

## Desenvolvimento de um kit didático para o controle de temperatura baseado em uma célula de efeito Peltier

### RESUMO

**Daniel Izumi Katagiri**  
[izumi.katagiri@gmail.com](mailto:izumi.katagiri@gmail.com)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Cornélio Procópio,  
Paraná, Brasil

**Emerson Ravazzi Pires da Silva**  
[emersonr@utfpr.edu.br](mailto:emersonr@utfpr.edu.br)  
Universidade Tecnológica Federal  
do Paraná, Cornélio Procópio,  
Paraná, Brasil

**OBJETIVO:** Desenvolver um protótipo de um kit didático para o controle de temperatura. **MÉTODOS:** Monitorar a temperatura da face fria da célula Peltier utilizando o software Matlab/Simulink juntamente com a plataforma arduino; modelar matematicamente a planta e aplicar técnicas de controle de maneira a manter a temperatura em um valor de setpoint desejado. **RESULTADOS:** Com base nas técnicas aplicadas foi possível manter a temperatura próxima da referência estipulada. **CONCLUSÕES:** O trabalho mostrou-se bem sucedido e o protótipo foi validado ao final das análises.

**PALAVRAS-CHAVE:** Kit didático. Controle. Célula termoeletrica. Arduino. Matlab/Simulink.

## INTRODUÇÃO

O uso de kits didáticos dentro dos cursos de engenharia tem se mostrado cada vez mais intenso e importante. Isso se deve ao fato de que, no processo de aprendizagem, o aluno fixa, de maneira acentuada, o conhecimento quando é confrontado a utilizar o que aprendeu dentro da sala de aula na prática. Desse modo, o presente trabalho visa a construção de um kit didático baseado em uma célula de efeito Peltier com o intuito de analisar e controlar a temperatura.

### 1 CÉLULA TERMOELÉTRICA (EFEITO PELTIER)

Também chamada de célula de Peltier, é uma pastilha que utiliza o efeito Peltier para criar uma diferença de temperatura entre suas duas faces (NESARAJAH, M.; FREY, G., 2016). A Figura 1 mostra o funcionamento da célula.

### 2 PLATAFORMA ARDUINO

Arduino é uma plataforma de hardware de código aberto. Nela pode-se adicionar diversos tipos de componentes eletrônicos direcionados e programados para uma determinada atividade (CAVALCANTE et al., 2014).

### 3 SISTEMAS DE PRIMEIRA ORDEM

Sistemas de primeira ordem são sistemas que obedecem ao modelo matemático mostrado na Equação (1).

$$P(s) = \frac{K}{\tau s + 1}. \quad (1)$$

O desafio da modelagem matemática dessa categoria de sistemas é encontrar os parâmetros  $K$ , chamado de ganho do sistema, e  $\tau$ , denominado constante de tempo do sistema (NISE, 2012).

### 4 CONTROLE LIGA/DESLIGA (ON/OFF)

Trata-se de um dos métodos mais rudimentares de controle. Esse tipo de controle é comumente utilizado quando o elemento de controle possui somente duas posições: totalmente aberto ou totalmente fechado. Segundo Ogata (2010, p.19), devido à sua simplicidade e custo, esse tipo de controle é bastante utilizado em sistemas de controle domésticos. No entanto, sua resposta é ruim, visto que o sistema passa a maior parte do tempo fora do valor de referência.

### 5 CONTROLE PROPORCIONAL (P)

O controle proporcional, como o nome sugere, tem sua ação de controle diretamente proporcional ao erro. Ogata (2010, p.19) afirma que “[...] o controlador proporcional é essencialmente um amplificador com ganho ajustável”. O ganho de controle proporcional,  $K_p$ , pode mudar a localização do pólo do sistema e, como consequência, altera, também, a constante de tempo do sistema, de maneira que quanto maior o valor de  $K_p$  mais rápido o sistema atinge o regime permanente. Analisando, ademais, quanto maior for o ganho  $K_p$  menor será o erro em regime estacionário, todavia ele sempre existirá.

## 6 CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL (PI)

Chamado de controle PI, o controle apresenta em sua ação de controle duas diferentes proporcionalidades em relação ao sinal que sai do controlador: a ação proporcional ao erro e a integral do erro. Diferente da ação proporcional, que não elimina o erro estacionário, a ação integral faz com que o sistema consiga atingir o valor de referência. Em contrapartida, a ação integral não produz uma resposta tão rápida quanto a ação proporcional (FRANKLIN et al., 2013).

## METODOLOGIA

O protótipo foi desenvolvido utilizando uma pastilha termoelétrica (Peltier), uma placa Arduino juntamente com o software Matlab/Simulink para realizar a leitura e atuação da planta, um sensor de temperatura LM35, um transistor TIP122 para o chaveamento do sistema e um filtro passa-baixas analógico composto de uma resistência de  $1k\Omega$  e um capacitor eletrolítico de  $47\mu F$ . Além desses, é necessário que célula de Peltier esteja acoplada à um dissipador de calor e uma ventoinha, pois as altas temperaturas, as quais ela atinge, podem danificá-la.

### 1 IDENTIFICAÇÃO DO SISTEMA

Para identificar o sistema, aplica-se um degrau unitário à sua entrada, ou seja, o sistema é ligado e analisa-se sua resposta. A partir da resposta, são calculados os parâmetros  $K$  e  $\tau$  do sistema. O valor de  $K$  é calculado pela variação máxima da temperatura, isto é, a temperatura inicial e a temperatura em regime permanente. Já  $\tau$  é o tempo que o sistema leva para alcançar 63% da resposta em regime estacionário.

### 2 IMPLEMENTANDO O CONTROLE LIGA/DESLIGA (ON/OFF)

O controle on/off foi implementado da seguinte maneira: após escolhida uma temperatura de referência, no caso  $10,26^{\circ}C$  o sistema foi ligado, e, a cada iteração, a temperatura lida era comparada com a de referência. Caso a temperatura do sistema fosse igual ou menor que  $10,26^{\circ}C$  o sistema era desligado, caso contrário, ele continuaria ligado.

### 3 IMPLEMENTANDO O CONTROLE PROPORCIONAL

Para implementar o controle proporcional, primeiro calcula-se o erro entre o valor atual e o desejado. Em seguida, o erro é multiplicado pelo ganho  $K_p$ , gerando o esforço de controle. Pelo fato do sistema aceitar apenas os valores “ligado” e “desligado”, 1 ou 0, a modulação PWM (*Pulse Width Modulation* ou modulação por largura de pulso) é utilizada como sinal de controle, onde os valores entre 0 e 1 definem o ciclo de trabalho.

O arduino gera sinais PWM com valores entre 0 e 255, onde 0 é um sinal com ciclo de trabalho de 0% e, por outro lado, 255 é o ciclo de trabalho de 100%. Deste modo, faz-se necessário o uso do bloco *Saturation*. Este faz com que as informações que serão traduzidas em sinal PWM estejam dentro dessa faixa de valores. O mesmo bloco é utilizado na implementação do controle PI.

#### 4 IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE PROPORCIONAL-INTEGRAL

Em adição ao controle proporcional, o controle proporcional-integral agrega a integral do erro ao sinal de controle. Da mesma maneira que o controle do tipo P, a ação de controle é enviada ao sistema por um sinal PWM.

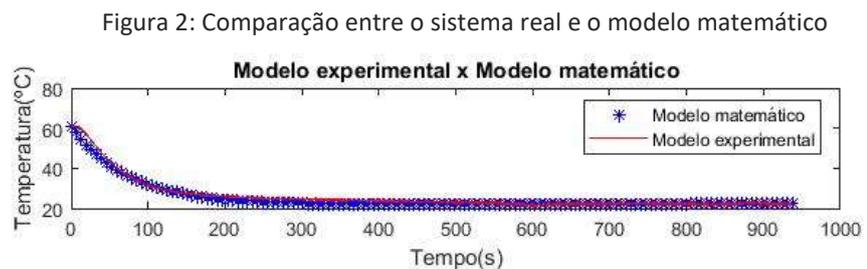
### RESULTADOS

#### 1 OBTENÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO DO SISTEMA

Considerando a curva de reação, cálculos foram feitos para obter o modelo matemático aproximado do sistema. Por se tratar de um sistema que diminui a temperatura, o ganho do sistema será negativo. A variação total de temperatura foi 48,66°C enquanto que o sistema demorou cerca de 52,43 segundos para alcançar 63% da variação total. Com esses valores, foi possível extrair o modelo matemático de primeira ordem do sistema, conforme a Equação (2).

$$P(s) = \frac{-48,66}{52,43s+1}. \quad (2)$$

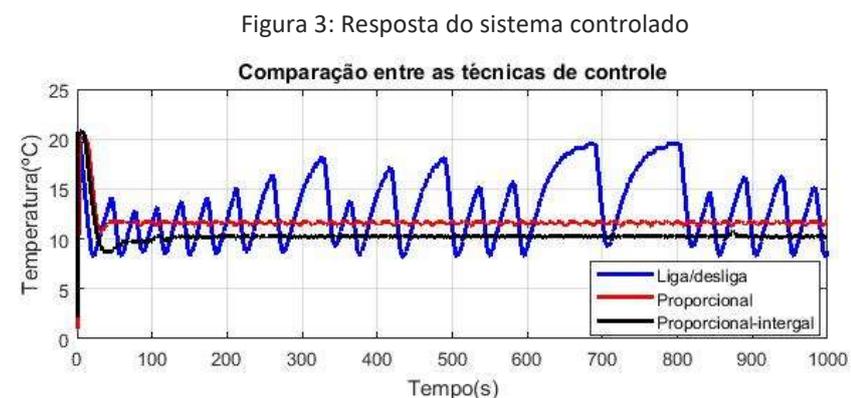
A Figura 2 compara a resposta do sistema real e a resposta do modelo matemático simulado ao degrau unitário.



Fonte: Autoria própria (2017).

#### 2 RESPOSTA DO SISTEMA ÀS TÉCNICAS DE CONTROLE IMPLEMENTADAS

A Figura 3 apresenta a comparação entre as respostas das técnicas aplicadas.



Fonte: Autoria própria (2017).

O valor desejado (referência) para todo os testes foi de 10,26°C Para o controlador P, foi escolhido o valor de ganho  $K_p = 50$ . Já para o controlador PI,

foram escolhidos os ganhos  $K_p = 25$  e  $K_i = 0,75$ . Inicialmente, esses valores foram escolhidos empiricamente.

## CONCLUSÕES

O modelo matemático, extraído a partir do dados experimentais, apresenta-se como uma boa aproximação do modelo real.

Quanto às respostas aos controles utilizados, o controle liga/desliga se mostrou bastante ineficiente, como esperado, uma vez que a temperatura do sistema passa a maior parte do tempo fora da temperatura desejada.

Já o controle proporcional apresentou uma resposta mais estável, todavia, observa-se que ele apresenta um erro em regime permanente, mesmo que bastante próximo do valor desejado. O controle proporcional-integral, por sua vez, exibiu a melhor resposta em regime permanente, dentre os controles estudados.

Sendo assim, o estudo atingiu seu objetivo, visto que um protótipo foi desenvolvido, baseado nas tecnologias escolhidas. Três técnicas de controle foram testadas para validação do protótipo e tais técnicas mostraram resultados esperados com a literatura.

Como desenvolvimentos futuros, são propostos a melhoria do protótipo e a implementação de outras técnicas de controle mais avançadas.

---

## Development of a Peltier cell based temperature control teaching kit

### ABSTRACT

**OBJECTIVE:** To develop a prototype of a didactic control kit. **METHODS:** Monitor the cold face temperature of the Peltier cell and, using the Matlab software and the Arduino platform, mathematically model the plant and apply control techniques in order to maintain the temperature at a desired value. **RESULTS:** The applied techniques showed the desired behavior. **CONCLUSIONS:** The work was successful and the prototype was validated at the end of the analysis.

**KEYWORDS:** Teaching kit. Control. Peltier cell. Arduino. Matlab.

---

## REFERÊNCIAS

BOYLESTAD, R. L.; NASHELSKY, L. **Dispositivos eletrônicos**. 11ª ed. São Paulo, Pearson Education do Brasil Ltda. 2013.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 5ª ed. São Paulo, Pearson Prentice Hall. 2010.

NISE, N. S. **Engenharia de Sistemas de Controle**, 6 ed. Rio de Janeiro, LTC Editora, 2012.

Franklin, G. F., Powell, J. D. and Emami-Naeini, A. **Sistemas de Controle para Engenharia**, 6 ed. Porto Alegre, Bookman editora, 2013.

CAVALCANTE, M. M., SILVA, J. L. de S., VIANA, E. C., DANTAS, J. R. **A plataforma Arduino para fins didáticos**: Estudo de caso com recolhimento de dados a partir do PLX-DAQ. Congresso da Sociedade Brasileira de Computação. Brasília, DF, Brasil. 2014.

NESARAJAH, M.; FREY, G. **Thermoelectric Power Generation**: Peltier Element versus Thermoelectric Generator. IEEE. Saarbrücken, Alemanha. 2016.

**Recebido:** 31 ago. 2017.

**Aprovado:** 02 out. 2017.

**Como citar:**

KATAGIRI, D. I. et. al. Desenvolvimento de um kit didático para o controle de temperatura baseado em uma célula de efeito Peltier. In: SEMINÁRIO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA E TECNOLÓGICA DA UTFPR, 22., 2017, Londrina. **Anais eletrônicos...** Londrina: UTFPR, 2017. Disponível em: <<https://eventos.utfpr.edu.br/sicite/sicite2017/index>>. Acesso em: XXX.

**Correspondência:**

Daniel Izumi Katagiri

Avenida Alberto Carazzai, número 460, Centro, Cornélio Procópio, Paraná, Brasil.

**Direito autoral:**

Este resumo expandido está licenciado sob os termos da Licença Creative Commons-Atribuição-Não Comercial 4.0 Internacional.

