

## Controle de temperatura de um forno

Égonn Hendrigo Carvalho Silva<sup>1</sup>, Rodrigo Magalhães Alves<sup>2</sup>, José Carlos Rodrigues de Oliveira<sup>3</sup>

**Abstract** — This paper describes one application of the learning methodology “Motivation-by-Challenge” in a laboratory course for the Electrical and the Control & Automation Engineering curricula at UFMG, Brazil. The students are exposed to a challenge, having to solve a problem for a set of performance specifications. Small scale plants are presented or proposed to be constructed. This work deals with temperature control of an electric oven, with all the hardware implementation done in analog mode. The static characteristic of the sensor is determined, showing good linearity. The process is constructed and modeled, using a black-box method, through the observation of its step response. A Proportional plus Integral controller is designed for closed-loop operation, implemented and tested, showing good dynamic response to set-point changes. Perturbations are introduced, and the controller recuperates the desired temperature. The challenge arrives to a good result, proving to be very motivating for the students.

**Index Terms** — Education in Electrical and in Control & Automation Engineering, Motivation-by-Challenge Methodology, Control Laboratory, Temperature Control.

### INTRODUÇÃO

O ensino de Controle é parte fundamental dos currículos de Engenharia Elétrica e de Engenharia de Controle e Automação no Brasil. No entanto, as metodologias correntes não apresentam nenhuma novidade para melhorar a aprendizagem, baseadas em técnicas de ensino e de avaliação convencionais. A metodologia de ensino “Motivação pelo Desafio” utilizada neste trabalho introduz um componente adicional, por motivar os alunos a terem uma participação mais ativa no processo. Nas aulas são propostos desafios específicos, em forma de problemas a serem resolvidos ao longo do semestre. Os alunos são, então, desafiados na busca de métodos e ferramentas, trabalhando em etapas e com o acompanhamento do professor, até que seja encontrada uma solução para o problema proposto [5].

O objetivo deste “desafio” foi desenvolver um projeto na disciplina “Laboratório de Controle e Automação I” do Curso de Engenharia Elétrica da UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil, que fosse interessante e instigante, buscando solucionar problemas inerentes à

construção de um processo térmico em escala reduzida e o controle de sua temperatura.

Tendo em vista esses propósitos, construiu-se o “forno”, constituído por uma caixa de madeira, com o objetivo de se controlar a temperatura nesse ambiente, além de se analisar o comportamento dessa variável perante perturbações. Um modelo miniaturizado deve cumprir seu caráter educacional e prover condições de análise semelhantes às que se encontram em processos industriais. Não se pode afirmar que o trabalho aqui apresentado modela a enorme complexidade desses processos, contudo a linha de raciocínio base deverá ser necessariamente a mesma.

### CONSTRUÇÃO DA PLANTA

#### Processo

O protótipo construído em laboratório pode ser visto na Figura 1. O forno é constituído por uma caixa, o circuito de comando está montado em *proto-board*, e o circuito de potência está fixado na base de madeira. Multímetros permitem as leituras das temperaturas de referência e real do processo.

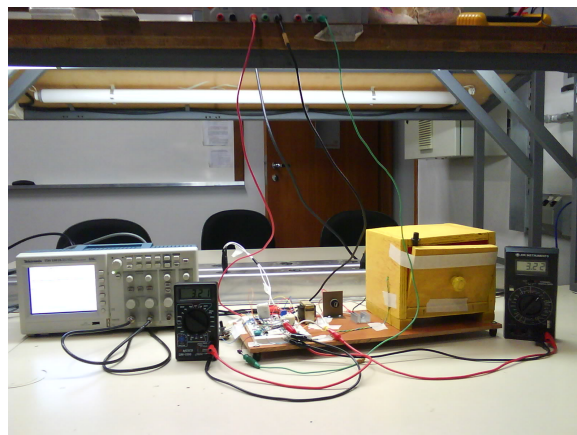


FIGURA 1  
FORNO ELÉTRICO E EQUIPAMENTOS.

O forno tem como fonte quente uma lâmpada incandescente de 60W, sendo que a energia cedida para esse ambiente é provida por um conversor eletrônico de potência,

<sup>1</sup> Égonn Hendrigo Carvalho Silva, Engenheiro Eletricista, [egonnh@gmail.com](mailto:egonnh@gmail.com)

<sup>2</sup> Rodrigo Magalhães Alves, Engenheiro Eletricista, [romalves@gmail.com](mailto:romalves@gmail.com)

<sup>3</sup> José Carlos Rodrigues de Oliveira, Professor Associado da Escola de Engenharia da UFMG, Campus Pampulha, Bloco 1, sala 2604, Av. Antônio Carlos, 6627, 31270-901 – B.Horizonte – MG – Brasil, [jcarlosr@ufmg.br](mailto:jcarlosr@ufmg.br)

no caso um gradador de tensão. A partir de uma rede de corrente alternada de 127V, 60Hz, o ajuste do ângulo de disparo no gradador modula a potência elétrica entregue à lâmpada e esta, por sua vez, fornece calor ao forno e, conseqüentemente, controla a sua temperatura.

### Gradador

O gradador de tensão tem como finalidade variar o valor eficaz da tensão alternada aplicada à lâmpada, através do disparo de um *triac*. A configuração utilizada apresenta como vantagens o fato de ser constituída por um circuito simples e compacto, e por ser de baixo custo. O fluxo de potência é controlado pela variação do ângulo de disparo dos pulsos enviados, tanto para o semiciclo positivo quanto para o negativo da senoide, porém defasados de 180° [1]. A Figura 2 mostra o circuito de potência do gradador, sendo que Z representa a sua carga, no caso, a lâmpada elétrica.

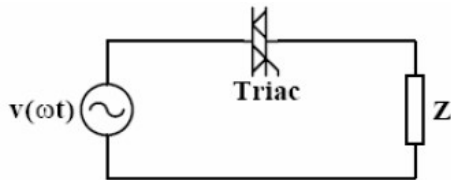


FIGURA 2  
CIRCUITO ELÉTRICO DO GRADADOR.

A forma de onda da tensão na carga é mostrada na Figura 3, onde  $\alpha$  é o ângulo de disparo do triac.

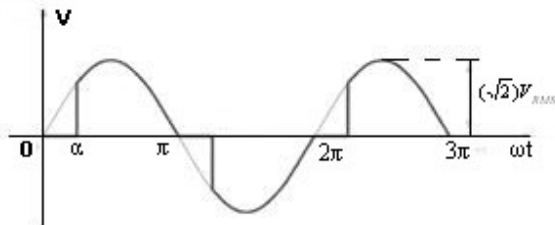


FIGURA 3  
TENSÃO APLICADA NA CARGA.

O circuito integrado TCA 785 [6] tem a função específica de controlar o ângulo de disparo de tiristores e triacs, permitindo que pulsos de comando sejam enviados entre 0° e 180°, alterando o valor eficaz da tensão na carga e fazendo com que a potência entregue a ela varie entre um máximo e zero [2].

Transformadores de pulso são usados no acoplamento e no isolamento galvânico dos circuitos de comando e de potência. Em geral são fabricados com núcleo de ferrite e invólucro plástico.

### Sensor de Temperatura

O chip LM35 [3] constitui um sensor de temperatura, calibrado em graus Celsius entre 0 e 100°. Sua tensão de saída varia linearmente com a temperatura a ser medida, exibe resolução de 0,25°C na faixa entre -55°C e 150°C, e opera com alimentação entre 4 e 30V, podendo ser usado em ambientes severos. Acoplado ao sensor está um circuito eletrônico, com a finalidade de proporcionar um ganho ao sinal de temperatura, de forma que sua tensão de saída varie entre 0V e 10V, e possa ser utilizada na realimentação do circuito analógico de controle.

### MODELAGEM DO PROCESSO EM MALHA ABERTA

O processo em malha aberta é representado por uma função de transferência  $G(s)$ , e é composto pelos circuitos de comando e de potência, pela caixa (forno) com a lâmpada e pelo sensor de temperatura. A Figura 4 apresenta o diagrama de blocos do processo em malha aberta, onde a temperatura ambiente foi omitida, e atua como perturbação.

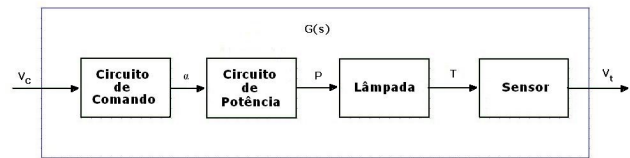


FIGURA 4  
DIAGRAMA DE BLOCOS DO PROCESSO EM MALHA ABERTA.

O método empregado na modelagem do processo foi o da “caixa preta”, onde um degrau na tensão de comando  $V_C$  varia bruscamente o ângulo de disparo do gradador, aplicando uma variação instantânea de potência ao forno. A Figura 5 ilustra a forma de onda obtida para o sinal de temperatura  $V_T$  normalizado, bem como a validação do modelo através da simulação da resposta.

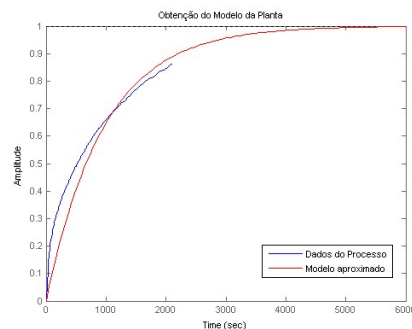


FIGURA 5  
RESPOSTA DO PROCESSO A UM DEGRAU DE COMANDO NA POTÊNCIA APLICADA.  
Definindo-se a função de transferência da planta (incluídos o gradador e o sensor) como:

$$G(s) = \frac{V_T(s)}{V_C(s)} \quad (1)$$

coletaram-se dados de temperatura a cada 10 segundos, por 35 minutos, e traçou-se a curva experimental da figura acima. Pelo seu formato, julgou-se possível aproximar o comportamento dinâmico da planta por um modelo de primeira ordem. Sabendo-se que a constante de tempo T é igual ao intervalo de tempo onde o sinal alcança 63% de sua variação, obteve-se a expressão:

$$G(s) = \frac{k}{(1 + Ts)} = \frac{-1,44}{(1 + 960s)} \quad (2)$$

onde a constante de tempo T é igual a 960s (ou 16 min) e o ganho estático global é -1,44V/V. O sinal negativo no ganho representa a dinâmica inversa existente, já que um aumento na tensão de comando  $V_C$  estabelece um ângulo de disparo maior no triac, reduzindo a potência aplicada ao forno e, conseqüentemente, a sua temperatura.

A mesma Figura 5 apresenta também o sinal de temperatura simulado com o modelo obtido, para uma mesma variação em degrau na entrada. Embora a validação do modelo deva ser feita preferencialmente em outra massa de dados, pode-se considerar que ele representa com razoável fidelidade o comportamento dinâmico da planta. É importante lembrar que se trata de um processo com dinâmica muito lenta, razão pela qual não se obtiveram pontos experimentais até o estabelecimento completo do regime permanente.

## FUNCIONAMENTO EM MALHA FECHADA

Desejou-se, em seguida, controlar o processo em malha fechada. Para tanto foi implementado, na montagem experimental e de forma analógica, o equivalente ao diagrama da Figura 6, utilizando-se um controlador PI (Proporcional-Integral) [4].

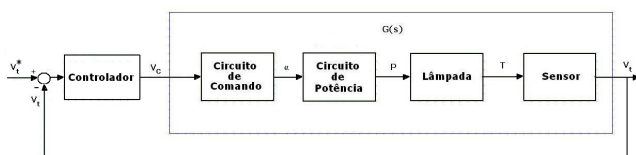


FIGURA 6  
DIAGRAMA DE BLOCOS DO  
PROCESSO EM MALHA FECHADA.

A função de transferência do controlador é dada por:

$$G_C(s) = \frac{V_C(s)}{V_E(s)} = k_P \frac{(1 + T_i s)}{T_i s} = 0,179 \frac{(1 + 400s)}{400s} \quad (3)$$

onde o ganho proporcional:

$$k_P = 0,179$$

e a constante de tempo integral:

$$T_i = 400 \text{ segundos}$$

foram obtidos pelo Método do Lugar das Raízes, seguindo-se a especificação de que os polos de malha fechada tivessem um coeficiente de amortecimento igual ou maior que 0,707.

## Respostas Experimentais em Malha Fechada

Com a planta em regime estacionário e a temperatura estável em 33,0°C no interior do forno, foi aplicado um degrau de referência positivo de 9°C, levando-se o *set-point* para 42,0°C. Como o sistema mostrou-se lento, resolveu-se aumentar o valor do ganho proporcional  $k_P$  (do controlador) para 5,0. A resposta experimental do sistema encontra-se representada na Figura 7.

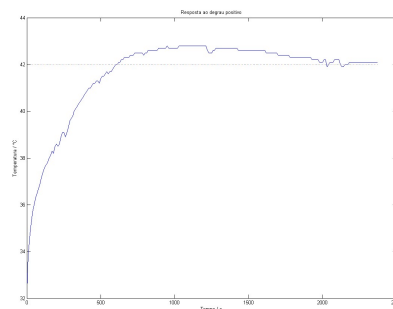


FIGURA 7  
RESPOSTA EXPERIMENTAL AO DEGRAU  
POSITIVO DE TEMPERATURA.

Foram obtidos um percentual de ultrapassagem (*overshoot*) de 8,9% e um tempo de acomodação de 2000s (33 minutos), este último aproximadamente igual à metade do valor em malha aberta.

Em seguida, observou-se a resposta ao degrau de referência negativo, com o *set-point* inicial de 42,0°C tendo sido abaixado para 33,0°C. De acordo com a Figura 8, foram obtidos um percentual de *overshoot* de 13% e um tempo de acomodação de 2000s, isto é, um pequeno aumento no sobresinal e um tempo de resposta igual àquele do teste com degrau positivo.

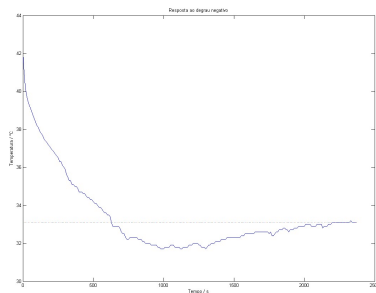


FIGURA 8  
RESPOSTA EXPERIMENTAL AO DEGRAU  
NEGATIVO DE TEMPERATURA.

Para a análise de robustez (do controle em malha fechada) a perturbações na planta, foi ligado o sistema de ar condicionado do laboratório, em sua capacidade máxima, com seu fluxo de ar direcionado para o forno. Este, que inicialmente tinha a temperatura estabelecida em 33,0°C, começou a ceder mais calor ao ambiente. O controlador, por sua vez, procurou compensar esse déficit de calor que resultou em queda de temperatura, solicitando do gradador mais potência de aquecimento. Como pode ser notado na Figura 9, o valor de temperatura de 33,0°C foi restabelecido em menos de 2000s.

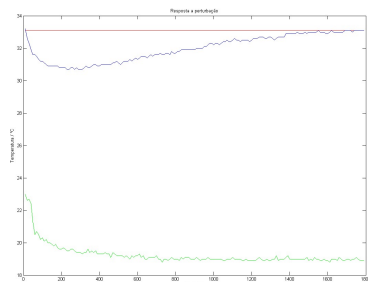


FIGURA 9  
RESPOSTA EXPERIMENTAL À  
PERTURBAÇÃO NA TEMPERATURA.

## ANÁLISE DOS RESULTADOS E CONCLUSÕES

A partir das respostas experimentais, percebeu-se que o ajuste do ganho proporcional  $k_p$  foi adequado, tendo-se em vista que não houve oscilações demasiadas, nem mesmo *overshoots* muito grandes. A constante de tempo integral  $T_i$  mostrou-se adequada na prática, apesar de deixar a resposta um pouco mais lenta. Como esperado, a ação integral de controle diminuiu significativamente o erro estacionário do sistema. Para variações na referência de temperatura, os tempos de assentamento foram longos, mas dentro dos padrões de controle de temperatura e das limitações da planta.

O sistema respondeu de forma satisfatória à perturbação externa. Foi observado que a potência demandada pelo forno aumentou em relação àquela requerida em condições normais, mas ficou ainda em torno de 50% do seu valor máximo, ou seja, o sistema ainda conseguiria responder a perturbações com temperaturas externas menores.

Valê ressaltar a boa resolução obtida no controle de temperatura, na faixa de décimos de graus Celsius, com um erro estacionário máximo de 0,1°C sendo que, na maioria dos processos industriais, é requerida uma resolução de 1°C. A precisão das medições depende do sensor e das incertezas no instrumento utilizado para calibração.

Este projeto desafio trouxe enorme aprendizado, desde o seu início até a apresentação final. A escolha do projeto em si já foi difícil e, a partir do que se tem na indústria, concluiu-se que o controle de temperatura seria bastante interessante. Foi necessário pensar e projetar o forno utilizado. A parte de construção da planta (corte de madeira, pintura, abertura de furos) foi de grande aprendizado, experiência única no Curso de Engenharia Elétrica. Precisou-se de trabalho integrado da dupla de alunos e, em muitos momentos, recorrer ao professor para orientação.

O controle de temperatura exigiu conhecimentos de Eletrônica de Potência. Essa integração de disciplinas, apesar de desafiadora foi gratificante, pois verificou-se como a eletrônica pode ser empregada em aplicações muito úteis. Durante todo o tempo o grupo se viu diante de problemas, e foi preciso estudo e reflexão sobre a Teoria de Controle. Este *desafio* possibilitou grande enriquecimento na cultura de engenharia dos alunos e aperfeiçoou-lhes a capacidade de resolver problemas de vários tipos.

## REFERÊNCIAS

- [1] Cortizo, P.C., Circuito para Comando de Gradador, Notas de Aula, Escola de Engenharia da UFMG, dez. 2006.
- [2] Mehl, E.L.M., Projeto e Construção de um Gradador Senoidal. UFPR, [www.eletrica.ufpr.br/mehl/te067/gradador/gradador.pdf](http://www.eletrica.ufpr.br/mehl/te067/gradador/gradador.pdf), acesso em 2011.
- [3] LM35 Precision Centigrade Temperature Sensors, [www.national.com](http://www.national.com), acesso em 2011.
- [4] Oliveira, J.C.R., Implementação Analógica de Controlador Proporcional Integral, Notas de Aula, Escola de Engenharia da UFMG, nov. 2006.
- [5] Oliveira, J.C.R., Scott, L.G.A., Laboratório de Controle Baseado na Metodologia “Motivação pelo Desafio”, ICECE 2013 – International Conference on Engineering and Computer Education, Luanda, Angola, 03 a 06 de março de 2013.
- [6] Siemens Semiconductor Group, TCA785 Phase Control IC, [www.siemens.com](http://www.siemens.com), acesso em 2011.