

IV Simpósio Paranaense de Modelagem, Simulação e Controle de Processos ISSN : 1984-7521	<b>Artigo: 22</b>
	<b>Páginas: 157 - 164</b>

## **Identificação e modelagem de planta térmica para controle via técnicas de controle clássica**

Vitor F. de Souza, Florindo Antônio Carvalho Ayres Jr., Isaías V. de Bessa, Renan Landau P. de Medeiros

**Abstract.** Greenhouses have a huge influence on agricultural industry, giving many benefits to rural producer like enable to cultivating seasonal cultures during all year, etc. and still having good value for money. In order to improve its efficiency and the quality of its products, thermal systems has been studied and improved instinctively in the last years. This development aims to study identification and modeling of thermal systems and project a PID controller, beside of that a desktop interface was produce to improve interaction between system and user, graphing in real time the temperature and the power consumed by the system, also saving data in text files for subsequent analysis. Least square method was utilized to model the process and a PID controller with derivative filter was elaborated using classic control methods. Presently the system already present the expected behavior, following the reference, staying stable and do not showing overshoot, fate that prove the efficiency of the math methods utilized in this project.

**Keywords:** Greenhouse, Thermal System, PID control.

### **1 Introdução**

O processo de controle de temperatura é interessante em diversos pontos da produção industrial e agrária, tanto na indústria mineradora quanto no sistema de plantio protegido[1]. O sistema de plantio protegido é altamente difundido no setor primário brasileiro permitindo produzir durante todo o ano culturas sazonais ou culturas não nativas, assim diversificando a produção além de torná-la não vulnerável a eventos climáticos e ainda possuindo uma baixa relação custo benefício.

Diversas pesquisas são realizadas nessa área com o intuito de aumentar a eficiência desses processos e a qualidade dos produtos e serviços a estes relacionados[2]. Dessa forma diversos outros trabalhos similares a este tem sido desenvolvidos na última década, como visto em [3] desenvolveu um sistema onde era possível o controle da temperatura, luminosidade e umidade através de um aplicativo mobile, onde a conexão era estabelecida via webservice. Já em [4] os autores desenvolveram uma planta mais modesta e de tamanho reduzido onde a temperatura alterada através de uma lâmpada DC, a qual tinha sua luminosidade variada através de um PWM e um cooler responsável por resfriar o sistema, entretanto foi realizado um estudo comparativo entre o comportamento do sistema quando implementado um controlador PID básico e quando implementado o controle Split Range, nesse sistema o interação com o usuário também era realizado apenas por aparelhos mobile.

O artigo consiste no desenvolvimento de um ambiente onde a temperatura será uma variável controlada artificialmente de forma a mantê-la constante e marginalmente próxima à referência desejada, a qual será sempre maior que a temperatura ambiente.

### **2 Estrutura**

A estrutura da planta é formada por um módulo dimmer (Figura 1(a)) e uma lâmpada incandescente de 250W(Figura 1(b)), a qual permanecerá dentro de uma caixa de

<p><b>14 e 15 de março de 2019</b> <b>Curitiba - Paraná</b></p>
---

acrílico onde a temperatura será mantida isolada da temperatura externa. O módulo é capaz de chavear em circuitos AC, o qual permite controlar a potência fornecida a uma lâmpada incandescente, e conseqüentemente a sua luminosidade, através de pulsos de corrente devidamente temporizados nos pinos DIM e ZC do módulo. O sensor LM35 (Figura 1(b)) será responsável por mensurar a temperatura no interior da planta e transforma-la em informação, de forma a fechar a malha de controle. O sensor LM35 em modo de operação em escala reduzida pode medir de 2°C a 150°C, com resolução de 10mV/°C. Dentro da caixa de acrílico também há um cooler(Figura 1(b)) alimentado por uma tensão DC de 12V, o qual possui a função de incentivar a troca de calor por convecção dentro do ambiente termicamente isolado.



Figura 1 - (a) Arduino UNO e Dimmer. (b) Lâmpada incandescente, LM35 e cooler

O controlador utilizado será do tipo PID digital com filtro derivativo e será implementado por meio de um microcontrolador Arduino UNO(Figura 1(a)), através de um conjunto de comando que será periodicamente atualizado a cada segundo[5]. O valor fornecido pelo controlador será armazenado em um registrador responsável por transformar a seqüência de valores fornecidos em um sinal contínuo quantizado, o qual será utilizado para a temporizações entre os pulsos nos pinos DIM e ZC do modulo dimmer.

Em paralelo, está sendo desenvolvida uma interface IHM na linguagem C# capaz de se comunicar com o microcontrolador de forma a obter dados medidos, salva-los em arquivos de texto e traçar um gráfico em tempo real, demonstrando a evolução das variáveis observadas (temperatura no ambiente controlado e potência fornecida à lâmpada). Abaixo se encontra uma imagem da interface de funcionamento do sistemas:

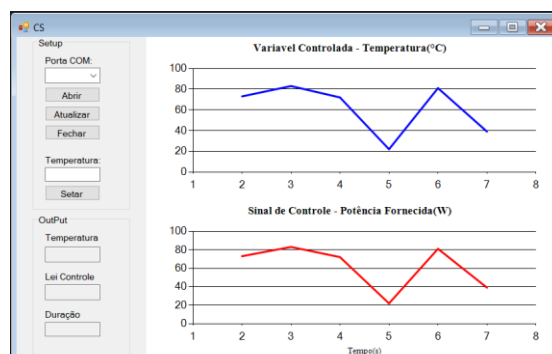


Figura 2 – IHM para a identificação da planta

Um menu simplificado auxilia o usuário na conexão com o microcontrolador, qual é realizada através da SerialPort, e os dados são salvos em arquivos de texto txt em uma pasta criada na área de trabalho do desktop conectado ao sistema.

Este trabalho apresentará a identificação e modelagem realizada para esse sistema na seção seguinte, o projeto dos controladores na próxima, enfim uma análise dos resultados obtidos e se encerrará com uma sucinta conclusão dos estudos realizados.

### 3 Modelagem e identificação

Com o objetivo de obter um modelo matemático que representasse a planta estudada com fidelidade, porém sem a necessidade de um estudo teórico, e muito custoso, sobre como ocorrem as trocas de calor no interior e no exterior do ambiente isolado, iniciou-se uma análise experimental. A análise experimental consiste na medição dos valores de saída ao longo de um determinado intervalo de tempo, com uma entrada conhecida[6]. Nessa pesquisa foram realizadas cinco análises experimentais até que se chegasse em um modelo matemático válido, o sinal de entrada utilizado em todas as cinco medições foi:

$$u(t) = \begin{cases} 0,5 \cdot W_{MAX}; & t \geq 0 \\ 0; & t < 0 \end{cases} \quad (1)$$

Na figura abaixo demonstra-se todas as medições realizadas durante o período de identificação:

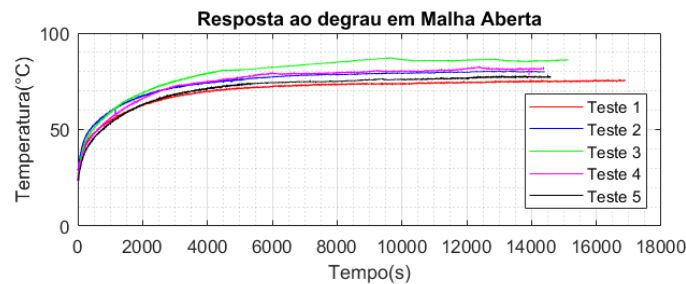


Figura 3 - Dado medidos experimentalmente

Como esperado, mesmo com o mesmo sinal de entrada em todos os casos, a saída apresentou diferentes comportamentos devido a perturbações externas durante o intervalo de medição.

A modelagem matemática foi realizado em todos os casos mas a medição 2 foi escolhida arbitrariamente como modelo a ser utilizado, muito disso se deve ao fato de que por simples observação pode-se concluir que essa foi a que menos sofreu perturbações e alcançou um valor mais próximo da média em regime permanente.

Na escolha dos modelo matemático do sistema, teve-se como possibilidades um modelo de primeira ordem e um de segunda ordem superamortecido devido a características facilmente observáveis no gráfico acima, como estabilidade e fase mínima, além de não possuir parte oscilatória ou atraso de transporte[6]. Dessa forma a resposta temporal ao degrau deveria se ajustar a um dos seguintes formatos de equação, pelo modelo de primeira ordem abaixo:

$$y(t) = K_p * \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right) + C \quad (2)$$

Onde  $K_p$ ,  $\tau$  e  $C$  representam o ganho estático, a constante de tempo e temperatura ambiente do sistema Ou o modelo de segunda ordem:

$$y(t) = K_{p1} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_1}}\right) + K_{p2} \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau_2}}\right) + C \quad (3)$$

Onde  $K_{p1}$  e  $\tau_1$  representam o ganho estático e a constante de tempo da exponencial referente ao polo mais próximo da origem,  $K_{p2}$  e  $\tau_2$  ganho estático e constante de tempo referente ao polo mais longe da origem e  $C$  representa a temperatura ambiente (Valor inicial do sistema)

O Método dos Mínimos Quadrados é extremamente útil para encontrarmos uma função matemática, que represente com boa aproximação, um conjunto de dados medidos em laboratório[7]. Entretanto o método possui uma limitações como nos casos em que há erro na variável dependente e quando existe uma relação não linear entre os parâmetros estudados[7]. Dessa forma, o método se tornaria ineficaz devido a relação

não linear entre os ganhos estáticos e suas respectivas constantes de tempo para cada polo.

Para vencer essa limitação foi descrita uma relação onde adotando valores para as constantes de tempo relacionadas a cada polo, poderíamos encontrar um erro quadrático, o qual representa a soma dos desvios quadráticos individuais referentes a cada ponto[7]. Com a análise dos erros quadráticos para cada valor adotado nas constantes de tempo poderíamos encontrar valores para as constantes de tempo que minimizassem tal valor de erro através de tentativa e erro.

Abaixo está a curva encontrada para o modelo de primeira ordem:

$$y(t) = 37,8741 \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{1766}\right)}\right) + 41,3385 \quad (4)$$

E a curva encontrada para o modelo de segunda ordem:

$$y(t) = 30,9868 \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{2270}\right)}\right) + 19,0528 \cdot \left(1 - e^{\left(\frac{-t}{210}\right)}\right) + 29,6805 \quad (5)$$

O modelo de primeira ordem se torna altamente indicado para modelar sistemas térmicos por possuir menor complexidade e representar de maneira fiel o comportamento do sistema[5], entretanto após uma comparação entre os erros quadráticos de ambos os modelos, foi decidido utilizar o modelo de segunda no projeto do controlador, devido à grande diferença entre os erros quadráticos em cada modelo.

Tabela 1 - Erros quadráticos dos Modelos

Modelo	Primeira Ordem	Segunda Ordem
Erro S	1,1736	0,1516

Na figura abaixo pode-se ver os dados medidos juntamente com as curvas de encontradas através do método estimador de mínimos quadrados, é mostrado apenas o início do processo, a primeira hora, pois assim se torna mais perceptível a diferença entre os dois modelos:

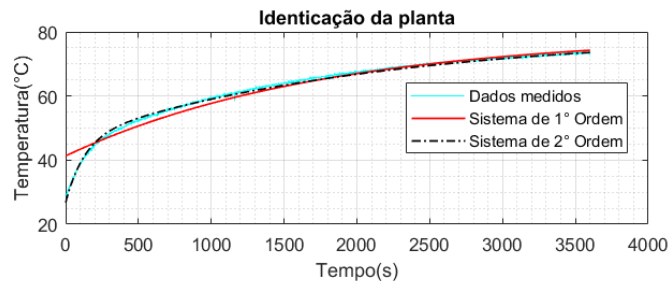


Figura 4 - Modelos matemáticos obtidos através do MMQ

Estabelecido a curva que representa a resposta temporal do sistema a um degrau de tamanho 0.5 na entrada da planta em malha aberta, pode-se determinar a função de transferência do processo através da seguinte relação:

$$G(s) = \frac{\mathcal{L}\{y(t) - y(0)\}}{\mathcal{L}\{u(t)\}} \quad (6)$$

Obtendo assim:

$$G(s) = \frac{2,546 \cdot 10^{-5} \cdot s + 2,56 \cdot 10^{-8}}{s^2 + 5,202 \cdot 10^{-3} \cdot s + 2,098 \cdot 10^{-6}} \quad (7)$$

### 3.1 Projeto dos controladores

Para controlar o sistema, foi escolhido o modelo de controlador PID com filtro derivativo, será implementado através de uma rotina de interrupções no microcontrolador.

O modelo para o controlador contínuo é apresentado abaixo e terá seus coeficientes determinados através do Método de Alocação de Polos:

$$C(s) = \frac{K_D \cdot s^2 + K_P \cdot s + K_I}{s \cdot (s + D)} \quad (8)$$

Além disso, existirá um condicionador de sinal na realimentação de forma a impedir o fenômeno de aliasing e/ou perturbações, condicionando de forma mais apropriada o sinal[5].

Devido ao fato de se tratar de um sistema térmico, se torna altamente indicado como pré-requisito do controlador não possuir sobressaltos, inclusive devido ao fato de que não há componente capaz de baixar a temperatura no sistema, implicando em um coeficiente de amortecimento ( $\zeta$ ) maior que um, igual a um e meio. Outro pré-requisito de projeto é o critério de assentamento ( $M_{ST}$ ) adotado como 5%. Dado ao fato de que sistemas térmicos são, em geral, sistemas muito lentos foi adotado como tempo de assentamento igual ( $T_S$ ) a 30min.

Então temos que a frequência do projeto é dado por:

$$w_n = \frac{-\ln(M_{ST})}{T_S \cdot \zeta} = \frac{-\ln(0,05)}{1800 \cdot 1,5} = 1,11095 \cdot 10^{-3} \text{ rad/s} \quad (9)$$

O modelo de polinômio desejado que será utilizado na equação diofantina é dado por:

$$pd(s) = (s^2 + 2 \cdot \zeta \cdot w_n \cdot s + w_n^2) \cdot (s + w_{a1}) \cdot (s + w_{a2}) \quad (10)$$

A ferramenta MatLab foi utilizada para determinar a localização dos polos auxiliares de forma que a função de transferência de malha fechada não possua sobressinal ou fase não mínima.

A alocação de polos dos da função de malha fechada é dada igualando o denominador simplificado da mesma com o polinômio desejado, chegando então ao equação diofantina[5]. Após realizar tal equacionamento a encontramos a seguinte função para o PID:

$$C(s) = \frac{20,2 \cdot s^2 + 0,2854 \cdot s + 1,184 \cdot 10^{-4}}{s \cdot (s + 9,405 \cdot 10^{-4})} \quad (11)$$

Abaixo se encontra uma comparação entre o comportamento do modelo matemático do sistema em malha aberta e em malha fechada, nesta comparação foi utilizado o valor de temperatura em regime permanente do sistema em malha aberta como valor de referência para o sistema em malha fechada de forma a facilitar a análise:

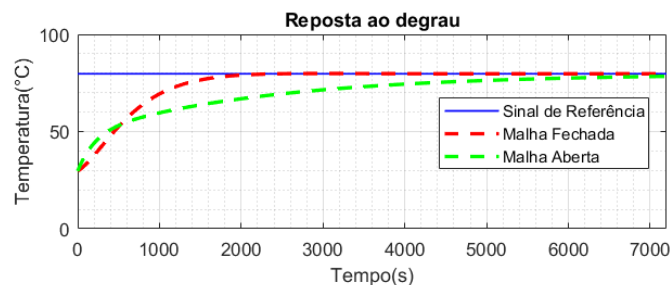


Figura 5 - Comparação do sistema em Malha Aberta e Malha Fechada

Pode-se ver que o sistema se comporta de acordo com os critérios de projeto, como sobre sinal nulo, erro em regime permanente nulo e tempo de acomodação de trinta minutos.

Para implantá-lo no microcontrolador é necessário o que o controlador seja discretizado então foi aplicado o método de Aproximação de Tustin, com período de amostragem igual a 1s, de forma a encontramos a seguinte função no domínio Z:

$$C(z) = \frac{20,3349 \cdot z^2 - 48,3845 \cdot z + 20,0497}{z^2 - 1,9991 \cdot z + 0,9991} \quad (12)$$

Os parâmetros da função acima será aplicada em uma rotina de interrupções no microcontrolador através de uma equação de diferenças.

## 4 Resultados

Após a implementação do controlador, foram realizados dois teste para observar o comportamento do sistema, o primeiro ainda sem o filtro passa baixa na realimentação citado acima, apenas havia uma constante que multiplicava a leitura do sensor de temperatura de forma a tornar válida a comparação desse sinal com o valor colocado como sinal de referência e os resultados obtidos foram próximos do esperado como podemos ver nas imagens abaixo, a primeira representa o valor da variável controlada ainda sem a implementação do filtro na realimentação:

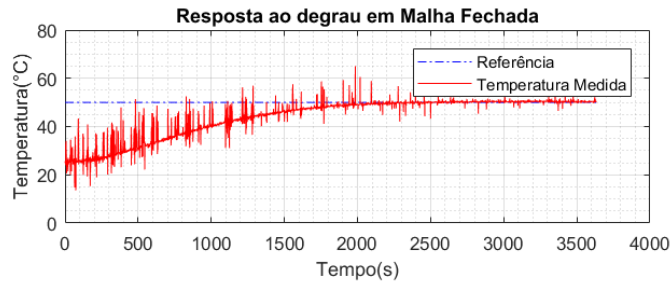


Figura 6 - Comportamento do sistema em Malha Fechada

Pode-se observar que existe um grande ruído, ainda assim o sistema se comportou de forma estável e cumpriu como todos os critérios de projeto estipulados, sobressaltos e erro em regime permanente nulos e se acomodou em menos de trinta minutos, validando tanto a modelagem do sistema quanto o controlador elaborado.

Na figura abaixo é mostrado a potência fornecida à lâmpada durante esse mesmo período:

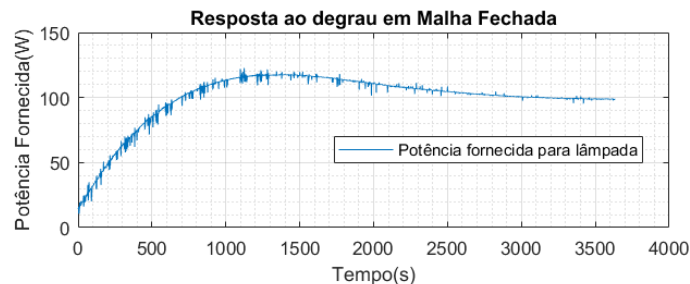


Figura 7 - Esforço de controle do sistema

Assim como ocorreu durante a simulação, o esforço era inicialmente próximo de 25W e alcançou seu valor máximo de 120W de acordo com a simulação, entretanto, se acomodou em um valor de 100W capaz de manter a temperatura constante, porém acima do que ocorreu na simulação, isso pode ter sido causado tanto por imprecisão na modelagem quanto por perturbações externas ao sistema, porém tal fato não invalida a modelagem.

Abaixo é mostrado o comportamento da variável controlada, a temperatura na caixa de acrílico, após a implementação do filtro passa baixas na realimentação:

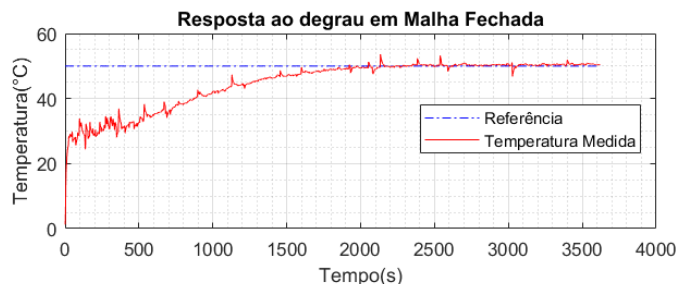


Figura 8 - Comportamento do sistema em Malha Fechada



Pode-se observar que o comportamento do sistema não se alterou significativamente e a curva de temperatura foi similar a primeira medição, ainda cumprindo todos os critérios de projeto, sobressaltos e erro em regime permanente nulos e se acomodou em menos de trinta minutos, entretanto houve uma diminuição significativa nos picos de temperatura durante a medição.

Na imagem abaixo é mostrado o esforço de controle realizado pelo sistema após a implementação do filtro na realimentação:

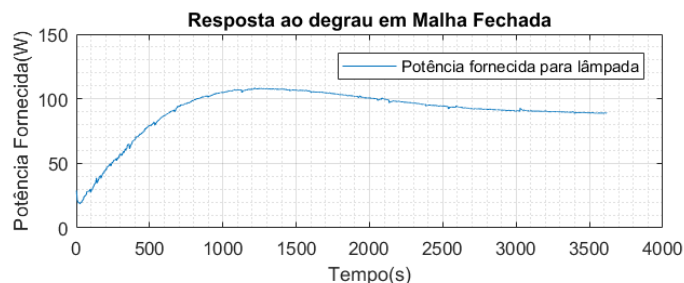


Figura 9 - Esforço de controle do sistema

O sistema continua se comportando de acordo com o observado na simulação e de forma similar a primeira medição, o esforço era inicialmente próximo de 25W e chegou a próximo de 110W, seu valor máximo durante a medição e se acomodou em um valor de 100W capaz de manter a temperatura no interior do planta constante.

## 5 Conclusão

O modelo de plantio protegido tem sido de grande importância no setor agrário pois possui muitas vantagens com relação ao plantio em céu aberto e uma ótima relação custo benefício, tendo isso em vista, esse projeto objetivou o estudo dos métodos identificação e de controle clássicos que possibilitem uma melhoria na eficiência e na estabilidade de sistemas térmicos aplicados em estufas.

Dessa forma, discutimos aqui a utilização do Método dos Mínimos Quadrados para a identificação de sistema de primeira ordem e sistemas de segunda ordem superamortecidas e a utilização de técnicas de controle clássico no intuito de desenvolver um controle PID com filtro derivativo, os quais se mostram eficazes no controle de temperatura, obedecendo todas as especificações de projeto.

Pode-se observar um comportamento mais estável do sistema quando implementado um filtro passa baixas na realimentação.

Foram desenvolvidos dois softwares: um para o controlador Arduino, responsável por gerenciar o fornecimento de potência para a lâmpada e realizar a rotina onde é implementado o controle discretizado, e outro para computador que facilitará a interação do usuário com a ferramenta, plotando o valor da temperatura em tempo real e salvando os dados para análise posterior.

## References

1. Hortaliças em Revista, Agricultura Protegida, Embrapa, Brasília – DF, 2015.
2. P. B. Barbosa. Projeto de um Sistema de Controle Térmico Moderno para Superfícies Estendidas, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2015.
3. D. G. Fernandes; E. Preuss; T. L. Silva. Sistema Automatizado de Controle de Estufas para Cultivos de Hortaliças, Universidade Federal de Santa Maria, 2017.
4. O. L. D. Santos; J. D. S. M. Junior; M. R. M. Neves. Sistema de Controle de Temperatura para uma Estufa com Monitoramento via Aplicativo. Revista de Ciência e Tecnologia. 2017, v. 3, n. 4.

5. A. S. Bazanella, *Sistemas de Controle: Princípios e Métodos de Projeto*, UFRGS, Rio Grande do Sul, 2005.
6. A. A. R. Coelho; L. S. Coelho. *Identificação de Sistemas Dinâmicos Lineares*, UFCS, Santa Catarina, 2016.
7. O. Helene. *Método dos Mínimos Quadrados com Formalismo Matricial*, LF Editorial, São Paulo, 2013.