

## MODELAGEM, IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS E CONTROLE DO PROTÓTIPO DIDÁTICO DE UM SISTEMA TÉRMICO

Paulo R. Brero de Campos\*, Miguel A. Sovierzoski\*\*,  
Carlos A. Brero de Campos\*\*\*

\*Departamento de Eletrônica, Universidade Tecnológica Federal do Paraná  
Avenida Sete de Setembro, 3165 CEP: 80230-901 – Curitiba, Paraná  
(e-mail: brerocampos@gmail.com)

\*\*Universidade Tecnológica Federal do Paraná,  
Avenida Sete de Setembro, 3165 CEP: 80230-901,  
Curitiba, Paraná, (e-mail: miguelaso@utfpr.edu.br)

\*\*\*Instituto de Pesos e Medidas do Paraná – IPEM/PR  
Rua Estados Unidos, 135 CEP 82.510-050 – Curitiba, Paraná  
(e-mail: carlosbrero@gmail.com)

---

**Abstract**— The goal of this paper is to show a thermal system that can be easily assembled by students in control and automation courses. Initially the model of the thermal plant was obtained from the equations that describe a system, then the assembly of the chamber was made and finally the parameters were identified. The thermal chamber was constructed of wood, and styrofoam was placed on the outside to improve thermal insulation. A shower resistor was used as the heating element. The control circuit was assembled with the Arduino Uno. The stability analysis was performed by evaluating the eigenvalues. The closed loop circuit was assembled and the results were shown and analyzed.

**Resumo**— O objetivo deste artigo é apresentar a modelagem e a identificação dos parâmetros de um sistema térmico que possa ser facilmente montado e ensaiado por alunos em disciplinas de controle e automação. Inicialmente foi obtido o modelo teórico da planta térmica a partir das equações que descrevem um sistema térmico, em seguida foi feita a montagem da câmara e finalmente os parâmetros foram identificados. A câmara térmica foi construída em madeira e revestida externamente com isopor para melhorar o isolamento térmico. Uma resistência elétrica de chuveiro foi utilizada como elemento de aquecimento. O circuito de controle utilizou o Arduino Uno. Foi feito o estudo de estabilidade através da análise dos autovalores. O sistema em malha fechada foi montado, ensaiado, e os resultados são apresentados e discutidos.

**Keyword:** Thermal system; Identification parameters; Arduino Uno; phase plane, didactic system, digital control.

**Palavras-chave:** Sistema térmico; Identificação de parâmetros; Arduino Uno; plano de fase, sistema didático, controle digital.

---

### 1. INTRODUÇÃO

Nas disciplinas de controle o aluno de engenharia se depara com conteúdos de grande complexidade e elevado nível de abstração e muitas vezes não consegue estabelecer conexões destes conteúdos com elementos práticos.

Os cursos de engenharia devem preparar o aluno para uma aplicação imediata do conhecimento aprendido. Assim, o laboratório deve ser planejado utilizando experimentos que possibilitem ou auxiliem o aluno a fazer conexões de conteúdos entre disciplinas.

A aplicação prática dos conceitos de controle ajuda a motivar os alunos, facilita o entendimento da teoria,

promove um pensamento crítico e prepara os alunos para a vida profissional (Cooper e Fina, 1999).

O experimento deve ter funções amplas, podendo ser usado para desenvolver atividades psicomotoras básicas, como, por exemplo, fazer a montagem de circuitos, até para atividades mais complexas de projeto e análise. Por isso, é importante definir claramente os objetivos de cada experimento.

Um bom experimento de laboratório deve possibilitar ao aluno desenvolver os domínios cognitivos, afetivos, psicomotores e conativos. Além disso, deve permitir demonstrar conceitos teóricos, ser barato, ser fácil de entender e utilizar, não ser perigoso nem oferecer riscos (Kheir et al., 1996).

Uma das dificuldades nos cursos de engenharia é o custo elevado para equipar e manter laboratórios que atendam às disciplinas teóricas. Assim, é necessário buscar alternativas mais viáveis para experimentos que possam ser facilmente montados e com um custo baixo, como, por exemplo, um sistema didático em escala reduzida de controle de temperatura.

O controle de temperatura é necessário em diversas aplicações industriais, como por exemplo: fornos industriais, reatores bioquímicos, centrais de ar condicionado, caldeiras, chocadeiras, estufas, entre outras.

Na indústria encontram-se processos que necessitam o controle da temperatura do ar dentro de limites estabelecidos, como por exemplo, a secagem de plantas medicinais e aromáticas, para preservar as suas características (Jesus et al., 2001).

Outra aplicação de câmaras térmicas é na indústria de equipamentos eletrônicos. Os equipamentos em teste são colocados dentro de câmaras térmicas, executando rotinas de autoteste, sendo submetidos a ciclos térmicos ou operando em temperaturas elevadas durante horas (Burnin), (IEEE GlobalSpec, 2021) e (Kececioglu e Sun, 2002). O stress térmico acelera o envelhecimento, possibilitando avaliar o comportamento do equipamento antes de ser entregue ao cliente.

Neste contexto, o laboratório didático deve buscar implementações simples, de baixo custo e intuitivas.

Este artigo propõe um experimento de laboratório para o controle de temperatura de uma câmara térmica didática de baixo custo e está dividido na seguinte forma: na seção 2 apresenta-se o modelo da planta térmica; a seção 3 detalha a montagem da câmara com os dispositivos sensor e atuador; na seção 4 são mostradas as medidas práticas; na seção 5 é feita a identificação dos parâmetros da câmara; seção 6 é feito o projeto e análise do sistema de controle de temperatura em malha fechada e finalmente na seção 7 são feitas algumas considerações finais sobre o trabalho.

## 2. MODELO DA PLANTA TÉRMICA

Uma câmara isolada termicamente é mostrada esquematicamente na Fig. 1, com o objetivo de controlar a temperatura interna  $T_o$ , em que  $r$  representa a fonte de calor para a planta, implementada com uma resistência elétrica.

Através das leis da termodinâmica que regem o fluxo de calor, pode-se obter as relações matemáticas do modelo dinâmico (Gayakwad e Sokoloff, 1988): a diferença entre o calor fornecido pela resistência de aquecimento e o calor transferido para o ambiente através das paredes da câmara deve ser igual ao calor dentro da câmara.

O fluxo de calor fornecido pela resistência de aquecimento é indicado por  $q_i$  e o fluxo de calor transferido ao ambiente é indicado por  $q_o$ .

O fluxo de calor que sai através das paredes da câmara é dado por (1), sendo que  $R_t$  é a **resistência térmica do material das paredes da câmara**.

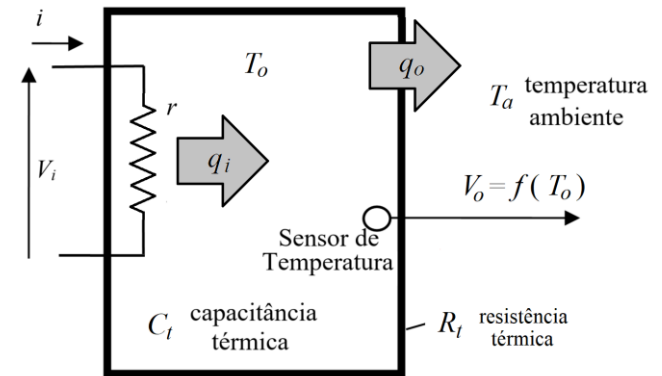


Fig. 1 – Planta e elementos térmicos envolvidos

Fonte: os autores (2021)

$$q_o = \frac{(T_o - T_a)}{R_t} \quad (1)$$

A energia acumulada na forma de calor dentro da câmara é proporcional à taxa na qual a temperatura da câmara está mudando, como mostrado em (2), sendo  $C_t$  a **capacitância térmica do interior da câmara**.

$$q_i - q_o = C_t \frac{dT_o}{dt} \quad (2)$$

A partir de (1) e (2) obtém-se (3), que é a equação diferencial que representa a conservação de energia do sistema:

$$R_t q_i + T_a = R_t C_t \frac{dT_o}{dt} + T_o \quad (3)$$

O termo  $T_a$ , em (3) pode ser tratado de diversas formas: pode ser considerado como uma perturbação do sistema, pode ser considerado como uma variável de entrada, etc. O enfoque usado neste artigo foi definir  $R_{te}$  como a **resistência térmica equivalente das paredes da câmara**, mostrada em (4).

$$R_{te} = \frac{(R_t q_i + T_a)}{q_i} \quad (4)$$

Este ajuste matemático pode ser considerado em situações em que o fluxo de calor  $q_i$  é aplicado a uma taxa constante e  $T_a$  é constante, ou varia muito lentamente.

Substituindo (4) em (3), obtém-se (5), que é a equação diferencial linear de coeficientes constantes, sendo que  $q_i$  é a variável de entrada e  $T_o$  é a variável de saída do sistema térmico. Ambas as variáveis são função da variável independente tempo  $t$ .

$$R_{te} q_i = R_t C_t \frac{dT_o}{dt} + T_o \quad (5)$$

Nas condições de contorno desse trabalho, a câmara térmica é modelada por uma equação diferencial de primeira ordem.

Aplicando a transformada de Laplace em (5) obtém-se a função de transferência  $G(s)$  mostrada em (6), sendo que  $\tau = R_t C_t$ , é a constante de tempo térmica da câmara.

$$G(s) = \frac{T_o(s)}{q_i(s)} = \frac{R_{te}}{1 + sR_t C_t} \quad (6)$$

### 2.1 Atraso de transporte

O atraso de transporte é uma condição que está presente, em determinado grau, em todos os sistemas térmicos (Patrick e Fardo, 2009).

Atraso de transporte é o tempo de atraso entre a ação de controle na entrada do sistema e o resultado da medição da resposta de saída (Wolovich, 1994).

O atraso de transporte pode ser devido ao atraso na medida, devido ao atraso na ação do controlador, devido ao atraso na operação do atuador, etc. (Ogata, 1985).

Para a medição foi usado o sensor de temperatura LM35. Ele possui um atraso devido à sua constante térmica, que pode ser obtido através do manual do fabricante. Para o encapsulamento de plástico TO-92, obtém-se a constante de tempo térmica, sendo  $\tau_{\text{sensor}} = 17$  segundos (Texas Instruments, 2021). A função de transferência do sensor é mostrada em (7).

$$\frac{V_{out}(s)}{T(s)} = \frac{0,01}{(17s + 1)} = 0,01e^{-17s} \quad (7)$$

Como a dinâmica da planta é muito lenta ( $\tau_{\text{planta}} = 1140$  segundos) em relação ao atraso do sensor, este atraso foi desprezado.

## 3. MONTAGEM DA PLANTA TÉRMICA

Para a construção de uma câmara térmica podem ser utilizados diversos materiais com propriedades de isolamento térmica. Um dos materiais mais baratos e com bom isolamento térmico é o isopor, com condutibilidade térmica de  $0,033 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ . Entretanto, em montagens práticas, este material acabou derretendo para temperaturas elevadas.

O isopor é indicado para uso em temperaturas entre  $-50 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $80 \text{ }^\circ\text{C}$ , (Abiquim, 2021). O isopor pode ser exposto a temperaturas de até  $100 \text{ }^\circ\text{C}$  por curto período de tempo (Tecnocell, 2021).

Um material que possui um razoável isolamento térmico é a madeira, que apresenta condutibilidade térmica de  $0,10$  a  $0,15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ . Assim, optou-se por construir-se a câmara utilizando placas de MDF (*medium density fiberboard*), com condutibilidade térmica de  $0,15 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{C})$ , (Decospan, 2021), com um revestimento externo de isopor, o que melhora de forma significativa o isolamento térmico.

As dimensões externas da câmara são:  $25 \times 15 \times 8$  cm. Para aquecimento da câmara, foi utilizada uma resistência de

aquecimento de chuveiro, cujo valor da resistência  $r$  é  $9$  ohms.

Como o objetivo é um sistema portátil de baixo custo e fácil montagem não foi utilizado um sistema de circulação forçada de ar para homogeneizar a temperatura dentro da câmara, contudo, optou-se por instalar a resistência próximo da base interna da caixa para permitir que a corrente de convecção, gerada pela diferença de temperatura, realize a homogeneização da temperatura na câmara.

Na Fig. 2 é mostrada a fotografia da câmara térmica didática montada para os testes. Ela foi construída com MDF e revestida externamente com isopor.

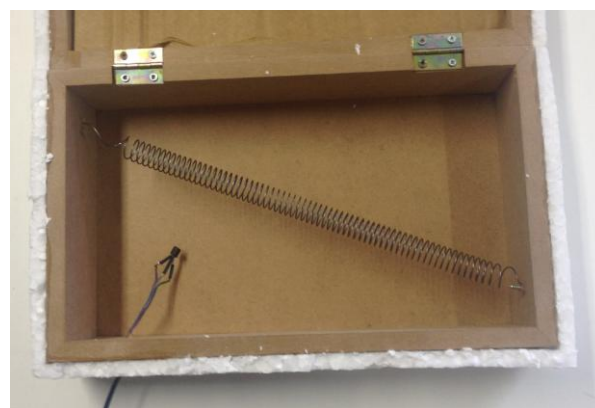


Fig. 2 – Câmara térmica didática, mostrando a resistência elétrica de aquecimento e o sensor de temperatura.

Fonte: os autores (2021)

### 3.1 Controle digital da planta térmica

Para o controle da planta térmica foi utilizado o kit de microcontrolador Arduino Uno que apresenta características de baixo custo, fácil programação, grande disseminação no meio estudantil. Além disso, possui os circuitos periféricos adequados, e capacidade de processamento suficiente para o controle digital.

O Arduino Uno possui conversores analógico-digital (ADC) com resolução de 10 bits, sendo que um deles foi utilizado para amostrar o sinal do sensor de temperatura.

O Arduino Uno possui a interface PWM com resolução de 8 bits, que foi utilizado para o acionamento da resistência de aquecimento da planta.

### 3.2 Sensor de temperatura LM35

Para medir a temperatura da câmara ( $T_0$ ) foi utilizado o sensor analógico de temperatura LM35, que possui 3 terminais: a) GND =  $0 \text{ V}$ ; b)  $V_s$  = tensão de alimentação, que pode variar entre  $4$  a  $20$  volts; c)  $V_{out}$  = tensão proporcional à temperatura. O LM35 pode medir temperaturas entre  $-55 \text{ }^\circ\text{C}$  a  $150 \text{ }^\circ\text{C}$  (Texas Instruments, 2021). Na Fig. 3 são mostrados o diagrama e a disposição dos terminais no LM35.

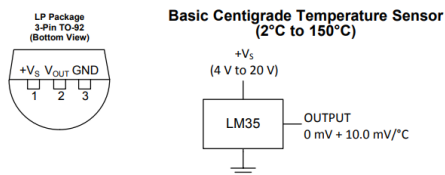


Fig. 3 – Sensor de temperatura LM35  
 Fonte: Texas Instruments (2021)

A tensão do sensor é adquirida através de uma porta analógica, por isso o sensor foi alimentado com a própria tensão do Arduino Uno ( $V_{cc}=5\text{ V}$ ). Isto previne a possibilidade de queimar acidentalmente o microcontrolador por uma tensão externa elevada.

### 3.3 Driver de potência

A forma mais simples, barata e eficiente para controlar o acionamento da resistência elétrica é através da modulação por largura de pulsos (PWM).

Utilizando a interface PWM do Arduino Uno, necessita-se usar um transistor de potência para o chaveamento a partir do sinal PWM. O circuito é mostrado na Fig. 4.

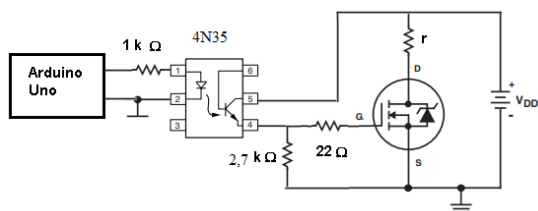


Fig. 4 – Driver de potência  
 Fonte: os autores (2021)

O Arduino Uno é conectado à etapa de potência através de um fotoacoplador (4N35), para evitar danos ao microcontrolador, pois tensões elevadas poderiam danificá-lo. Assim, a tensão de alimentação do Arduino foi diferente da tensão do circuito de potência.

A planta térmica utiliza como fonte de energia para a resistência de aquecimento uma fonte de alimentação CC ajustável de 0-30V/0-2A.

## 4. MEDIDAS PRÁTICAS

Para medir os parâmetros da planta, uma tensão contínua foi aplicada na resistência ( $V_i=17,8\text{ V}$ ) para aquecer a câmara e a tensão do sensor de temperatura ( $V_o$ ) foi medida em intervalos constantes de tempo.

Na Tabela I são mostrados alguns valores medidos da tensão de saída. Esta tabela foi utilizada para identificar o valor do polo do sistema. Como a temperatura ambiente afeta a medida da tensão no sensor, foi preenchida outra coluna com os valores da diferença entre a tensão de saída e a tensão da temperatura ambiente  $V_o(0)=0,225\text{ V}$ . Desta forma, retira-se o offset gerado pela temperatura ambiente.

Tabela I – Tensão ( $V_o$ ) do sensor de temperatura na câmara x tempo

Tempo (s)	$V_o$ (V)	$V_o - V_o(0)$ (V)
0	0,225	0
20	0,2340	0,0090
40	0,2690	0,0440
60	0,3120	0,0870
80	0,3810	0,1560
100	0,4150	0,1900
120	0,4490	0,2240
...	...	...
380	0,6450	0,4200
400	0,6540	0,4290
420	0,6590	0,4340
...	...	...
1120	0,8890	0,6640
1140	0,8940	0,6690
1160	0,8980	0,6730
1180	0,9030	0,6780

Fonte: os autores (2021)

O levantamento dos dados deve ser feito até a temperatura da câmara estabilizar, devendo durar em torno de 120 minutos, isto é, até que  $V_o$  fique constante. Mede-se então  $V_{o(final)}$ . O valor final medido (valor em regime permanente) foi  $V_{o(final)}=1,279\text{ V}$ .

A resposta temporal da tensão no sensor subtraída da temperatura ambiente ( $V_o - V_o(0)$ ) obtida a partir das medidas práticas da Tabela 1, é mostrada na Fig. 5. Lembrando que a temperatura ( $T_o$ ) é dada por  $T_o = V_o/K_s$ .

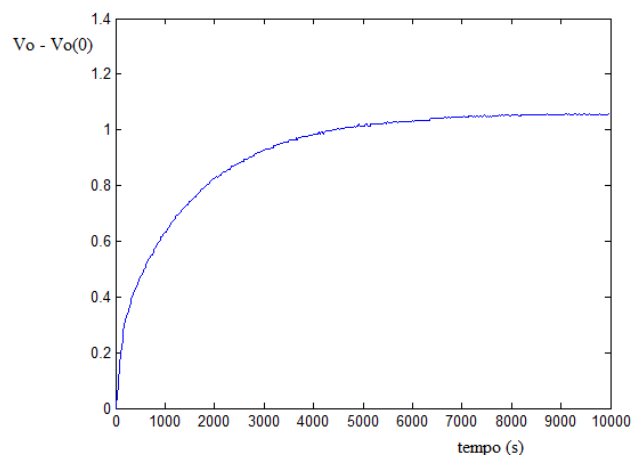


Fig. 5 – Resposta da câmara térmica ao sinal de entrada degrau, mostrando a tensão no sensor menos a temperatura ambiente ( $V_o - V_o(0)$ ). Dados levantados na Tabela 1.

Fonte: os autores (2021)

Através da resposta obtida na Fig. 5, conhecendo o valor final, pode-se medir a constante de tempo térmica. Para isso, calcula-se  $\Delta V_{o(final)} = V_{o(final)} - V_o(0)$ . Multiplica-se o valor de  $\Delta V_{o(final)}$  por 0,632, soma-se com  $V_o(0)$  e encontra-se o tempo que este valor ocorreu [ $\Delta V_{o(final)} \cdot 0,632 + V_o(0)$ ]. Esse tempo equivale a uma constante de tempo ( $\tau$ ). A constante de tempo da planta foi calculada como sendo

$\tau=1140$  segundos. O valor do polo é  $1/\tau$ . Isto é mostrado na Fig. 6.

Neste experimento as temperaturas máximas obtidas foram em torno de  $110\text{ }^\circ\text{C}$ . Sugere-se que ao fazer o experimento com alunos seja usada tensão máxima  $V_{CC}=15\text{ V}$ , o que resultaria em temperatura máxima abaixo de  $90\text{ }^\circ\text{C}$ . Essa limitação de uso da planta minimizaria riscos.

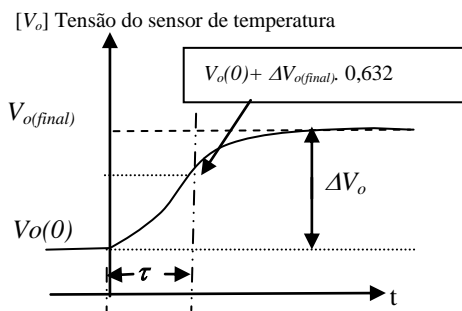


Fig. 6 – Resposta ao degrau de um sistema de primeira ordem  
 Fonte: os autores (2021)

### 5. IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DA CÂMARA TÉRMICA

A variável que se quer controlar é a temperatura do interior da câmara  $T_o$ , cujo valor é proporcional à tensão  $V_o$  do sensor de temperatura, como mostrado na Fig. 1.

A quantidade de calor ( $Q$ ), em joules, dada por  $Q=Pt=(V^2/r)t$ , é injetada na câmara pela resistência de aquecimento. A potência elétrica é igual ao fluxo de calor ( $q$ ), isto é,  $P=q$ . Assim, o fluxo de calor fornecido à câmara é dado pela potência dissipada pela resistência, isto é,  $q_i = ri^2 = V_i^2/r$ .

Para fazer a medição da temperatura da câmara usa-se o sensor de temperatura, LM35 que fornece uma tensão de  $10\text{mV}$  a cada grau Celsius, isto é  $K_s= 10\text{mV}/^\circ\text{C}$ . Então  $V_o=K_s.T_o$ , sendo que  $T_o$ =temperatura da câmara em  $^\circ\text{C}$ .

Para a identificação da constante de tempo ( $\tau$ ), aplica-se um degrau de tensão  $V_i$  e observa-se a resposta medindo a tensão ( $V_o$ ) do sensor de temperatura. Considera-se a temperatura inicial da câmara  $V_o(0)$ , e a partir dela verifica-se o ponto em que a tensão do sensor atinge o valor de  $63,2\%$  do valor final. Este período de tempo é definido como uma constante de tempo do sistema ( $\tau$ ).

As relações entre entrada e saída  $q_i=(V_i^2/r)$  e  $V_o=K_s.T_o$  são aplicadas em (6), resultando em (8).

$$\frac{V_o(s)}{V_i^2(s)} = \frac{K_s R_{te}}{r(1+s\tau)} = \frac{K}{1+s\tau} \quad (8)$$

Assim, define-se  $K=K_s R_{te}/r$ . Para se fazer a identificação dos parâmetros na prática mede-se  $V_i$  e  $V_o$  e aplicando o teorema do valor final obtém-se  $K$ . Tendo  $K$  pode-se calcular  $R_{te}$ , pela equação  $R_{te}=r K/K_s$ .

A função de transferência em (6) possui a forma final mostrada em (9).

$$G(s) = \frac{T_o(s)}{q_i(s)} = \frac{rK}{K_s(1+s\tau)} = \frac{R_{te}}{(1+s\tau)} \quad (9)$$

Substituindo os valores obtidos no processo de identificação da câmara térmica, apresentados na Fig. 5 e na tabela 1, chega-se à função de transferência, mostrado em (10).

$$G(s) = \frac{T_o(s)}{q_i(s)} = \frac{2,99}{(1140s + 1)} \quad (10)$$

### 6. PROJETO E ANÁLISE DO SISTEMA EM MALHA FECHADA

Na Fig. 7 é mostrado o modelo do sistema em malha fechada. O bloco não linear foi incluído para caracterizar o fato que apenas tensões positivas serão aplicadas à câmara térmica. Este controle é feito no software de controle, que envia zero para a saída, se o sinal de controle for negativo, evitando aplicar tensões negativas à câmara térmica. Uma tensão negativa ainda aqueceria a câmara, que é contrário ao que deveria acontecer para estabilizar o sistema.

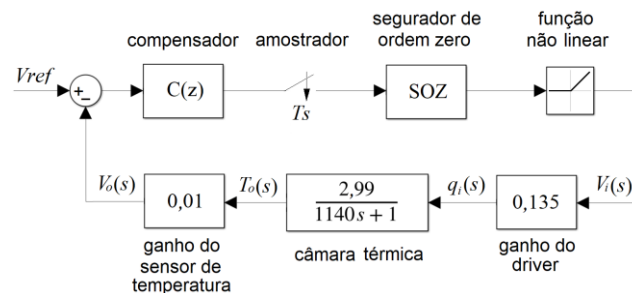


Fig. 7 – Sistema em malha fechada  
 Fonte: os autores (2021)

O objetivo do projeto é que se tenha erro nulo em regime para uma entrada degrau. Para atingir esse objetivo deve-se colocar um polo em  $z=1$  (integrador) (Franklin et al., 2013).

Para tornar a montagem e a modelagem da câmara mais simples, optou-se por não colocar um elemento de resfriamento. Desta forma, se houver um sobressinal, a temperatura dentro da câmara levará um tempo maior para estabilizar. Assim, um dos objetivos do projeto é impor que os autovalores tenham um pequeno valor na parte imaginária. A função de transferência do compensador é mostrada em (11).

$$C(z) = \frac{u}{e} = \frac{K(z-a)}{(z-1)} \quad (11)$$

A discretização da planta foi feita utilizando período de amostragem  $T_s=5\text{s}$ , resultando no modelo do sistema indicado na Fig. 8.

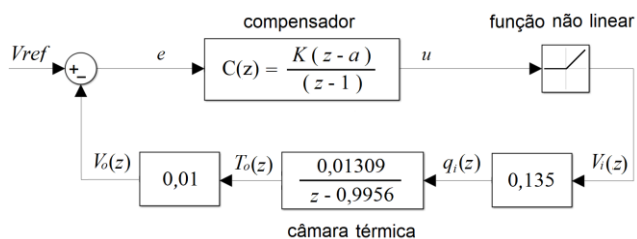


Fig. 8 – Sistema de controle discretizado  
 Fonte: os autores (2021)

A potência máxima no resistor é dada por  $P_{max}=(V_{cc})^2/r$ . O resistor dissipará esta potência quando for aplicado ao registro de PWM do Arduino Uno o valor máximo igual 255. Assim, o ganho do driver de potência é dado por  $q_{max}/255=P_{max}/255$ . Para  $P_{max}=34,5$  W, o driver de potência possui ganho  $G=0,135$ .

A análise de estabilidade pode ser feita analisando os autovalores, que podem ser utilizados para analisar o comportamento do sistema em malha fechada. Para fazer a análise, separa-se a não linearidade em duas regiões, como mostrado na Fig. 9.

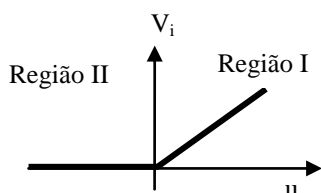


Fig. 9 – Regiões da função não linear  
 Fonte: os autores (2021)

Na região I da curva não linear, Fig. 9, que ocorre para  $u>0$ , a equação do erro é dada por  $e = Vref - V_o$ . As funções de transferência do compensador e da planta são representadas no espaço de estados e após a substituição da equação do erro, obtêm-se as equações de estado do sistema, mostradas em (12), sendo a equação de saída  $y(k)=K_s x_1(k)$ , e  $G=0,135$ ,  $K_s=0,01$ ,  $b=0,01309$  e  $c=0,9956$ .

$$\begin{bmatrix} x_1(k+1) \\ x_2(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} c-bK_s GK & Gb \\ K_s K(a-1) & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1(k) \\ x_2(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} bGK \\ (1-a).K \end{bmatrix} r(k) \quad (12)$$

Para a região I, os autovalores foram calculados, a partir da equação de estado, para diversos valores do zero e do ganho do compensador ( $K$ ). O ganho foi escolhido para não haver saturação, sendo  $K=510$ . O zero do compensador foi escolhido de forma empírica para o sistema atingir rapidamente o equilíbrio com pequeno overshoot. Para  $K=510$  e  $a=0,995$  os autovalores resultaram em  $\lambda_1=0,9933-j0,0002$  e  $\lambda_2=0,9933+j0,0002$ , indicando uma resposta assintoticamente estável, com pequeno overshoot. Esses autovalores indicam que para a região I o sistema é estável e tende para o ponto de equilíbrio.

Para a região II, Fig. 9,  $u=0$ , e apenas a dinâmica da planta afeta a resposta, sendo que sua evolução no tempo depende apenas da energia armazenada na câmara térmica, tendendo à origem. Portanto, também estável.

Com os valores de  $K$  e  $a$  aplicados em (11), escrevendo a equação no tempo discreto, obtém-se a equação a diferenças recursiva do compensador mostrada em (13). Essa equação do compensador é executada pelo Arduino Uno para o controle digital da planta térmica.

$$u_k = u_{k-1} + 510(e_k - 0,995.e_{k-1}) \quad (13)$$

O circuito foi montado e testado. Na Fig. 10 tem-se a resposta do sistema em malha fechada, mostrando a tensão no sensor de temperatura versus tempo (curva em azul) e também o sinal simulado (curva em vermelho). A referência foi colocada como  $V_{ref}= 0,60$  V, o que resultou em temperatura de 60 °C dentro da câmara. As amostras foram medidas a cada  $T=5$ s.

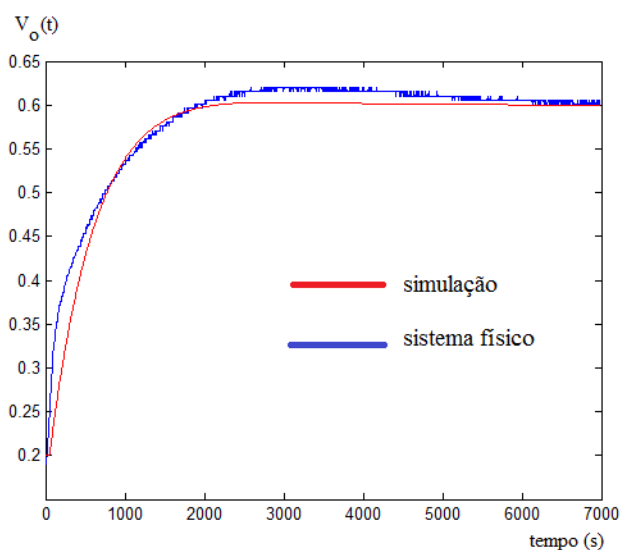


Fig. 10 – Respostas em malha fechada: resposta simulada (vermelho) e a curva do sistema físico (azul)  
 Fonte: os autores (2021)

Pela Fig. 10 é possível observar que o sistema real teve um comportamento bem próximo do sistema simulado. Um dos problemas encontrados é que o PWM apresentava um comportamento não linear. Foi possível observar isto aplicando valores constantes na entrada do PWM e medindo a tensão média na saída.

## 7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Neste artigo procurou-se mostrar a importância de experimentos didáticos que integrem conteúdos de diversas disciplinas para auxiliar o aluno na compreensão de processos que eles irão encontrar na vida profissional.

Foi comentado que sistemas de temperatura são muito utilizados na indústria. Muitos processos industriais utilizam resistências elétricas para o aquecimento.

Na busca de um sistema térmico didático de baixo custo, optou-se por utilizar uma resistência de chuveiro dentro de uma caixa de madeira revestida externamente com isopor.

Para analisar a estabilidade foi analisado o comportamento não linear do sistema de temperatura e optou-se por calcular os autovalores, em função do ganho e do polo do compensador.

O sistema foi montado e os resultados foram mostrados, indicando que o sistema simulado e o sistema real tiveram comportamentos próximos. Além disso, foi possível mostrar a praticidade e facilidade de aplicação deste sistema em uma atividade de laboratório de controle e identificação de parâmetros de um sistema físico.

### Referências Bibliográficas

- Abiquim Associação Brasileira da Indústria Química. *Comissão Setorial de EPS*. Disponível em: <http://www.epsbrasil.eco.br/aplicacoes.html>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- Cooper, D. e Fina, D., *Training Simulators Enhance Process Control Education*, Proceedings of The American Control Conference San Diego, California June 1999.
- Decospan. *MDF BOARD*. Disponível em: <https://www.decospan.com/media/files/en-decospan-decopanel-2.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- Franklin, G.F., Powell, J.D., Emami-Naeini, A., *Sistemas de Controle para Engenharia*, 6a. edição, Porto Alegre, Bookman, 2013.
- Gayakwad, R. and Sokoloff, L. *Analog and Digital Control Systems*, Prentice-Hall International Editions, 1988.
- IEEE GlobalSpec. *Burn-in Test Equipment Information*. Disponível em: [https://www.globalspec.com/learnmore/electrical\\_electronic\\_components/electrical\\_testing\\_equipment/burn\\_in\\_test\\_equipment](https://www.globalspec.com/learnmore/electrical_electronic_components/electrical_testing_equipment/burn_in_test_equipment). Acesso em: 26 abr. 2021.
- Jesuz, J. C., Radünz, L. L., Melo E. C., Souza, J. A. R., Rocha, R. P., Berber, P. A. *Sistema de controle automático da temperatura do ar de secagem em secador de plantas medicinais*, Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais, Campina Grande, v.3, n.1, p.43-46, 2001.
- Kececioglu, D. B. and Sun, F.B. *Burn-In Testing: Its Quantification and Optimization*, DEStech Publications Inc., 698 pages, 2002.
- Kheir, N. A. *et al.* Control Systems Engineering Education. *Automatica*, v. 32, n. 2, p. 147-166, 1996.
- Ogata, Katsuhiko. *Engenharia de controle moderno*. Rio de Janeiro: Prentice/Hall do Brasil, 1985.
- Patrick, Dale R. e Fardo, Stephen W. *Industrial Process Control Systems*, Second Edition. The Fairmont Press, 2009.
- Tecnocell. *Tecnologia em EPS*. Disponível em: <http://www.tecnocell.com.br/eps.php?epsID=9>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- Texas Instruments. *LM35 Precision Centigrade Temperature Sensor*. Disponível em: <http://www.ti.com/lit/ds/symlink/lm35.pdf>. Acesso em: 26 abr. 2021.
- Wolovich, William. *Automatic Control Systems - basic analysis and design*. Saunders College Publishing, 1994