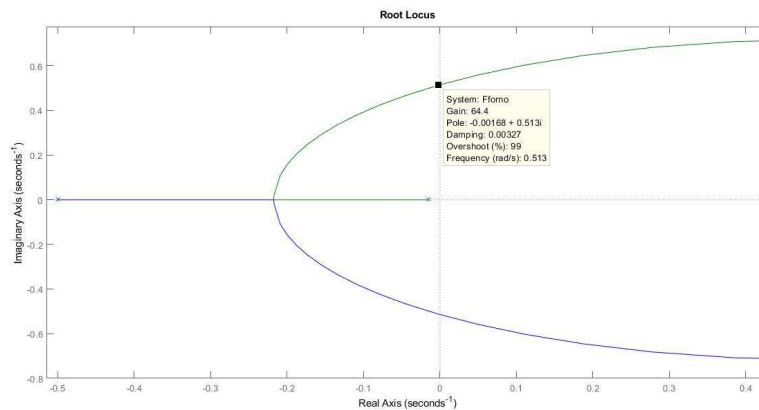
$$P(s) = \frac{0,55}{(69s+1)} \frac{(-s+0,5)}{(s+0,5)}. \quad (7)$$

## 6.2 Projeto do controlador PID

O controlador PID é projetado seguindo o método de Ziegler-Nichols. Assim, os parâmetros iniciais são definidos como:  $T_i = \infty$  e  $T_d = 0$ . Desse modo, agora apenas a parte

proporcional contribui na resposta do controlador. A Figura 6 mostra o lugar das raízes dessa nova configuração com realimentação unitária, sendo o ganho crítico e a frequência angular crítica determinados graficamente, com os seguintes valores:  $K_{cr}=64,8$  e  $\omega_{cr}=0,513\text{rad/s}$ , sendo portanto, o período crítico  $P_{cr}=12,22\text{s}$ . Desse modo, os parâmetros iniciais do controlador são  $K_p=38,9$ ,  $T_i=6,1$  e  $T_d=1,5$ .

Figura 6 - Lugar das raízes do sistema com realimentação unitária.



Fonte: Próprios autores

O método de Ziegler-Nichols é usado para determinar os parâmetros iniciais do controlador. Entretanto, ainda é necessário um ajuste fino nesses ganhos para se obter um desempenho satisfatório. Para isso, a metodologia adotada foi utilizar em conjunto, as simulações do Simulink® e os resultados dos testes experimentais. Uma limitação encontrada na utilização do *triac* foi que este componente precisa receber o pulso do Arduino UNO por um tempo mínimo para que se consiga acionar a carga, ou seja, a largura desse pulso incorre numa limitação da faixa permitida para o disparo no início e no final da senoide. Portanto, estabeleceram-se os valores mínimo e máximo de segurança para o funcionamento adequado, isto é, que o ângulo de disparo estivesse entre 30 e 150 graus. Com isso, após diversas iterações, os seguintes parâmetros do controlador PID foram escolhidos:

$$K_p = 15, K_i = 2 \text{ e } K_d = 4. \quad (8)$$

### 6.3 Validação experimental do sistema de controle

O sistema de controle em malha fechada foi testado experimentalmente para as temperaturas de referência no forno de 40°C, 50°C, 70°C e 90°C. O microcontrolador foi configurado para realizar uma amostragem a cada 1s. A Tabela 2 apresenta os resultados experimentais considerando os índices de desempenho tradicionais da teoria de controle: sobressinal, tempo de subida e tempo de acomodação de 2%. Vale a pena salientar que nem sempre é possível satisfazer todos os critérios de desempenho no desenvolvimento de um sistema de controle. Assim, nesse trabalho a otimização dos parâmetros foi realizada de forma a privilegiar a característica do sobressinal. Nota-se que o percentual de sobressinal é mais elevado para a temperatura de referência de 50°C e menor para a temperatura de 90°C. O maior tempo de subida aliado ao maior tempo de acomodação foi obtido para a temperatura de 90°C, sendo, no entanto, respectivamente, menor que duas vezes a constante de tempo e aproximadamente quatro vezes a constante de tempo. Para exemplificar a ação do sistema de controle, a Figura 7a apresenta o resultado do controle de temperatura para a temperatura de referência de 70°C e a Figura 7b apresenta a variação do sinal de controle (ângulo de disparo).

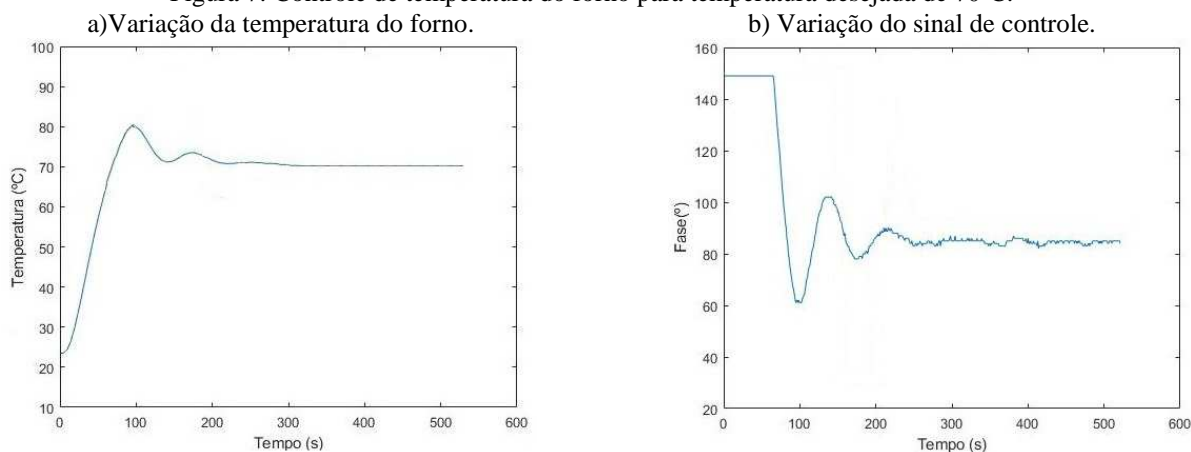


Tabela 2 - Características da resposta transitória do sistema com realimentação.

| Temperatura (°C) | Sobressinal (V) | Tempo de subida (s) | Tempo de acomodação de 2% (s) |
|------------------|-----------------|---------------------|-------------------------------|
| 40               | 6,8             | 32                  | 300                           |
| 50               | 13              | 42,5                | 250                           |
| 70               | 10              | 68                  | 250                           |
| 90               | 4,5             | 123                 | 300                           |

Fonte: Próprios autores

Figura 7: Controle de temperatura do forno para temperatura desejada de 70°C.



Fonte: Próprios autores

## 7 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Esse trabalho desenvolveu e validou experimentalmente um sistema de controle de temperatura para um forno elétrico a resistência. O protótipo do forno foi construído utilizando materiais comuns, visando facilitar a sua reprodução por outros alunos ou em outras instituições de ensino que desejem ter uma planta simples, de fácil manuseio e que possa ser utilizada para testar conceitos em disciplinas que abordem os temas de controle, identificação, instrumentação, sistemas embarcados, dentre outros. O modelo do forno foi identificado utilizando-se uma técnica simples baseada na resposta do sistema de primeira ordem a uma entrada em degrau. Com o modelo identificado, um controlador PID foi projetado utilizando-se a metodologia de Ziegler-Nichols e embarcado através do emprego do microcontrolador Arduino UNO. Os resultados experimentais mostraram que o sistema de controle é eficaz em controlar automaticamente a temperatura do forno elétrico.

Apesar dos bons resultados já atingidos e apresentados nesse artigo, pretende-se aperfeiçoar os módulos de controle, de potência e de instrumentação em continuidade ao projeto de graduação dos dois alunos autores desse trabalho. Um dos aperfeiçoamentos será aumentar a faixa de variação do ângulo de disparo do *triac* que está atualmente entre 30 e 150 graus, objetivando chegar próximo a um período completo da onda senoidal aplicada às resistências, i.e., entre 0 e 180 graus. Além disso, outras estratégias de controle serão investigadas para o controle de temperatura, e uma melhoria interessante será adicionar o controle de velocidade do exaustor, podendo, assim, melhorar o desempenho do sistema. Por

fim, pretende-se estudar e desenvolver metodologias de controle e acionamento que visem aumentar a eficiência energética do sistema.

## REFERÊNCIAS

CORDEIRO, Daniel A. S. *et al.* Desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura de um forno elétrico a resistência para soldagem *reflow*. In: XIII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, 2017, Porto Alegre. **Anais**. Porto Alegre, 2017.

GAIEWSKI, João Vicente Balvedi; KOZAKEVITCH, Kelvin de Almeida; MENEZES, Mário Augusto Carnasciali. **Desenvolvimento de um micro forno elétrico utilizando controlador PID**. Monografia – Departamento Acadêmico de Eletrotécnica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Curitiba, 2015.

GUERRA, Leonardo Ney de Araujo. **Uso de compensador PID no controle de taxa de variação de temperatura em um forno elétrico a resistência**. Monografia - Escola Politécnica, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2006.

OGATA, Katsuhiko. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª edição, São Paulo: LTC, 2003.

SILVA, Darlan Henrique. **Projeto de um forno à resistência elétrica para fundição de alumínio**. Monografia - Centro universitário Univates, Lajeado, 2016.

STASI, Luigi. **Fornos Elétricos**. 1ª edição, Curitiba: Hemus, 2002.

## TEMPERATURE CONTROL OF AN ELECTRIC RESISTANCE OVEN USING THE ARDUINO MICROCONTROLLER

**Abstract:** *Electric ovens are widely used in industry, where the precise temperature control is a fundamental requirement to maintain the final product quality, since the temperature directly affects material properties. In this context, this article investigates the temperature control process of a resistance oven prototype built for academic applications, aiming mainly for the integration of skills acquired in the undergraduate engineering course, in topics related to power electronics, electrical circuits, instrumentation, linear system identification, dynamic system control, and embedded systems. The oven prototype was built with a wooden box covered by an aluminum insulating film, materials which minimize the thermal exchange between the oven internal volume and the external environment. The prototype contains four electric resistors for heating, an internal temperature sensor, and an exhaust fan to provide a maximum operating safety temperature of 110°C. An Arduino UNO microcontroller is used to embed a proportional-integral-derivative controller, designed using the Ziegler-Nichols method. The control system uses the difference between the reference temperature and the instantaneous temperature value to create a control signal that acts on a power system, that is, controlling the alternating voltage applied to the oven electric resistors. The control system was tested under different reference temperature conditions, showing that the employed control method is effective in achieving the desired temperatures quickly and automatically.*

**Key-words:** *Temperature control. PID control. Embedded system. Dead Time. Power control.*