

# Rastreador de trajetórias para controle de temperatura de um forno mufla

Daniel de Almeida Fernandes \*  
Guilherme Pires Carneiro de Miranda \*\*

\* *Depto. de Energia Elétrica da Univ. Federal de Juiz de Fora (UFJF), Juiz de Fora, MG, (e-mail: daniel.fernandes@ufjf.edu.br)*

\*\* *Depto. de Engenharia de Produção e Mecânica da UFJF, (e-mail: guilherme.pires@engenharia.ufjf.br)*

**Abstract:** This paper proposes a trajectory tracking controller for a muffle furnace. It consists of a PID controller and a reference feedforward control law. It was developed based on nonlinear model of the plant, which is updated in the paper. Simulations of the closed-loop control system under realistic operating conditions were carried out and the results are presented and discussed herein. The PID controller was tuned through numerical methods.

**Resumo:** Este artigo propõe um rastreador de trajetórias para controlar um forno mufla. Ele consiste de um controlador PID e um controlador de pré-alimentação de referências. Ele foi desenvolvido com base no modelo não linear da planta, a qual é atualizada no artigo. O sistema de controle em malha fechada foi simulado em condições reais de operação e os resultados obtidos são mostrados e discutidos. O controlador PID foi sintonizado através de métodos numéricos.

*Keywords:* Muffle furnace; nonlinear control; PID control; process control; reference feedforward; temperature control.

*Palavras-chaves:* Controle de processo; controle de temperatura; controle não linear; controle PID; forno mufla; pré-alimentação de referência.

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1 Introdução

Acatando uma sugestão para trabalhos futuros de um artigo publicado anteriormente, onde se sugeriu propor melhorias no controle ali apresentado, o presente artigo propõe um rastreador de trajetórias para controle de temperatura do forno mufla mostrado na Figura 1. O forno é utilizado no tratamento térmico de materiais ferrosos e não ferrosos no Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia da Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF) (Miranda & Fernandes, 2019).

Forno mufla é um equipamento empregado em tratamentos térmicos a temperaturas que podem chegar a 1400°C, dependendo do modelo do forno, do tipo de tratamento térmico e do material tratado. Consiste essencialmente em uma câmara de aquecimento isolada termicamente do meio ambiente. Modelos comerciais normalmente são aquecidos através de resistências elétricas e isolados do ambiente através de materiais refratários. A Figura 1 mostra um exemplo típico. Os fornos são comumente utilizados em experimentos de laboratório, tanto científicos quanto industriais, nos quais se deseja alterar as propriedades físico-químicas e mecânicas dos materiais expostos a temperaturas elevadas durante períodos de tempo controlados. Exemplos de aplicação incluem testes de laboratório, recozimento (aços), secagem, carbonização (orgânicos), análise de carvão e determinação de cinzas, entre vários outros (Callister Jr. & Rethwisch, 2016; Pereira et al., 2016;



Figura 1. Forno mufla (1) e controlador (2 a 4) implementado por Miranda & Fernandes (2019). Fonte: Miranda & Fernandes (2019).

Santos et al., 2015; Zambaldi et al., 2015; Krauss, 2015; Brooks, 1982).

O rastreador de trajetórias aqui proposto representa um aprimoramento do trabalho desenvolvido por Miranda & Fernandes (2019), o qual apresentou um controlador bem-sucedido para controlar a temperatura do forno mufla mostrado na Figura 1. O rastreador de trajetórias elimina exponencialmente os erros de rastreamento do sinal de referência, que exerce papel fundamental para o bom desempenho do controle, possibilitando que a temperatura da

câmara de aquecimento do forno mufla siga as rampas e patamares desejados com erros absolutos inferiores a 1%. O modelo da planta proposto por Miranda & Fernandes (2019) é aproveitado, porém com os parâmetros atualizados. Resultados de simulações computacionais baseadas no aplicativo MATLAB<sup>®</sup> são apresentados para ratificar os resultados anunciados.

O restante do artigo está assim organizado: a Seção 2 apresenta o modelo da planta e o controlador proposto; a Seção 3 apresenta e discute alguns dos resultados obtidos através de simulações computacionais; a Seção 4, por fim, apresenta conclusões e sugestões de trabalhos futuros.

## 1.2 Objetivo

O objetivo do presente trabalho é propor um controlador de temperatura robusto em termos de estabilidade e desempenho para o forno mufla apresentado na Subseção 1.1. O controlador deve apresentar desempenho superior ao do controlador apresentado em Miranda & Fernandes (2019).

## 1.3 Revisão bibliográfica

Técnicas diversas de modelagem de sistemas e de controle automático podem ser aplicadas para assegurar que as variáveis de interesse de equipamentos de laboratório científicos como industriais sejam mantidas dentro de limites estreitamente delimitados, mesmo quando elas estão sujeitas a distúrbios. A importância disto é reduzir o consumo de energia, economizar tempo de processamento, aumentar a segurança e a qualidade dos resultados obtidos e dos produtos manufaturados, assegurar a repetibilidade de processos, etc. No caso dos fornos mufla, a variável de interesse é a temperatura da câmara de aquecimento. Diferentes técnicas de controle são empregadas para esta finalidade, desde as clássicas, como os controladores da família PID (Guerra, 2006), até as avançadas e inteligentes, como a lógica nebulosa<sup>1</sup> dos tipos 1 e 2 (Serapião, 2016). Mas não há diferenças muito acentuadas entre os resultados dos trabalhos quando as referências são somente degraus e rampas lentas. Por isto, neste artigo, propõe-se assistir o trabalho de um controlador PID com outras técnicas de controle igualmente simples e eficazes. Entre os esforços mais recentes dedicados a controlar a temperatura de fornos elétricos pode-se citar os trabalhos de Miranda & Fernandes (2019), Zambaldi (2016), Ramirez-Laboreo et al. (2016), Hambali et al. (2014) e Neacă (2012). Há, entretanto, o predomínio do uso de modelos lineares na literatura, como aparecem em quase todos os trabalhos citados. Este artigo, ao contrário, faz uso do mesmo modelo não linear proposto por Miranda & Fernandes (2019), porém com os parâmetros atualizados.

# 2. CONTROLADOR

## 2.1 Modelo da planta

O modelo da planta é essencial tanto para o desenvolvimento e o processo de sintonização do controlador proposto quanto para a análise e a simulação do sistema em Malha Fechada (MF).

<sup>1</sup> Mais conhecida como *Fuzzy Logic* (FL), em inglês.

O modelo da planta foi aproveitado do trabalho publicado por Miranda & Fernandes (2019). Os parâmetros do modelo foram atualizados entretanto, após uma reavaliação dos dados experimentais disponíveis. O modelo no espaço de estados é o seguinte:

$$\begin{cases} \dot{\theta}(t) = -\tau^{-1}\theta(t) + \alpha(1 - \beta e^{-0,01\gamma u(t)}) \\ T_{\text{cam}}(t) = T_{\text{amb}} + \max(0; \tau^{-1}\theta(t)) \end{cases}, \quad (1)$$

onde  $t \in \mathbb{R}_{\geq 0}$  [s] é o tempo,  $\theta(t)$  [°C] é a variável de estado (escalar),  $\tau \approx 4041,0247$ s é a constante de tempo,  $\alpha \approx 1651,5807$ ,  $\beta \approx 1,0133112$  e  $\gamma \approx 2,6762108$  são constantes determinadas através de técnicas convenientes de modelagem e identificação de sistemas (Aguirre, 2015; Egeland & Gravdahl, 2002),  $u(t)$  [%] corresponde à razão cíclica da modulação por largura de pulso<sup>2</sup> que determina a potência média fornecida ao conjunto de resistências do forno mufla,  $T_{\text{cam}}(t)$  [°C] é a temperatura na câmara de aquecimento e, por último,  $T_{\text{amb}}$  [°C] é a temperatura do meio ambiente externo ao forno, considerada constante por simplicidade, uma vez que ela varia lentamente e dentro de uma faixa de valores estreita e significativamente inferior às temperaturas típicas de trabalho do forno mufla.

É importante notar que o modelo em (1)...

- I. é válido somente quando  $T_{\text{cam}}(t) \geq T_{\text{amb}}$ , ao mesmo tempo em que  $0\% \leq u(t) \leq 100\%$ ;
- II. já incorpora as perdas de calor para o meio ambiente. De fato, quando  $u(t) < 100 \ln(\beta)/\gamma \approx 0,49410747\%$ , as perdas superam o ganho de calor e a temperatura é reduzida até o ponto em que  $T_{\text{cam}}(t) = T_{\text{amb}}$ ;
- III. não incorpora o pequeno atraso de transporte ( $T \approx 142,25255$ s, equivalente a cerca de 3,5% de  $\tau$ ), inerente a qualquer sistema térmico, nem o erro intrínseco do sensor de temperatura ( $< 1^\circ\text{C}$ ). Contudo, ambos são incluídos diretamente nas simulações. Maiores informações podem ser encontradas, por exemplo, em Franklin et al. (2009) e Ogata (2009);
- IV. admite, para o caso  $u(t) = 100\%$ , o modelo linear equivalente  $G(s) \approx \frac{1536,4002}{\tau s + 1} e^{-Ts}$ . O valor de  $T$  é aquele fornecido no item III. O coeficiente de determinação de  $G(s)$ , baseado no coeficiente de correlação de Pearson (Costa Neto, 2002), é  $R^2 \approx 1$ . É muito forte a correlação que existe entre os dados experimentais e os dados gerados através de  $G(s)$ . A diferença entre ambas as coleções de dados não ultrapassa 2%, após um período inicial igual a  $2T$  segundos; durante este período, contudo, a diferença entre elas não ultrapassa  $8,5^\circ\text{C}$ .

## 2.2 Sinal de referência

Os sinais de referência utilizados têm influência decisiva no desempenho de um rastreador de trajetórias, uma vez que somente sinais suficientemente suaves podem ser rastreados exatamente (Slotine & Li, 2005).

Por esta razão, o sinal de referência  $T_{\text{ref}}(t)$  utilizado neste trabalho é de classe  $\mathcal{C}^1$  (Lima, 2019; Kreyszig, 1989). A Figura 2 mostra  $T_{\text{ref}}(t)$ , onde  $t_1, t_2, t_3, t_4 \in \mathbb{R}_{>0} \mid t_1 < t_2 < t_3 < t_4$  [s] são instantes de tempo, enquanto  $T_1, T_2 \in \mathbb{R}_{>0} \mid$

<sup>2</sup> Conhecidas respectivamente como *Duty Cycle* (DC) e *Pulse-Width Modulation* (PWM), em inglês.

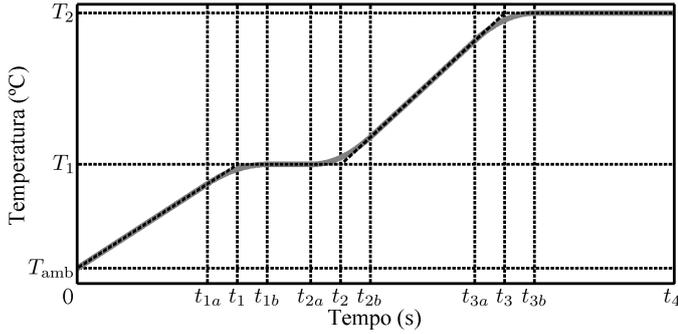


Figura 2. Sinal de referência  $T_{\text{ref}}(t)$  (linha sólida).

$T_1 < T_2$  [°C] são patamares de temperatura. Encerra-se no instante  $t_4$  o tratamento térmico desejado.

Sejam as taxas de elevação do sinal de referência mostrado na Figura 2 definidas como

$$\Delta T_1 = \frac{T_1 - T_{\text{amb}}}{t_1} \quad \text{e} \quad \Delta T_2 = \frac{T_2 - T_1}{t_3 - t_2}, \quad (2)$$

onde  $T_{\text{amb}} := T_{\text{cam}}(0^-)$ , ou seja, na prática, a temperatura ambiente é aquela medida imediatamente antes do início do aquecimento. Então a derivada do sinal de referência em relação ao tempo é definida através das seguintes funções:

$$\dot{T}_{\text{ref}}(t) := \begin{cases} 0 & \Leftrightarrow t = 0, \\ \Delta T_1 & \Leftrightarrow 0 < t \leq t_{1a}, \\ \Delta T_1 - \frac{(t - t_{1a}) \Delta T_1}{0,1 t_4} & \Leftrightarrow t_{1a} < t \leq t_{1b}, \\ 0 & \Leftrightarrow t_{1b} < t \leq t_{2a}, \\ \frac{(t - t_{2a}) \Delta T_2}{0,1 t_4} & \Leftrightarrow t_{2a} < t \leq t_{2b}, \\ \Delta T_2 & \Leftrightarrow t_{2b} < t \leq t_{3a}, \\ \Delta T_2 - \frac{(t - t_{3a}) \Delta T_2}{0,1 t_4} & \Leftrightarrow t_{3a} < t \leq t_{3b}, \\ 0 & \Leftrightarrow t_{3b} < t \leq t_4, \end{cases} \quad (3)$$

onde

$$t_{ia} = t_i - 0,05 t_4 \quad \text{e} \quad t_{ib} = t_i + 0,05 t_4, \quad (4)$$

$i \in \{1, 2, 3\}$ . Os intervalos de  $\pm 5\%$  de  $t_4$  definidos em (4) são arbitrários e, desta forma, podem ser alterados dentro de certos limites, na prática, não muito amplos. Decorre daí o intervalo de  $10\%$  de  $t_4$  que aparece nos denominadores de (3). Percentagens um pouco maiores resultam em trechos curvos um pouco mais longos e, consequentemente, em trechos retos um pouco menos duradouros, o que confere maior suavidade à transição das retas (ver Figura 2) e acarreta menores erros de rastreamento da referência. Se  $t_4$  é desproporcionalmente maior que  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$ , e percentagens significativas de  $t_4$  são definidas em (4), então o sinal de referência produzido pode ser deformado.

O sinal de referência é assim determinado:

$$T_{\text{ref}}(t) = T_{\text{amb}} + \int_0^t \dot{T}_{\text{ref}}(\lambda) d\lambda. \quad (5)$$

Vale salientar que sinais de referência de classe  $\mathcal{C}^n$ ,  $n \in \mathbb{N}$ , devem ser utilizados. São exemplos notáveis de arcos que podem ser empregados para concordar outras curvas, e

assim construir sinais admissíveis, i) as *splines*<sup>3</sup> cúbicas de aproximação (ex.: curva cúbica de Bézier) (Farouki, 2012), ii) o polinômio polar único de 4º grau proposto por (Nelson, 1989) e iii) os pares de espirais com simetria especular (ex.: par de clotoides gêmeas espelhadas) (Levien, 2008; Antunes & Fernandes, 2019, p. 911). Quanto mais suave é o sinal de referência, mais fácil se torna a tarefa do rastreador de trajetórias. Por outro lado, quanto mais suave é o sinal, maior é seu grau de continuidade, ou seja,  $n = 2, 3, \dots$ , e, portanto, maior tende a ser o processamento exigido para sintetizá-lo. Eis a razão pela qual, no presente trabalho,  $T_{\text{ref}}(t)$  é de classe  $\mathcal{C}^1$  apenas.

### 2.3 Estratégia de controle

O rastreador de trajetórias consiste na associação de duas técnicas de controle bastante conhecidas: i) PID e ii) Pré-Alimentação de Referência<sup>4</sup> (PAR).

A primeira delas é implementada desta forma:

$$u_{\text{pid}}(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\lambda) d\lambda + k_d \dot{e}(t), \quad (6)$$

onde  $k_p, k_i, k_d \in \mathbb{R}_{>0}$  são respectivamente os ganhos proporcional, integral e derivativo, e  $e(t)$  é o erro atuante, definido como

$$e(t) := T_{\text{ref}}(t) - T_{\text{cam}}(t), \quad (7)$$

cuja derivada em relação ao tempo é denotada  $\dot{e}(t)$  neste trabalho.

A segunda técnica de controle, por sua vez, é implementada da seguinte forma:

$$u_{\text{par}}(t) = T_{\text{ref}}(t) + \tau \dot{T}_{\text{ref}}(t). \quad (8)$$

O sinal de controle que resulta da associação de técnicas é

$$w(t) = u_{\text{pid}}(t) + u_{\text{par}}(t), \quad (9)$$

e está sujeito à saturação, tal que

$$\text{sat}(w(t)) := \begin{cases} \alpha \eta & \Leftrightarrow w(t) \geq \alpha \eta \\ w(t) & \Leftrightarrow \alpha \xi < w(t) < \alpha \eta, \\ \alpha \xi & \Leftrightarrow w(t) \leq \alpha \xi \end{cases} \quad (10)$$

onde  $\eta := 1 - \beta e^{-\gamma} \approx 0,93026043$  é a constante associada à entrada  $u(t) = 100\%$  e  $\xi := 1 - \beta \approx -0,013311173$  é a constante associada à entrada  $u(t) = 0\%$  (ver (1)).

O sinal de controle a ser aplicado à planta é então determinado através do seguinte difeomorfismo local (Slotine & Li, 2005; Khalil, 2002):

$$u(t) = -\left(\frac{100}{\gamma}\right) \ln\left(\frac{\alpha - \text{sat}(w(t))}{\alpha \beta}\right), \quad (11)$$

ou seja, as funções (11) e  $\alpha(1 - \beta e^{-0,01\gamma u(t)}) =: \phi(u(t))$ , tal que  $\phi(u(t)) : \mathcal{A} \rightarrow \mathcal{B}$ ,  $\mathcal{A} := \{a \in \mathbb{R} \mid a \in (-\infty, \alpha)\}$  e  $\mathcal{B} = \mathcal{A}$ , são difeomorfismos. Este difeomorfismo local lineariza a equação dinâmica do modelo da planta. Trata-se de uma variante um pouco mais simples da técnica de controle não linear chamada de linearização por realimentação (de saída)<sup>5</sup> (Franklin et al., 2009; Khalil, 2002).

<sup>3</sup> Curva suavizada que é matematicamente definida através de pelo menos dois pontos de controle.

<sup>4</sup> Esta técnica de controle é, talvez, mais comumente conhecida como *reference feedforward*, em inglês.

<sup>5</sup> Conhecida como *(output) feedback linearisation*, em inglês.

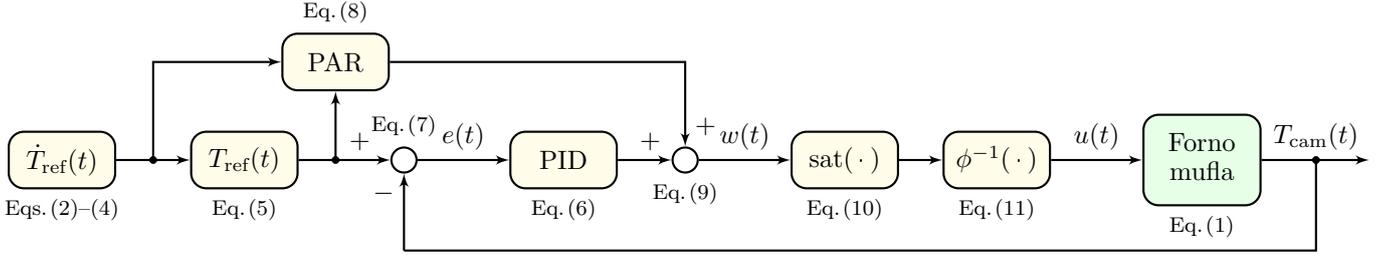


Figura 3. Diagrama de blocos completo do sistema de controle em MF.

Importa saber que a indesejável saturação do controle/atuador pode ser facilmente evitada através de duas ações: i) a sintonia adequada do controlador PID e ii) a utilização de taxas de aquecimento não muito elevadas.

#### 2.4 Análise da estabilidade

Esta seção apresenta uma análise simplificada da estabilidade da MF, mostrada na Figura 3. Tanto o atraso de transporte quanto a saturação do sinal de controle são aqui desconsiderados, como foi feito em Miranda & Fernandes (2019). Por fim, assume-se  $T_{amb} = 0^\circ\text{C}$ , sem perda de generalidade, porque (2)–(5) levam em consideração o valor de  $T_{amb}$ .

A análise consiste nos seguintes passos: i) substituir (6) e (8) em (9); ii) substituir (9) atualizada no passo anterior em (10);  $\text{sat}(w(t)) = w(t)$ , na presente análise; iii) substituir o resultado obtido no passo anterior em (11); iv) substituir o resultado obtido no passo anterior em (1); v) substituir (1) atualizada no passo anterior na derivada de (7) em relação ao tempo; vi) manipular o sistema dinâmico resultante e descrevê-lo no espaço de erros, tal que

$$\begin{bmatrix} \dot{e}_I(t) \\ \dot{e}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -\left(\frac{k_i}{\tau + k_d}\right) & -\left(\frac{1 + k_p}{\tau + k_d}\right) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_I(t) \\ e(t) \end{bmatrix}, \quad (12)$$

onde  $e_I(t) := \int_0^t e(\lambda) d\lambda$  (ver (6)). A forma Linear e Invariante no Tempo (LIT) observada em (12) é devida i) tanto à linearização por realimentação de saída ii) quanto à PAR. A matriz é Hurwitz, dado que  $k_p, k_i, k_d \in \mathbb{R}_{>0}$ .

Pode-se por conseguinte concluir que a origem do  $\mathbb{R}^2$ , que dá suporte a (12), é Globalmente Exponencialmente Estável (GES) (Franklin et al., 2009; Ogata, 2009; Slotine & Li, 2005; Khalil, 2002).

Esta análise simplificada, na prática, à luz das considerações feitas no item III. da Subseção 2.1 e no parágrafo derradeiro da seção anterior, indica i) tanto que o sistema em MF é estável ii) quanto que o erro de rastreamento de trajetórias tende a zero exponencialmente.

#### 2.5 Sintonia do controlador

O algoritmo *Twiddle* (Thoma, 2014; Thrun et al., 2006) foi escolhido para auxiliar no processo de sintonização do controlador PID, dentre outras opções de métodos numéricos, devido à sua simplicidade de implementação. Ele busca encontrar os ganhos (subótimos) do controlador através de simulações computacionais sucessivas do sistema de controle em MF. E não se faz necessário computar gradientes

de quaisquer funções; em cada simulação realizada, um dos ganhos é alterado de uma pequena porcentagem e o impacto disto é avaliado através de uma função de custo; se ele for positivo, isto é, se o custo abaixar, a alteração de ganho é mantida. Isto é feito de modo que os ganhos  $k_p, k_i$  e  $k_d$  são tanto incrementados quanto decrementados sequencialmente, múltiplas vezes. A busca termina somente quando i) o critério de parada definido é satisfeito ou ii) o número máximo desejado de iterações é atingido. Todavia, não há garantia de convergência para alguma solução.

O critério de parada definido no trabalho é

$$\limsup |e(t_e)| = \epsilon, \quad (13)$$

onde  $t_e \in \mathbb{R}_{>0} \mid kT \leq t_e \leq t_4$  [s] é o longo intervalo de tempo que se estende desde o instante igual a  $k \in \mathbb{N}$  vezes o tempo de atraso de transporte até o instante  $t_4$ , e  $\epsilon \in \mathbb{R}_{>0}$  [ $^\circ\text{C}$ ] é o valor supremo do erro que é admitido durante o intervalo  $t_e$ . Na prática, o critério impõe que o erro máximo admitido, após transcorridos os primeiros  $kT$  segundos, é  $\epsilon$ ; ou seja, o erro é desprezado durante este intervalo inicial, porque, mesmo valores elevados, não afetam o tratamento térmico desejado, dado que o sistema em MF é estável e que a temperatura ainda está baixa.

A função de custo adotada neste trabalho é

$$J(e(t), \dot{e}(t)) = \int_0^{t_4} (\mu |e(t)| + \nu |\dot{e}(t)|) dt, \quad (14)$$

onde  $\mu, \nu \in \mathbb{R}_{>0}$  são pesos. Ela é utilizada pelo algoritmo *Twiddle* para otimizar a sintonia do controlador PID. Três famílias de respostas decorrem das possíveis sintonias:

- I. Quando  $\mu \neq 0$  e  $\nu = 0$ , a resposta do sistema se torna mais oscilatória, pois o foco do processo de otimização está em reduzir o valor absoluto dos erros. Os ganhos  $k_p$  e  $k_d$  são incrementados, ao passo que  $k_i$  é decrementado, além daquilo que ocorre nos demais casos.
- II. Quando  $\mu = 0$  e  $\nu \neq 0$ , a resposta do sistema se torna menos precisa, mas não menos exata, porque o foco do processo de otimização está na redução da variação dos erros. Quanto aos ganhos do controlador, ocorre o oposto daquilo que foi declarado no item anterior. Pode-se então afirmar que o amortecimento do sistema é maior que em ambos os outros casos.
- III. Quando  $\mu \neq 0$  e  $\nu \neq 0$ , a resposta do sistema tende a ser mais equilibrada, podendo tender para um dos lados em função dos pesos escolhidos, pois ambas as reduções, ou seja, valor absoluto e variação do erro, estão simultaneamente no foco do processo de otimização.

Para concluir, adotados os valores  $\epsilon \approx 3,386$ ,  $k = 5$ ,  $\nu = 1$  e  $\mu = 0,01$ , foram obtidos os ganhos  $k_p \approx 38,3$ ,  $k_i \approx 0,174$  e  $k_d \approx 2429$ .

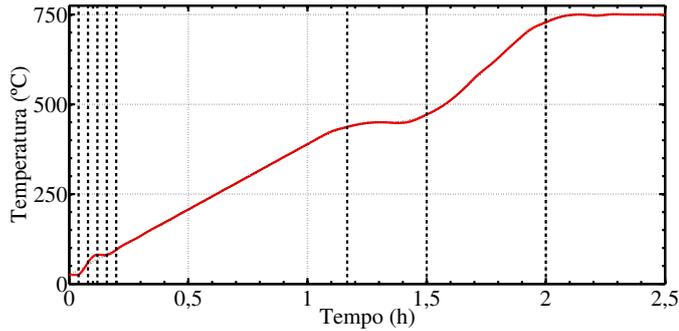


Figura 4. Resposta (linha sólida) para o sinal de referência (linha pontilhada). As 5 primeiras linhas tracejadas demarcam 5 intervalos idênticos a  $T$  (ver Subseção 2.1), enquanto as 3 últimas indicam os instantes  $t_1$ ,  $t_2$  e  $t_3$  (ver Subseção 2.2).

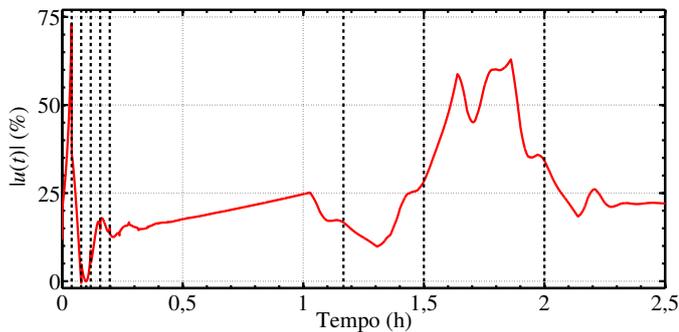


Figura 5. Sinal de controle. As linhas tracejadas têm o mesmo significado que na Figura 4.

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Ao término do processo de sintonização do controlador PID, diversas simulações, todas baseadas em MATLAB®, foram realizadas com a finalidade de verificar se os resultados almejados poderiam ser obtidos de fato. Para efeito de comparação de resultados, reproduziu-se numericamente o experimento reportado em Miranda & Fernandes (2019). Esta seção apresenta e discute os resultados obtidos no experimento numérico realizado.

Foram utilizados na simulação os parâmetros  $T_{\text{amb}} = 25^\circ\text{C}$ ,  $t_1 = 1\text{h}10\text{min}$ ,  $t_2 = 1\text{h}30\text{min}$ ,  $t_3 = 2\text{h}$  e  $t_4 = 2,7\text{h} = 10^4\text{s}$  (ver Subseção 2.2), além dos ganhos apresentados no final da Subseção 2.5. O sinal de referência suavizado foi construído com base nas rampas e patamares do experimento predecessor, ou seja, com as inclinações  $0,1^\circ\text{C/s}$  e  $0,17^\circ\text{C/s}$  e os patamares de  $450^\circ\text{C}$  e  $750^\circ\text{C}$ , conforme foi feito por Miranda & Fernandes (2019). Foram desprezados tanto os pequenos erros de medição apresentados pelo sensor de temperatura (ver item III. da Subseção 2.1) quanto os distúrbios em geral, na prática, caracterizados especialmente por i) aberturas da porta do forno mufla em operação, ato que, aliás, provoca um choque térmico que pode danificar o material refratário empregado como isolante térmico quando a temperatura da câmara de aquecimento é superior a  $400^\circ\text{C}$ , e ii) distúrbios acentuados e prolongados na tensão elétrica da rede que alimenta o equipamento.

As Figuras 4–7 apresentam alguns dos dados obtidos na simulação. As duas primeiras mostram respectivamente a resposta do sistema de controle em MF e o esforço de con-

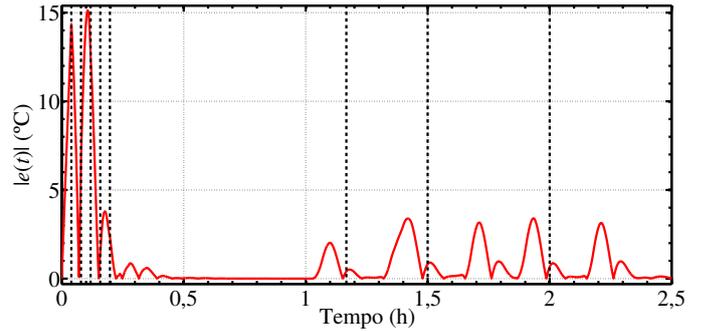


Figura 6. Erro absoluto de rastreamento. As linhas tracejadas têm o mesmo significado que na Figura 4.

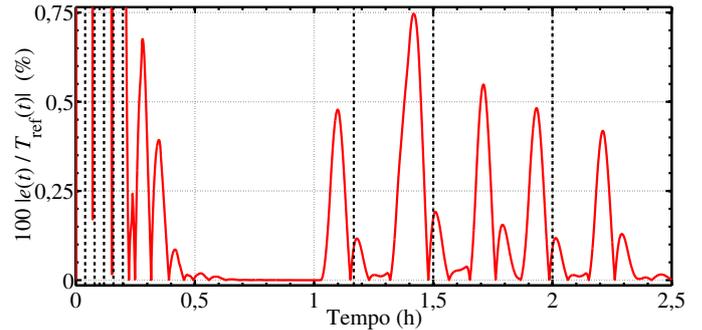


Figura 7. Erro absoluto percentual de rastreamento. As linhas tracejadas têm o mesmo significado que na Figura 4.

trole correspondente. As demais exibem os erros absolutos de rastreamento da trajetória de referência.

A observação da Figura 4 e da Figura 7 permite verificar o êxito no rastreamento da referência. O erro foi menor que 0,75%, isto após um intervalo inicial de aproximadamente 12min. Durante tal intervalo, a temperatura na câmara de aquecimento ainda estava baixa e, portanto, os erros de rastreamento, limitados a cerca de  $15^\circ\text{C}$  (ver Figura 6), são sem importância. Este erro relativamente elevado, mas inócua, é atribuído ao fenômeno de atraso de transporte da planta. Nota-se que os erros de regime permanente foram exponencialmente anulados tanto nos patamares quanto nas rampas, graças à ação antecipatória da PAR que apoia a ação do controlador PID. Segundo a Figura 5, não houve saturação do sinal de controle. As amplitudes mostradas na figura estão em conformidade com os dados experimentais produzidos por Miranda & Fernandes (2019), que entretanto foram omitidos no artigo citado.

Em comparação com os resultados apresentados em trabalhos similares, o desempenho alcançado pelo rastreador de trajetórias aqui proposto equipara-se ao de controladores baseados em técnicas de controle avançadas e inteligentes como, por exemplo, a lógica nebulosa, com a vantagem de ser mais simples de implementar e modificar.

Assim, considera-se que os objetivos expressos na Subseção 1.2 foram satisfatoriamente atingidos!

### 4. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um rastreador de trajetórias como alternativa para controlar a temperatura do forno mufla do Laboratório de Processos de Fabricação da Faculdade de Engenharia da UFJF. Ele satisfaz as especificações de es-

tabilidade e desempenho. Pode-se conseqüentemente concluir que os objetivos foram atingidos plenamente. Um trabalho anterior, dos mesmos autores deste, já tratou do assunto, mas deixou como sugestão para trabalhos futuros a busca pela melhoria do desempenho do controle de temperatura apresentado naquela ocasião. A propósito, o referido trabalho é uma boa fonte de referência para a implementação prática deste rastreador de trajetórias.

Pode-se concluir ainda, com base nos resultados obtidos, que tanto a modelagem da planta quanto a sintonia do PID foram satisfatórias.

Foram aqui apresentados e analisados apenas resultados simulados, dada a impossibilidade de executar os ensaios práticos planejados, porque as atividades presenciais na universidade permanecem suspensas por tempo indeterminado em razão da pandemia de Covid-19.

Fica mantida a mesma sugestão dada em Miranda & Fernandes (2019) para que trabalhos futuros se ocupem de desenvolver uma Interface Homem-Máquina (IHM) para dispositivos móveis, tais como celulares e *tablets*.

## REFERÊNCIAS

- Aguirre, L.A. (2015). *Introdução à identificação de sistemas. Técnicas lineares e não lineares aplicadas a sistemas: teoria e aplicação*. Editora UFMG, Belo Horizonte, MG, 4<sup>a</sup> edição.
- Antunes, G.F. & Fernandes, D.deA. (2019). Geração de rotas planares com curvaturas contínuas a partir de rotas geradas pelo método dos campos potenciais artificiais. Em *Anais do 14<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI) 2019*, volume 1, 907–913.
- Brooks, C.R. (1982). *Heat treatment, structure, and properties of nonferrous alloys*. American Society for Metals (ASM International), Novelty, EUA.
- Callister Jr., W.D. & Rethwisch, D.G. (2016). *Ciência e engenharia de materiais: uma introdução*. LTC — Livros técnicos e Científicos Editora Ltda., Rio de Janeiro, RJ, 9<sup>a</sup> edição.
- Costa Neto, P.L.deO. (2002). *Estatística*. Editora Edgard Blücher Ltda., São Paulo, SP, 2<sup>a</sup> edição.
- Egeland, O. & Gravdahl, J.T. (2002). *Modeling and simulation for automatic control*. Marine Cybernetics, Trondheim, Noruega.
- Farouki, R.T. (2012). The Bernstein polynomial basis: a centennial retrospective. *Computer-Aided Geometric Design*, 29(6), 379–419.
- Franklin, G.F., Powell, J.D., & Emami-Naeini, A. (2009). *Feedback control of dynamic systems*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, EUA, 6<sup>a</sup> edição.
- Guerra, L.N.A. (2006). *Uso de compensador PID no controle da taxa de variação de temperatura em um forno elétrico a resistência*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), Departamento de Engenharia Elétrica.
- Hambali, N., Ang, A.A.R., Ishak, A.A., & Janin, Z. (2014). Various PID controller tuning for air temperature oven system. Em *IEEE International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Applications (IC-SIMA) 2014 — Malásia*.
- Khalil, H.K. (2002). *Nonlinear systems*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, EUA, 3<sup>a</sup> edição.
- Krauss, G. (2015). *Steels: processing, structure, and performance*. American Society for Metals (ASM International), Novelty, EUA, 2<sup>a</sup> edição.
- Kreyszig, E.O. (1989). *Introductory functional analysis with applications*, volume da *Coleção Wiley Classics Library*. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, EUA.
- Levien, R. (2008). The Euler spiral: a mathematical history. Relatório técnico UCB/EECS-2008-111, Universidade da Califórnia, Departamento EECS, Berkeley. URL <http://www.eecs.berkeley.edu/Pubs/TechRpts/2008/EECS-2008-111.html>. Acesso em: 01-Set-20.
- Lima, E.L. (2019). *Curso de análise — Vol. 1*, volume 1 da *Coleção Projeto Euclides*. Editora do Instituto de Matemática Pura e Aplicada (IMPA), Rio de Janeiro, RJ, 15<sup>a</sup> edição.
- Miranda, G.P.C.de. & Fernandes, D.deA. (2019). Controle de temperatura de um forno mufla. Em *Anais do 14<sup>o</sup> Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente (SBAI) 2019*, volume 1, 77–82.
- Neacă, A.M. (2012). Comparison between different techniques of controlling the temperature inside a resistive oven. Em *IEEE 16th International Conference on System Theory, Control and Computing (ICSTCC) 2012 — Romênia*, 1–6.
- Nelson, W. (1989). Continuous-curvature paths for autonomous vehicles. Em *Proceedings of the 1989 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA) — EUA*, volume 3, 1260–1264.
- Ogata, K. (2009). *Modern control engineering*. Prentice Hall, Inc., Upper Saddle River, EUA, 5<sup>a</sup> edição.
- Pereira, B.L.C., Carvalho, A.M.M.L., Oliveira, A.C., Santos, L.C., Carneiro, A.deC.O., & Magalhães, M.A.de. (2016). Efeito da carbonização da madeira na estrutura anatômica e densidade do carvão vegetal de Eucalyptus. *Ciência Florestal*, 26(2), 545–557.
- Ramirez-Laboreo, E., Sagues, C., & Llorente, S. (2016). Dynamic heat and mass transfer model of an electric oven for energy analysis. *Applied Thermal Engineering*, 93(25), 683–691.
- Santos, A.G., Costa, I.K.F., Santos, F.K.G., & Souza, C.P.de. (2015). Efeito do método de complexação combinando EDTA-citrato e coprecipitação em meio oxalato na síntese da SrCo<sub>0,8</sub>Fe<sub>0,2</sub>O<sub>3-δ</sub>. *HOLOS*, 3(0), 30–43.
- Serapião, L.A. (2016). *Type-2 fuzzy logic system applied to a temperature control of an electric oven*. Trabalho de conclusão de curso, Universidade Federal de Juiz de Fora (UFJF), Departamento de Engenharia Mecânica.
- Slotine, J.J.E. & Li, W. (2005). *Applied nonlinear control*. Pearson Education Taiwan Ltd., Taipei, Taiwan.
- Thoma, M. (2014). The Twiddle algorithm. URL <https://martin-thoma.com/twiddle/>. Acesso em: 01-Set-20.
- Thrun, S., Burgard, W., & Fox, D. (2006). *Probabilistic robotics*. MIT Press, Cambridge, EUA.
- Zambaldi, E.S. (2016). *Controle automatizado de fornos para tratamento térmico em aços*. Dissertação de mestrado, Universidade Federal de Lavras (UFLA), Departamento de Engenharia de Sistemas e Automação.
- Zambaldi, E.S., Magalhães, R.R., Barbosa, B.H.G., Trugilho, P.F., & Martins, M.B. (2015). Controle automatizado de baixo custo em fornos para tratamentos térmicos em aços. Em *I Congresso Mineiro de Engenharia e Tecnologia*, 562–568.