

## COSTRUÇÃO E MODELAGEM DE UM SISTEMA TÉRMICO DIDÁTICO DE BAIXO CUSTO COM MATERIAIS RECICLADOS PARA CONTROLE DE TEMPERATURA UTILIZANDO ARDUINO

**Débora de Abreu Ferreira** – deboraabreuferreira@hotmail.com\*

**Rafael Augusto Dias Rezende** – rafael.augusto.d.r@gmail.com\*

**Caio Queiroz Silva** – caio.que98@hotmail.com\*

**Armando Tadao Gomes Nakamaru** – tadaonakamaru@gmail.com\*

**Orlando Fonseca Silva** – orfosi@ufpa.br \*

Universidade Federal do Pará, Instituto de Tecnologia, Faculdade de Engenharia Elétrica e Biomédica – Programa de Educação Tutorial de Engenharia Elétrica. \*

Rua Augusto Corrêa, 1 - Guamá\*

66075-110 – Belém – Pará\*

**Resumo:** Neste trabalho foi desenvolvido um sistema térmico didático de baixo custo, construído com materiais reciclados, para auxiliar no ensino em aulas laboratoriais da disciplina Sistemas de Controle no curso de Engenharia Elétrica. O protótipo consiste em uma estrutura montada de madeira que faz o suporte de um tubo PVC com ventilação forçada por meio de um mini ventilador (cooler de computador), juntamente com uma resistência de aquecimento, sensor de temperatura e um microcontrolador Arduino UNO, que se comunica via USB com o software do Arduino no computador. Esse software possibilita a identificação dos parâmetros do sistema, bem como o controle em malha fechada da temperatura. Foram realizados testes em malha aberta para comprovar seu funcionamento, eficácia e boa mobilidade para uso em aulas de laboratório. Após a etapa de desenvolvimento do protótipo, fez-se uso de abordagens matemáticas para modelar o sistema, determinando uma função de transferência que representasse matematicamente seu comportamento. Através de simulação no software MATLAB, verificou-se que a função encontrada possui as mesmas características dinâmicas do sistema real. Em seções finais, projetou-se e implementou-se no sistema real, um controlador digital do tipo proporcional (P), registrando as repostas em malha fechada para cada parâmetro estipulado durante o projeto. De modo geral, o protótipo mostrou-se eficiente pois, além do baixo custo por ser constituído de materiais reutilizáveis, este é de fácil mobilidade e permite demonstrações do uso de controladores clássicos, que apresentaram desempenho satisfatório nesta aplicação comprovando conceitos teóricos através dos experimentos.

**Palavras-chave:** Sistemas Térmicos, Materiais Reutilizáveis, Microcontroladores, Controladores, Simulação Computacional.

### 1 INTRODUÇÃO

Ao longo de sua história, o ser humano constantemente buscou a solução de seus problemas na manipulação de processos já existentes na natureza. Neste sentido, o uso de técnicas de controle esteve por trás dos mais diversos avanços tecnológicos da civilização.

(NISE, 2012). O controle automático tornou-se assim, essencial em operações industriais para controle de pressão, temperatura, umidade, viscosidade e fluxo em processos industriais. (OGATA, 2005). A prática de experimentos em salas de aulas torna o aprendizado mais eficiente, portanto muitos educadores estão cada vez mais aplicando técnicas de controle em sistemas didáticos durante as aulas (GOMES, 2011). O estudo dos parâmetros de um sistema permite que o aluno observe na prática os conceitos relacionados a eletrônica, circuitos elétricos, instrumentação, sistemas de controle e técnicas de programação, além da percepção de fenômenos físicos.

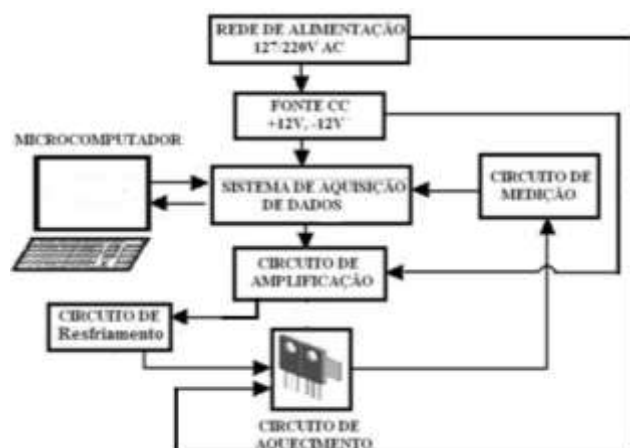
Uma utilização mais intensa das práticas laboratoriais dentro do processo educativo, no entanto, enfrenta problemas que variam de um equívoco na escolha do equipamento educacional até situações operacionais, como os custos associados com a aquisição, operação, manutenção e atualização dos equipamentos de laboratório (GOMES, 2011). Em consequência dessa situação de falta de equipamentos apropriados, surge a necessidade de encontrar alternativas para um melhor e mais intenso aproveitamento das práticas laboratoriais no processo de ensino e aprendizagem em engenharia. Como alternativa, existe a construção de protótipos que sejam didáticos e que envolvam baixos custos de produção, com a utilização de materiais reutilizáveis.

Assim, o presente trabalho tem o objetivo de realizar a construção de um sistema térmico didático utilizando materiais acessíveis e reaproveitáveis, juntamente com a identificação do sistema, ou seja, a determinação de seu modelo matemático e aplicar técnicas de controle clássico para melhorar seu desempenho, através de ferramentas computacionais e experimentais. Considerando ainda que um sistema térmico com aquecimento pela dissipação de calor através de uma resistência e resfriamento pela ação de um *cooler*, é um sistema dinâmico relativamente simples e intuitivo, sendo assim bem atraente para demonstrações sobre a teoria de sistemas de controle para alunos de graduação.

## 2 CONSTRUÇÃO E FUNCIONAMENTO

Uma planta é a parte de um equipamento, um conjunto de itens de uma máquina, que funcionam conjuntamente, cuja finalidade é desempenhar uma dada operação (OGATA, 2005). A Figura 1 ilustra um esquema dos itens do processo, caracterizando os circuitos envolvidos que compõe a planta escolhida a ser desenvolvida e analisada neste trabalho.

Figura 1 – Diagrama esquemático do Sistema Térmico.



Fonte: Adaptado de Vilarindo (2009)

## 2.1 Base e suporte

A construção do protótipo teve como parâmetro básico a necessidade de um equipamento versátil, que pudesse ser utilizado durante aulas laboratoriais. A mobilidade, facilidade de utilização, baixo custo foram fatores fundamentais para seu desenvolvimento. Visando o uso de materiais reutilizáveis, foram coletados: um tubo PVC, com cerca de 30 centímetros de comprimento e diâmetro de 10 centímetros, com dois furos, que têm a finalidade do encaixe do equipamento usado para o aquecimento e do equipamento de medição; uma tampa de PVC; três placas de madeira, reaproveitadas de um móvel antigo.

As duas placas de suporte foram cortadas no mesmo formato do tubo para facilitar seu encaixe e posteriormente fixadas na terceira placa, funcionando assim como sustentação dos equipamentos envolvidos. A tampa de PVC em uma das extremidades do tubo auxilia no processo de aquecimento ao evitar troca de calor entre o interior do tubo e o meio externo, assim o aquecimento ocorre mais rapidamente. Esse conjunto é exibido na Figura 2.

Figura 2 – Interior do tubo, base e suporte montados.



Fonte: Autores

## 2.2 Geração do calor e resfriamento

O elemento para geração de calor no sistema é composto por uma resistência de aquecimento de um ferro de solda em desuso, objetivando reaproveitamento de equipamentos eletrônicos. O ferro de solda do tipo elétrico e tem como princípio de funcionamento a transformação de corrente elétrica em calor. A resistência foi fixada no interior tubo e a energia térmica dissipada neste provoca aquecimento do ar ali presente. Após conectada na rede elétrica, há circulação de corrente elétrica pela resistência, a temperatura começa a aumentar gradativamente no interior do tubo até que a potência dissipada estabilize. Assim, tem-se uma variação de temperatura no interior do tubo. Já para realizar o resfriamento do sistema, foi utilizado um mini ventilador, *cooler*, muito recorrente para resfriamento de computadores. O escolhido para o protótipo foi um *cooler* intel de 12V, retirado de uma fonte de computador sem funcionamento, que possui 4 fios. Cada fio apresenta uma função, o amarelo é o da tensão de alimentação, o preto é o ligado ao terra, o verde e azul são fios de controle, usados para controlar a velocidade e a rotação. Para o caso do protótipo construído neste trabalho, será usado apenas o de controle da velocidade do *cooler*. A Figura 3 mostra o par composto por: (a) resistência de aquecimento e (b) *cooler*.

Figura 3 – (a) Resistência de aquecimento e (b) *cooler* 12V.



Fonte: Autores.



### 2.3 Sensor de temperatura

Para a captura da variação de temperatura, optou-se pelo sensor tipo LM35. Este foi escolhido por ser de baixo custo, ter uma boa faixa linear de medição, ser de fácil comunicação com microcontroladores e não necessitar de calibração externa para fornecer valores com exatidão, além de já proporcionar os valores de temperatura em graus Celsius. O LM35, fabricado pela *National Instruments*, possui precisões de  $\pm 0,25^{\circ}\text{C}$  para a faixa de valores de  $0^{\circ}\text{C}$  a  $40^{\circ}\text{C}$  e  $\pm 0,75^{\circ}\text{C}$  para valores de  $-55^{\circ}\text{C}$  a  $+150^{\circ}\text{C}$ , com tensão de operação de 4V a 30V. Através do catálogo de informações (*datasheet*) percebe-se que o sensor apresenta uma tensão de saída linear relativa a temperatura, com um fator de escala de  $10\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  (NATIONAL INSTRUMENTS, 2009).

### 2.4 Microcontrolador

Para a aplicação, foi utilizado o Arduino UNO, uma placa de prototipagem *open source*, ou seja, projetos nela criados são de domínio público. A programação do Arduino é feita através de um ambiente de desenvolvimento próprio onde utiliza-se de uma linguagem de programação também própria, semelhante ao C/C++. O Arduino consegue se comunicar com o computador através da porta USB. Essa comunicação se dá através do Monitor Serial do Ambiente Integrado de Desenvolvimento do Arduino (IDE). (ARDUINO UNO, 2018). Somente o Arduino, porém, não é capaz de ativar o *cooler*, pois sua tensão máxima fornecida é de 5V, enquanto o *cooler* necessita de tensão e corrente maiores para operar. Devido a este fato, é necessário a amplificação do sinal de tensão que se aplicará no mini ventilador. Dessa forma, foi utilizada a *Arduino Shield Motor Driver 2x2A*, placa que conectada ao Arduino estende sua capacidade. Esta é capaz de controlar a velocidade e o sentido de rotação de até dois motores pequenos de 7,5V a 20V (DC) com até 2A e pode ser acoplada diretamente sobre o Arduino UNO (ROBOCORE, 2018).

### 2.5 Funcionamento do sistema em malha aberta

Após a montagem do protótipo como descrita, o sistema ficou como mostrado na Figura 4. E assim, realizado ensaio em malha aberta, para testar seu funcionamento, juntamente com testes para verificar a mobilidade e praticidade do mesmo. Para o teste em malha aberta, sabe-se que variável do processo a ser controlada é a temperatura no interior do tubo, então sua medição é feita por um sensor LM35, posteriormente ocorrerá o processamento pelo Arduino e a atuação pelo acionamento ou não do *cooler*, assim, regulando a temperatura. Na extremidade aberta do tubo acoplou-se o *cooler*. A resistência foi colocada no tubo a 5cm do *cooler* e o sensor a 2cm da resistência.

Figura 4 – Suporte e base montados.



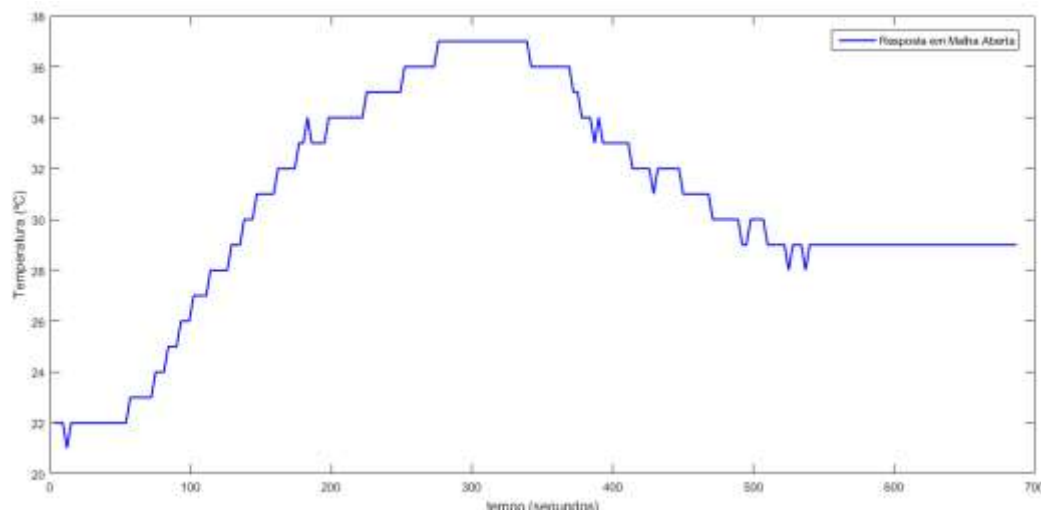
Fonte: Autores

Após a resistência ser alimentada pela corrente da rede, esta irá dissipar calor, esquentando o interior do tubo. O primeiro passo é ler a temperatura no interior do tubo. O sensor possui três terminais, dois de alimentação que estão ligados ao Arduino nos terminais de 5V e GND, e o terceiro que está conectado a entrada analógica A0. É através desta porta analógica que o sensor informa ao microcontrolador o valor da temperatura. Porém, quando o Arduino realiza uma leitura analógica, há a conversão do valor lido, que pode ser um valor de tensão entre 0V e 5V, em um número entre 0 e 1023. O número informado é do tipo inteiro, contudo, o valor de temperatura é um número real. Devido a este fato, após converter o valor lido para um valor de tensão, é necessário converter esta tensão em temperatura, com valores decimais, para isso, foi utilizada a relação de transformação do sensor, onde cada 10mV equivale a 1°C. Com isso, a temperatura (T) pôde ser determinada a partir da Equação (1).

$$T[{}^{\circ}\text{C}] = \frac{5 \times \text{Leitura}}{1023 \times 0,01} \quad (1)$$

Os valores de temperatura são exibidos no monitor serial do Arduino e são exportados para um arquivo do tipo “.txt”, que por sua vez é lido no *software* MATLAB (acrônimo do termo em inglês *Matrix Laboratory*), onde são plotados os gráficos “temperatura x tempo”, como mostra a Figura 5.

Figura 5 – Gráfico do sistema em malha aberta.



Fonte: Autores

É possível observar que existem duas etapas, uma de aquecimento e uma de resfriamento. Após 306 segundos do início do aquecimento, a temperatura se estabiliza em aproximadamente 37°C. Neste instante, é acionado o ventilador, com aproximadamente metade da sua velocidade máxima. Após o acionamento do *cooler*, iniciando a etapa de resfriamento, a temperatura no interior do tubo cai ao longo do tempo, até que atinge um valor constante de aproximadamente 29°C, como se era esperado. É válido ressaltar que os pontos de picos presente nos gráficos estão associados ao sensor LM35 usado por possuir a característica de produzir impulsos de tensão durante a medição da temperatura.

### 3 MODELAGEM DO SISTEMA TÉRMICO

Sistemas térmicos são aqueles em há transferência de calor de uma substância para outra. Geralmente, após serem excitados por uma função degrau, terão como resposta uma curva que

apresenta as características de um sistema de primeira ordem, portanto o protótipo elaborado neste trabalho pode ser representado aproximadamente conforme a Equação (2), onde pode existir um atraso de tempo  $T$  na resposta. Conforme registrado na Figura 5, resposta em malha aberta do sistema, tanto na fase de aquecimento para uma entrada degrau ao energizar a resistência elétrica, quanto na fase de resfriamento também para uma entrada degrau ao ligar o *cooler*, percebe-se que o comportamento é de um sistema de primeira ordem, ou seja, em ambos têm-se resposta exponencial.

$$G(s) = \frac{K \cdot e^{-sT}}{\tau \cdot s + 1} \quad (2)$$

Considerando que o objetivo do controle será resfriar o interior do tubo, é de interesse determinar a função de transferência na fase de resfriamento. Para tanto, foram utilizadas relações teóricas para sistemas de primeira ordem como segue (NISE, 2012). Para o sistema em malha aberta, após o *cooler* ser acionado a uma velocidade média, ele possui o comportamento ilustrado na Figura 5 a partir dos 306s. Através da análise desta, é possível determinar o valor do ganho ( $K$ ), o tempo de atraso ( $T$ ) e a constante de tempo ( $\tau$ ). Para determinar o ganho, é necessário obter a relação entre a resposta do sistema em regime e o valor da entrada aplicada. O valor do degrau aplicado ao *cooler* é a entrada e o valor de tensão lido no sensor é a saída. A velocidade do *cooler* é ajustada através da programação no Arduino e varia entre 0 e 255, onde 0 corresponde a velocidade nula e 255 a velocidade máxima de giro. Para alcançar a velocidade máxima, aplica-se a tensão máxima suportada pelo *cooler* que é 12V. O valor escolhido e aplicado no ensaio, foi de 140. Através de interpolação, tem-se a Equação (3) para calcular o valor da tensão aplicada ao *cooler*.

$$A = \frac{12 \times 140}{255} = 6,58V \quad (3)$$

O valor de tensão lido pelo sensor de temperatura pode ser calculado através da relação de transformação do próprio sensor, onde cada grau Celsius equivale a 10mV. O valor em regime atingido foi de 29°C, portanto, 0,29V. O valor do ganho foi determinado como 0,044.

Para obter a constante de tempo, é necessário determinar o ponto em que a resposta alcança 63% do seu valor final. De acordo com o gráfico, houve um decaimento de 8°C e 63% desde valor equivale a aproximadamente 5,04°C. Utilizando a ferramenta do *MATLAB* que mostra os valores das coordenadas no gráfico, obteve-se que o tempo que a temperatura decaiu 5,04°C e atinge o valor de 32°C é de 108 segundos. Logo,  $\tau=108s$ .

O atraso de transporte é o tempo necessário para a mudança no valor inicial da variável de processo, que ocorre após uma perturbação na entrada. O posicionamento do sensor é de fundamental importância, pois, dependendo da distância, poderá aumentar ou diminuir o tempo de atraso planta. Para a modelagem do protótipo o atraso foi desconsiderado por ser um valor baixo devido a posição do sensor em relação a resistência

Através das considerações e dos cálculos realizados, obteve-se a função de transferência  $G(s)$  mostrada na Equação (4) para a representação do sistema térmico.

$$G_p = \frac{0.044}{108s+1} = \frac{K}{\tau \cdot s + 1} = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (4)$$

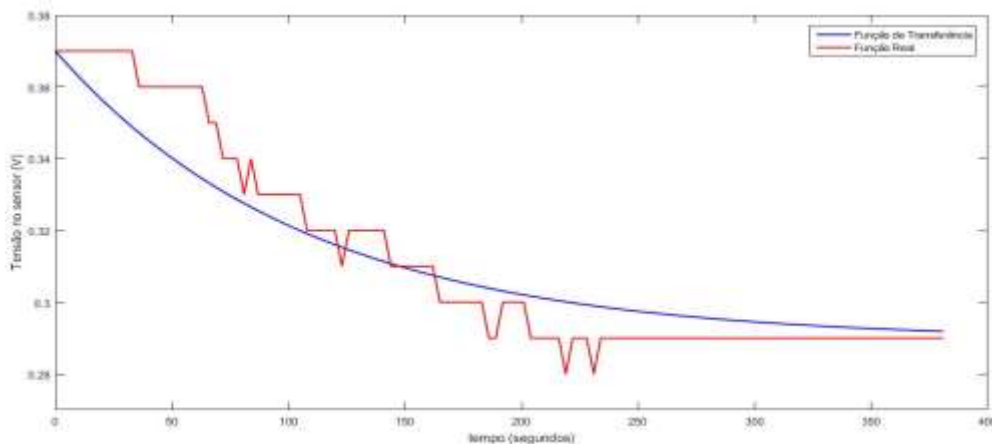
Para cada valor de degrau aplicado no *cooler*, o sistema produzirá uma resposta que é o valor da tensão lida no sensor, a relação entre essa tensão do *cooler* (entrada) e a tensão do



sensor (saída) é representada pela função de transferência da Equação (4). Para verificar se ela representa o sistema real foi feita a simulação no *MATLAB*, levando em conta a necessidade de converter a função de transferência para a forma de espaço de estados visto que a condição inicial não é nula, como indicado em literatura (NISE, 2002). A forma de estados utilizada, Equação (5), obteve como resultado o gráfico visto na Figura 6.

$$\dot{x} = -\frac{1}{\tau}x + \frac{K}{\tau}u \quad (5)$$

Figura 6 – Gráfico comparativo do sistema real e função de transferência calculada.



Fonte: Autores

Através da Figura 6, observa-se as semelhanças e diferenças entre as respostas, calculada e real. Ambas possuem a mesma tendência exponencial de decaimento da temperatura e em média a simulada se aproxima bastante da resposta real. O valor em regime da resposta simulada tende a se aproximar do valor real, mesmo não atingindo esse o valor exato durante o tempo de medição. Sendo assim, a função de transferência representativa do sistema real, comprovou-se via simulação, satisfatória.

#### 4 RESULTADOS DA IMPLEMENTAÇÃO DE CONTROLADORES

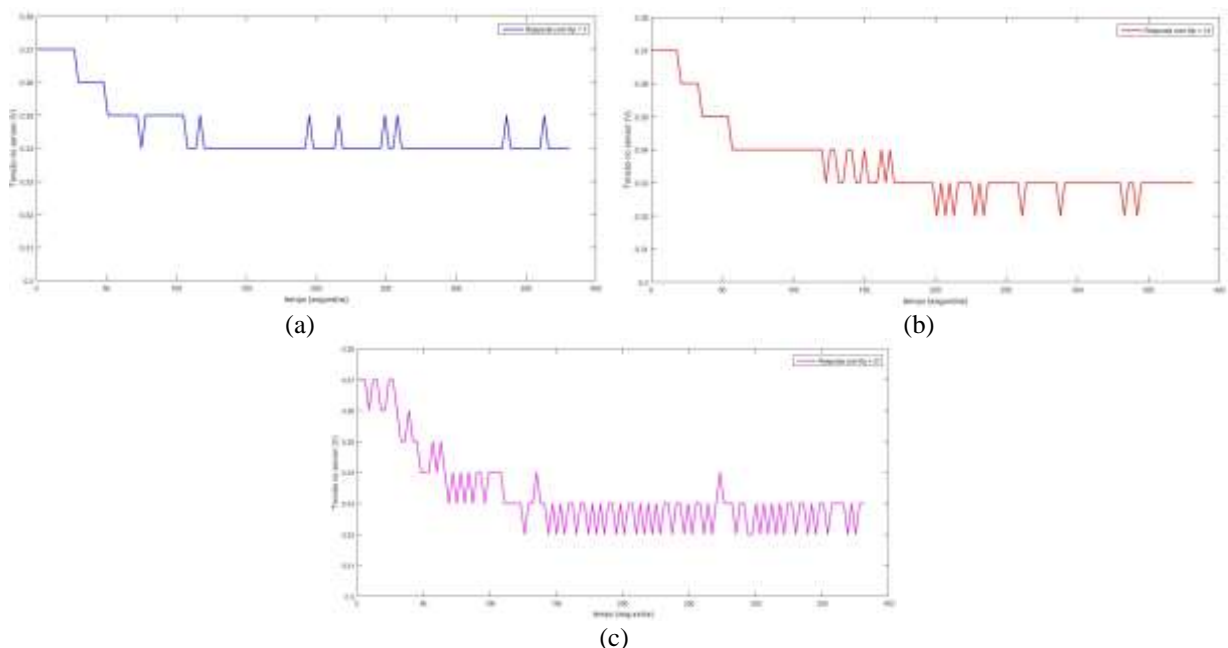
O monitoramento da temperatura é feito pelo pino A0 do Arduino e o acionamento do *Cooler* pelo pino PWM 5. Antes da etapa de aquecimento, a temperatura ambiente lida pelo sensor é de 22°C, e após a resistência dissipar calor, a temperatura atinge e estabiliza em 37°C. Em ambos os testes realizados com os controladores, o sistema inicia a partir desta condição inicial, ou seja, após atingir tal valor de temperatura, o controle é aplicado, variando a velocidade do *cooler*. O *set point* é o valor alvo que o sistema deve manter e que foi estabelecido em 32°C, para que haja uma diferença de pelo menos 10°C entre o interior do tubo e a temperatura ambiente externa. O objetivo do controlador é fazer o sistema atingir o valor de referência com mais rapidez, com o mínimo consumo de energia e sem prejudicar a estabilidade. Como o protótipo desenvolvido neste trabalho é um sistema discreto, pois seus dados são obtidos através de amostras, o projeto de controladores digitais foi realizado baseado usando conceitos sobre métodos de discretizações de sistemas. A ação de controle escolhida foi a proporcional (P), onde o único parâmetro a ser ajustado é o ganho  $K_p$ . Para isso, foi traçado o Lugar Geométrico das Raízes (LGR) da planta em malha aberta. O sistema contínuo em malha aberta possui apenas um polo situado em  $-1/\tau$ , que é, aproximadamente,  $-0,01$  no plano S e 1 no plano Z. Do LGR resulta que aumentando  $K_p$  o polo de malha fechada

se desloca para a esquerda, tornando a resposta de malha fechada mais rápida e aumentando o valor máximo da ação de controle, ou seja, da tensão no *cooler*. A ação de controle  $u(t)$  do controle P no domínio tempo contínuo, para sua implementação no microcontrolador utiliza-se seu equivalente discreto dado na Equação (6), onde  $T_s$  é o período de amostragem.

$$u(kT_s) = K_p e(kT_s) \quad (6)$$

O código implementado no Arduino realiza as seguintes etapas. Após realizar a leitura da temperatura, este calcula o valor do erro, diferença entre a referência de 32°C, que equivale à 0,32V, e o valor lido. Como o valor lido inicia a partir da condição inicial de 37°C, o erro inicial será de -5 e a  $T_s$  tende a diminuir. O *cooler* necessita de uma tensão mínima para que possa começar a operar, tal condição foi adicionada ao código, juntamente com o valor de velocidade calculada a partir do controle P. Outra propriedade do *cooler*, é que a tensão fornecida a ele não deve ultrapassar a sua tensão nominal. Assim, no código foi inserido um limitador, para que a tensão sempre seja menor ou igual a 12V. Optou-se por implementar três diferentes valores de  $K_p$  e observar o que ocorre com as respostas com o aumento do ganho. Para cada valor, foram registrados os valores da saída (tensão no sensor) e plotados no *MATLAB*. Na Figura 7 apresentam-se os gráficos da saída para  $K_p = 7$ ,  $K_p = 14$  e  $K_p = 21$ . Na Figura 7(a), com ganho igual a 7, a resposta de malha fechada não alcançou o valor de referência (32°C que equivale à 0,32V), no entanto apresenta poucos picos de tensão e alcança o seu valor de regime a partir de 122 segundos. Na Figura 7(b), o sistema se estabilizou em 0,33V no tempo 171 segundos, alcançando o valor de referência apenas em alguns instantes de tempo específicos. Na Figura 7(c), com o valor de ganho alto, o sistema atinge o valor desejado, mas em nenhum instante durante o tempo de medição conseguiu estabilizar em algum valor e a quantidade de impulsos aumentou ao longo do tempo. Em relação ao critério de rapidez, o melhor controlador P seria o de maior ganho, porém este amplifica o ruído presente, o que poderia prejudicar a planta. Em relação critério de estabilidade, o melhor controlador P seria o de menor ganho, porém este em nenhum momento atinge a referência.

Figura 7 – Resposta do Sistema com controlador P com fator de ganho (a)  $K_p=7$  (b)  $K_p=14$  (c)  $K_p=21$

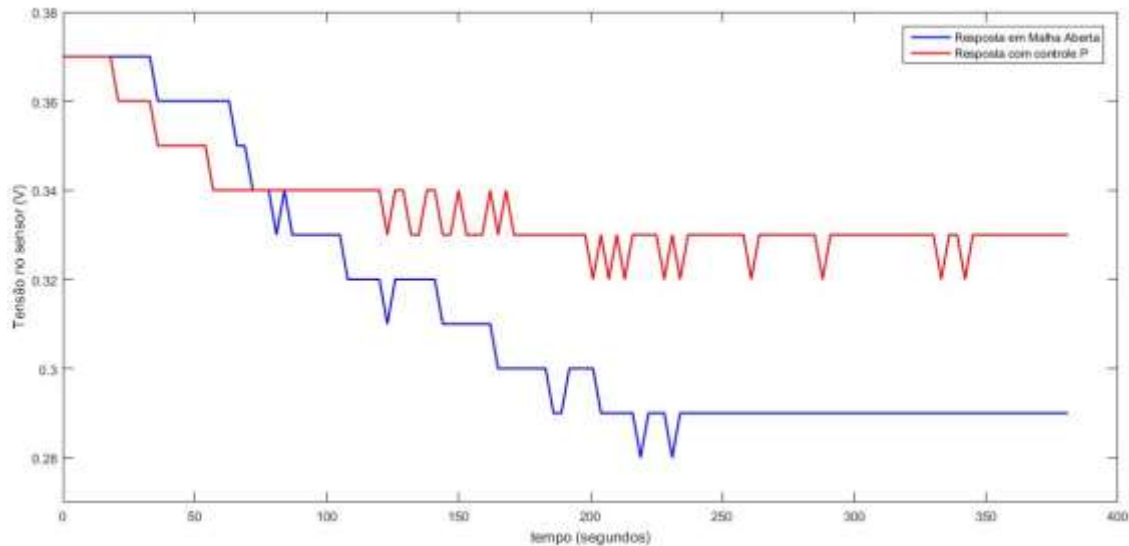


Fonte: Autores



O controlador P de ganho médio torna-se a melhor opção por conciliar de forma mais equilibrada, ambos os critérios. Para comparar o desempenho do protótipo em malha aberta e em malha fechada com o controlador P, plotou-se os gráficos de ambas as repostas, como mostrado na Figura 8.

Figura 8 – Comparação do desempenho em malha aberta e com controlador



Fonte: Autores

O gráfico da Figura 8 mostra as divergências entre o sistema usando controlador P e em malha aberta, sendo o tempo de resposta o fator determinante entre eles. Os gráficos presentes nesta seção comprovam que o uso de controladores P é eficiente para o protótipo desenvolvido. Porém verifica-se a necessidade de projetar outro controlador que possa atender as especificações que não foram alcançadas pelo controle P, como a redução do erro, e que satisfaça as boas condições de comportamento dinâmico.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho teve como tema o desenvolvimento de um protótipo de sistema térmico de baixo custo e didático para auxiliar no processo de ensino de aulas laboratoriais. A etapa da construção física do protótipo se deu a partir do recolhimento de materiais reutilizáveis e elementos eletrônicos em desuso. O sistema montado apresentou boa mobilidade e simplicidade de operação, tornando-o uma ótima ferramenta para o ensino e aprendizagem.

Através da análise do comportamento do sistema buscou-se representá-lo matematicamente, o teste de verificação da função de transferência encontrada, foi realizado e comprovado através de simulação computacional, comparando os gráficos da resposta da função de transferência calculada com a resposta a planta real. Com o objetivo de melhorar o desempenho do sistema, foi realizado o projeto e implementação de controladores. A primeira preocupação do projeto dos controladores foi o atendimento das especificações que são: menor tempo de resposta, estabilidade, menor ruído e economia de energia. Projetou-se o controlador digital Proporcional, com a finalidade de apresentar aos alunos técnicas muito utilizadas na indústria. No entanto, como sugestão de aprimoramentos e de trabalhos futuros, podem ser realizadas: Aplicação em sala de aula da disciplina Laboratório de Controle; Realizar uma modelagem mais apurada do sistema através de outras técnicas de identificação, como a técnica de Algoritmo Genético (AG) ou Mínimos Quadrados (MQ); Criação de uma

interface usando GUIDE para facilitar a aquisição e visualização das respostas do sistema; Elaborar um projeto com controladores mais robustos e inteligentes.

## REFERÊNCIAS

GOMES, F. J; Módulo laboratorial de baixo custo, baseado em FOSS para educação em engenharia de controle de processos industriais. The 9th LatinAmerican Congress on Electricity Generation and Transmission.2011

NISE, Norman. **Engenharia de Sistemas de controle**. 6ª edição. Rio de Janeiro: LTC,2012.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. 4ª edição. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil. 2005.

ARDUINO UNO. **Arduino UNO overview**. Disponível em:  
<https://store.arduino.cc/usa/arduino-uno-rev3>. Acesso em: 17 jan. 2018

NATIONAL INSTRUMENTS. Folha de dados do sensor LM35. Disponível em:  
<https://www.jameco.com/Jameco/Products/ProdDS/1276463.pdf>. Acesso em: 15 jan. 2018.

## BUILDING AND MODELING OF A LOW-COST DIDACTIC THERMAL SYSTEM WITH RECYCLED MATERIALS FOR TEMPERATURE CONTROL USING ARDUINO

**Abstract:** *In this work was developed a low cost didactic thermal system, built with recycled materials, to aid in teaching in laboratory classes of the discipline Control Systems in the Electrical Engineering course. The prototype consists of an assembled wooden structure that supports a PVC pipe with forced ventilation by means of a mini fan (computer cooler) along with a heating resistor, temperature sensor and an Arduino UNO microcontroller, which communicates via USB with the Arduino software on the computer. This software makes it possible to identify the system parameters as well as the closed temperature control. Open mesh tests were performed to verify its functioning, effectiveness and good mobility for use in laboratory classes. After the prototype development stage, we made use of mathematical approaches to model the system, determining a transfer function that mathematically represented its behavior. Through simulation in MATLAB software, it was verified that the function found has the same dynamic characteristics of the real system. In final sections, a digital controller of the proportional type (P) was designed and implemented in the real system, recording closed loop responses for each parameter stipulated during the project. In general, the prototype proved to be efficient because, in addition to the low cost because it consists of reusable materials, it is easily mobile and allows demonstrations of the use of classical controllers, which presented satisfactory performance in this application, proving theoretical concepts through the experiments.*

**Key-words:** *Thermal Systems, Reusable Materials, Microcontrollers, Controllers, Computational Simulation.*