

## **PROPOSTA DE SISTEMA DE CONTROLE DE TEMPERATURA DIDÁTICO EM MALHA FECHADA**

**Edézio Marmo Rezende Moura** – marmomoura@hotmail.com

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus João Pessoa  
Avenida Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe  
58.015-435 – João Pessoa – Paraíba

**Jeanne Elizabeth de Paula Braquehais** –

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia da Paraíba – Campus João Pessoa  
Avenida Primeiro de Maio, 720, Jaguaribe  
58.015-435 – João Pessoa – Paraíba

**Resumo:** O presente trabalho trata de desenvolver um de estudo sobre a identificação um sistema de controle de temperatura e sintonia do seu controle PID (Proporcional Integral Derivativo). O sistema foi implementado com o software LabVIEW, que possui grandes recursos de análise e blocos de dados e resultados. Foi utilizado também um Arduino como microcontrolador do sistema e módulo de aquisição de dados, uma estufa confeccionada de madeira e vidro com capacidade de 25 litros de volume, construído um circuito dimmer utilizando mosfet como chave de potência controlado por pulsos pwm, sensor de temperatura lm35, e uma lâmpada incandescente de 100W como atuador para aquecimento através do efeito Joule (calor). O sistema é um modelo em escala reduzida, portátil desenvolvido com o objetivo de auxiliar o ensino e aprendizagem da disciplina Teoria de Controle quando forem abordados os temas identificação de sistemas e controle PID. O resultado deste trabalho provou ser possível implementar um controle eficiente de temperatura com relativa facilidade além da identificação do sistema.

**Palavras-chave:** controle PID, LabVIEW, Arduino, Dimmer, Lâmpada Incandescente.

## 1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de controle são utilizados nas mais diversas áreas da indústria, se tornando essenciais em qualquer campo da engenharia e da ciência. Exemplos de sua utilização estão em sistemas robóticos, veículos espaciais e em operações industriais que envolvam o controle de temperatura, vazão, pressão, nível, posição, etc [1].

Atualmente, se dispõe de uma variedade de técnicas para controle contínuo de processos em tempo real. Com o advento do computador e seu poder de processamento, abriu-se um enorme campo para sua crescente utilização no controle automático desses processos. Os controladores que antes eram desenvolvidos analogicamente, hoje podem ser substituídos por programas de controle, os tornando mais versáteis, flexíveis e precisos. Além disso, o computador pode detectar situações de alarme, permitindo uma melhor proteção do processo controlado, como por exemplo, em uma situação de mau funcionamento, além de possibilitar a obtenção de tabelas, gráficos e dados referentes ao estado do controlador e do processo controlado, facilitando assim a compreensão.

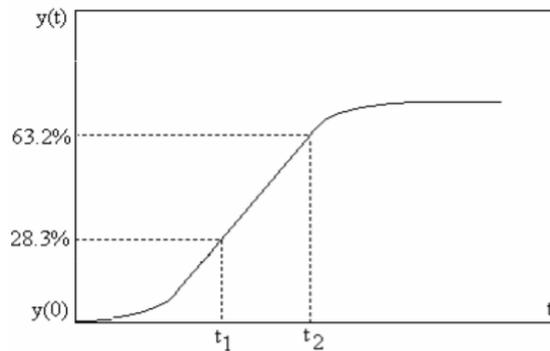
## 2. REFENCIAL TEÓRICO

A modelagem matemática é a área do conhecimento que estuda maneiras de desenvolver e implementar modelos matemáticos de sistemas reais. A identificação de sistemas é uma área do conhecimento que estuda e introduz técnicas alternativas da modelagem matemática. Uma das características dessas técnicas é que pouco ou nenhum conhecimento prévio do sistema é necessário e, conseqüentemente, tais métodos são também referidos como modelagem ou identificação caixa preta, ou modelagem empírica. Em muitos casos é preferível usar técnicas de identificação para se obter modelos que descrevam o comportamento de um sistema. O que se pretende descrever com tais modelos são as relações de causa e efeito entre as variáveis de entrada e de saída. Nesse caso, o tipo de modelos, as técnicas usadas e os requisitos necessários são bastante distintos dos correspondentes na modelagem pela natureza do processo.

### 2.1 MÉTODO SMITH

O método de identificação de sistemas de Smith (1985) propôs que os valores de  $\theta$  e de  $\tau$  sejam selecionados de tal modo que o modelo e as respostas reais coincidam em dois pontos na região de elevada taxa de mudança, como mostra na figura abaixo:

Figura 1: Método Smith



Fonte: Control System Engineering

$$\tau = 1.5 \times (t_2 - t_1) \quad (1)$$

$$\theta = t_2 - \tau \quad (2)$$

$$G(s) = \frac{K e^{-\theta s}}{\tau s + 1} \quad (3)$$

## 2.2 GANHO

O  $K$  é o valor do ganho do sistema e  $\tau$  é a constante de tempo. Esta constante de tempo caracteriza a velocidade com que o sistema responde a uma entrada. Sendo que,  $\Delta y$  é o valor da variação da saída pela entrada do sistema em resposta ao degrau. E  $\Delta u$  é o valor da variação do degrau aplicado ao sistema. É possível determinar o valor do ganho  $K$  pela seguinte regra:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} \quad (4)$$

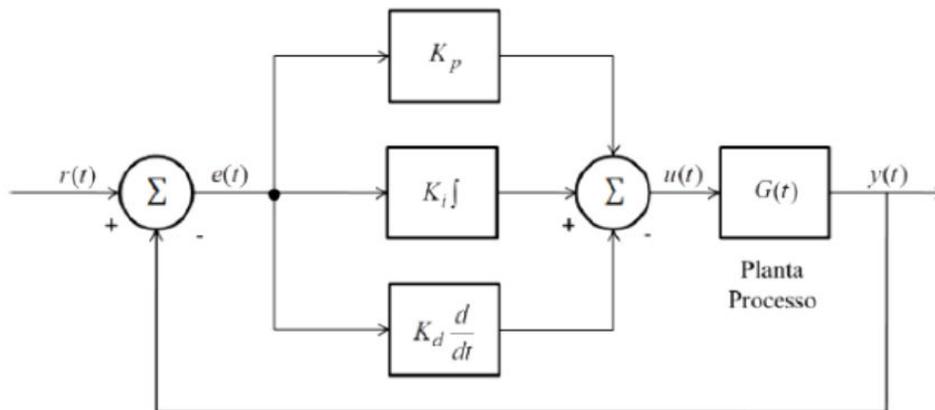
## 2.3 O CONTROLADOR PID

Os controladores são equipamentos utilizados em processos industriais que têm a função de manter os processos nos pontos operacionais desejados, ou seja, de acordo com aplicação, além de prevenir condições instáveis no processo que podem pôr em risco pessoas e/ou equipamentos [2].

Os controladores devem manter o processo em seu estado operacional ótimo, bem como eliminar perturbações e trabalhar em faixas seguras para a operação. O controlador PID é como uma função do passado, do presente e que “prevê” o futuro. O termo proporcional dá à saída do controlador um componente que é função do estado presente do sistema. Como a saída do integrador depende da entrada para todos os instantes anteriores, este componente da saída do compensador é determinado pelo estado passado do sistema. Esta saída não varia instantaneamente e confere uma inércia ao sistema. A saída do diferenciador é uma função da inclinação de sua entrada e assim pode ser considerada com uma previsão do estado futuro do sistema. Portanto, a parte

derivativa do compensador pode acelerar a resposta do sistema pela antecipação do estado futuro. Evidentemente, se a informação da entrada estiver incorreta (ruído), podem ocorrer resultados insatisfatórios nesta previsão. Suas três ações de controle são ilustradas de acordo com a figura 4.

Figura 2: Diagrama de blocos de um controlador PID em topologia paralela



Fonte: Adaptado de Ogata

As reuniões destas três ações de controle básicas constituem um dos mais utilizados controladores na indústria, o PID. A sintonia deste tipo de controlador consiste em ajustar os ganhos acima mencionados, buscando atender as especificações exigidas para determinado problema.

## 2.5 SINTONIA DO CONTROLADOR CHIEN, HRONES e RESWICK (CHR)

Este método propõe dois critérios de desempenho, a resposta mais rápida possível sem sobressinal, e a resposta mais rápida com sobressinal máxima de 20%. Realiza-se o teste em malha aberta e obtêm os valores de L e T.

Figura 3: Sintonia do controlador usando o método CHR com critério sem sobrevalor

Tipo de Controlador	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$\frac{0.3 \times T}{(K \times L)}$	-	-
PI	$\frac{0.35 \times T}{(K \times L)}$	$1.16 \times T$	-
PID	$\frac{0.6 \times T}{(K \times L)}$	$T$	$\frac{L}{2}$

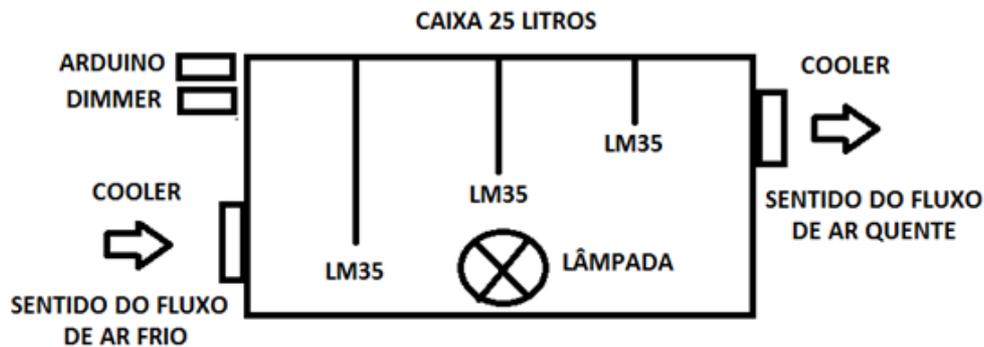
Fonte: Adaptado de Campos & Teixeira

Onde  $T = \tau$  e  $L = \Theta$

### 3. MATERIAIS E MÉTODOS

Um dos softwares que contém amplas ferramentas para técnicas de controle é o LabVIEW®. Este projeto oferece uma opção de controle de temperatura em um ambiente caracterizando-se como uma solução na área de automação industrial. O sistema desenvolvido utiliza um controlador proporcional, integral e derivativo (PID) desenvolvido na plataforma gráfica LabVIEW® como interface de códigos de programação e IHM, o Arduino Mega 2560® como microcontrolador e interface de aquisição de dados analógicos, saídas digitais e sinais de controle. O sistema proposto foi projetado e foram realizados testes a fim de verificar seu comportamento durante a coleta de dados. Este protótipo foi desenvolvido em escala reduzida a fim de representar em laboratório o controle de temperatura PID em malha fechada, conforme mostrado na figura abaixo.

Figura 4: Esquemático do sistema proposto

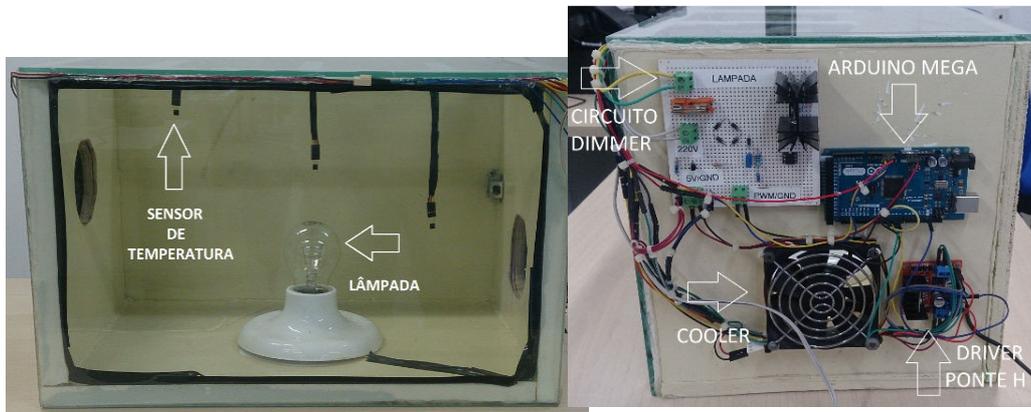


Fonte: Autor

O protótipo foi montado em uma caixa de madeira e vidro com dimensões de 40 x 25 x 25 cm, resultando um volume 25000cm<sup>3</sup> ou 25 litros para simular um ambiente fechado, minimizando as interferências externas e perturbações, para um melhor desempenho da malha de controle.

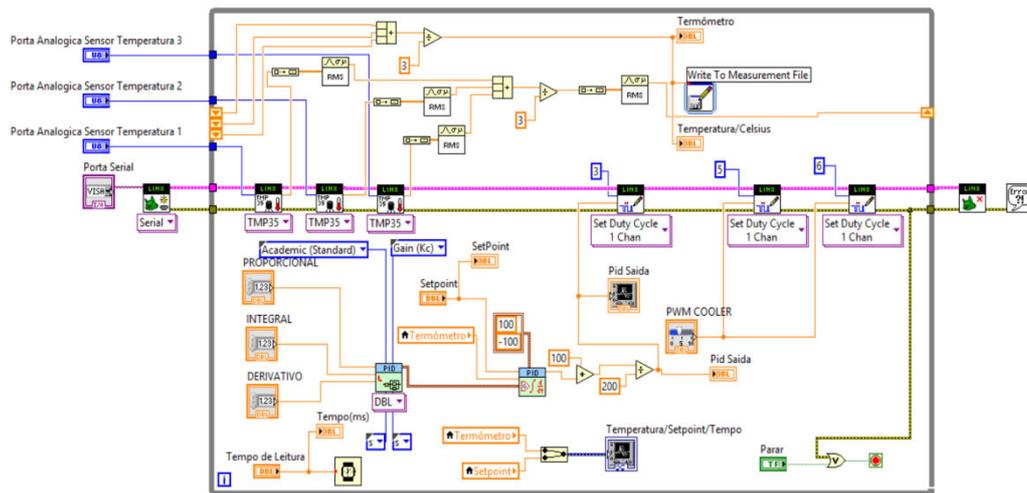
O sistema usa como fonte de aquecimento uma lâmpada incandescente de 100W de potência, cerca de 95% do consumo de energia elétrica é convertida em energia térmica, isto é, calor. A qual, é acionada pelo circuito *dimmer* onde pode controlar o brilho na lâmpada através de pulsos *pwm*. Há três sensores de temperatura que trabalham em conjunto para obter uma melhor média da temperatura dentro da caixa, localizados equidistantes, um monitora a entrada de ar frio na caixa, outro a saída de ar quente e outro próximo a fonte de calor. Existe uma entrada ar e uma saída de ar, ambas com ventoinhas como fonte de perturbação para o sistema, injetando ar frio para dentro da caixa e extraindo o ar quente mantendo dessa forma um fluxo de ar. Tais componentes estão interligados ao microcontrolador arduino mega, o sistema proposto pode ser visto na figura abaixo:

Figura 5: Planta do sistema de controle de temperatura



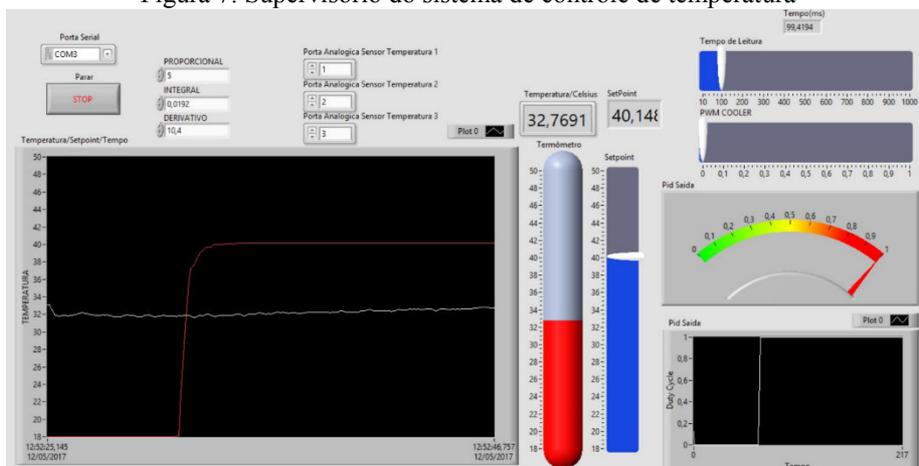
Fonte: Autor

Figura 6: Blocos de programação de controle no software LabVIEW



Fonte: Autor

Figura 7: Supervisório do sistema de controle de temperatura



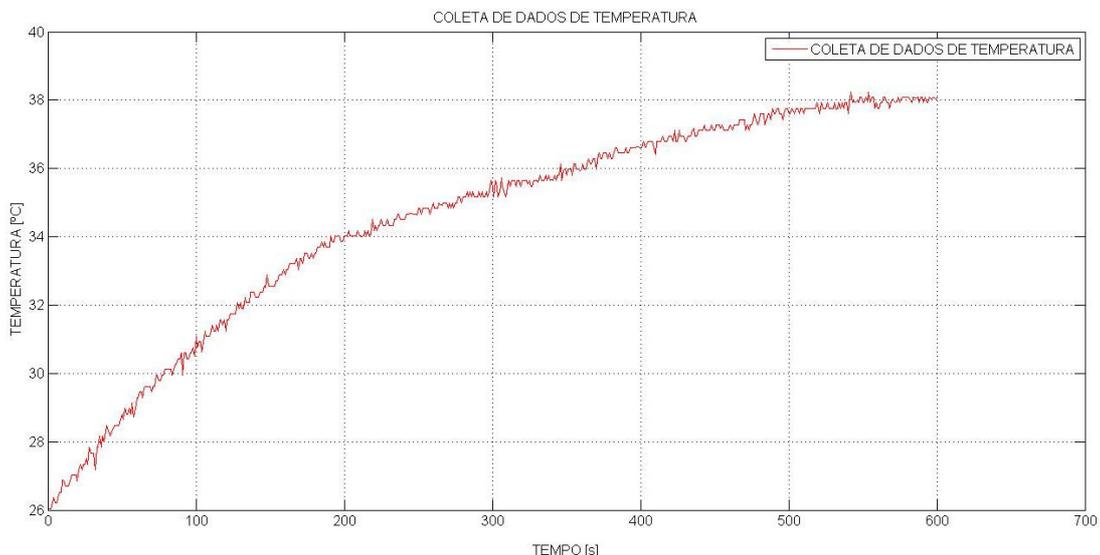
Fonte: Autor

## 4. APRESENTAÇÃO E RESULTADOS

### 4.1 AQUISIÇÃO DE DADOS E CURVA CARACTERÍSTICA DA PLANTA EM MALHA ABERTA

Para a obtenção da curva característica da planta do sistema, foi aplicado um degrau de entrada ao sistema em malha aberta via experimental. Através dos 3 sensores de temperatura LM35, de acordo com a figura 5, juntamente com a interface microcontrolador e diagramas de blocos de programação no software LabVIEW, foram coletados os dados de temperatura em graus Celsius a cada 1 segundo até em que a temperatura se estabilizou. Foram realizadas 600 amostras durante 10 minutos. Assim, realizada a coleta de dados foi possível gerar a curva característica da planta em malha aberta, como mostra na figura abaixo:

Figura 6: Coleta de dados de temperatura



Fonte: Autor

### 4.3 GANHO DA PLANTA

Para obter o ganho estático do sistema, foi necessário aplicar um degrau ao sistema. No qual ocorre uma variação abrupta na entrada, esta variação é denominada de  $\Delta u$ , no qual foi inserida uma tensão de 2,5V proveniente do pulso *pwm* do Arduino. E em seguida, é verificado o comportamento da saída,  $\Delta y$ , do sistema até que o mesmo permaneça estável em regime permanente, que variou da temperatura inicial de 26,04°C e permaneceu estável em 35,05°C. De acordo com a equação (4), os valores de  $\Delta u$  e  $\Delta y$  são descritos abaixo:

$$K = \frac{\Delta y}{\Delta u} = \frac{35,05 - 26,04}{2,5 - 0} = 4,8 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{V} \quad (5)$$

#### 4.4 FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DA PLANTA ATRAVÉS DO MÉTODO SMITH

De acordo com a equações (1) e (2), e através da curva característica da planta em malha aberta foi encontrado os valores de T1 e T2:

$$\begin{aligned} t1 &= 62 \text{ s} & \tau &= 1,5 \times (t2 - t1) \\ t2 &= 173 \text{ s} & \tau &= 166,5 \text{ s} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\theta = 173 - 166,5 = 6,5 \quad (7)$$

Assim, resultou na seguinte função de transferência:

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{(\tau s + 1)} = \frac{4,8 \times e^{-6,5s}}{(166,5s + 1)} \quad (8)$$

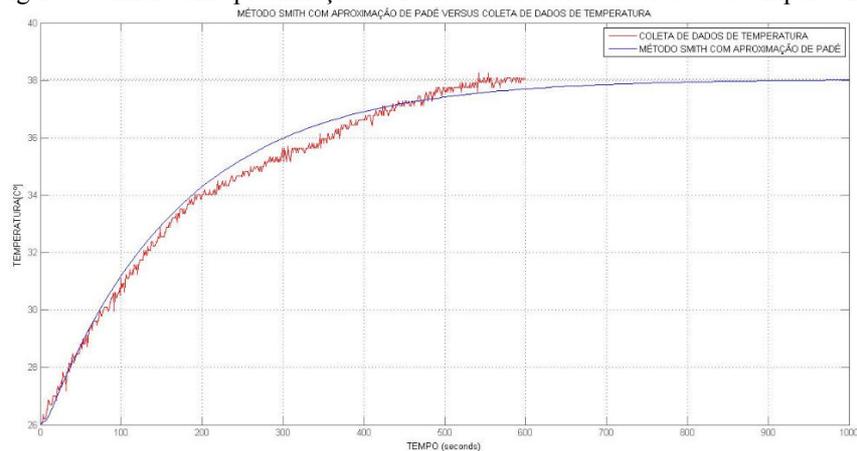
Aproximação de Padé:

$$e^{-\theta s} = \frac{2 - \theta s}{2 + \theta s} \Rightarrow e^{-6,5s} = \frac{2 - 6,5s}{2 + 6,5s} \quad (9)$$

Substituindo a aproximação de Padé em  $G(s)$ , foi obtida a seguinte função:

$$G(s) = \frac{-31,2s + 9,6}{1082s^2 + 339,5s + 2} \quad (10)$$

Figura 7: Smith com aproximação de Padé versus Coleta de dados de temperatura



Fonte: Autor

#### 4.5 SINTONIA DO CONTROLADOR PID PELO MÉTODO CHR COM CRITÉRIO SEM SOBREALOR

Após obter as funções de transferências da planta em malha aberta com seus devidos métodos, em seguida foi possível calcular a sintonia dos parâmetros do controlador PID.

$$G(s) = \frac{Ke^{-\theta s}}{\tau s + 1} = \frac{4,8 \times e^{-6,5s}}{(166,5s + 1)} \quad (11)$$

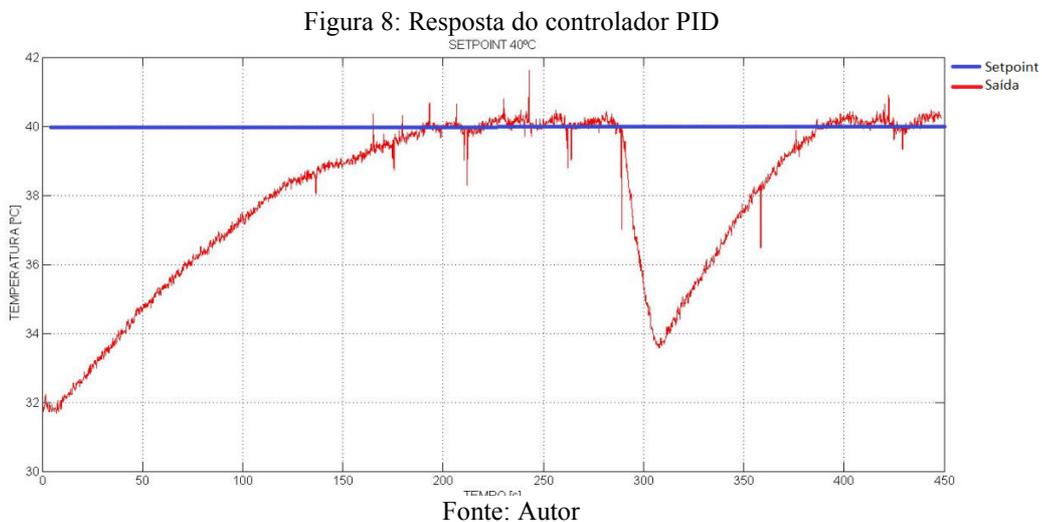
$$kp = \frac{0,6 \times \tau}{(k \times \theta)} = \frac{0,6 \times 166,5}{4,8 \times 6,5} = 3,2, \text{ ajustado para } 5. \quad (12)$$

$$ki = \frac{kp}{\tau} = \frac{3,2}{166,5} = 0,0192 \quad (13)$$

$$kd = kp \times \frac{\theta}{2} = 3,2 \times \frac{6,5}{2} = 10,4 \quad (14)$$

#### 4.6 TESTE REAL

Após configurada uma temperatura de referência de 40°C e utilizando a sintonia do controlador PID pelo método de CHR com critério sem sobrevalor e técnica de modelagem empírica da planta pelo método de Smith, o sistema estabilizou normalmente em 280 segundos. Após, foi aplicada uma perturbação ligando-se os *cooler's* em tensão máxima, baixando a temperatura para 34°C. Diante da situação, o controlador atuou e controlou a temperatura, normalizando o sistema 150 segundos após a perturbação. Pode ser observada a reação no gráfico seguinte.



### 5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sistema de controle é um dos conceitos mais importantes para a automação. A necessidade de adaptar as funcionalidades de cada sensor, circuito de potência e microcontrolador constituem um desafio inerente em qualquer projeto de aquisição de dados. Por outro lado, a capacidade do microcontrolador e o potencial do software LabVIEW, permitiram simplificar o hardware construído para o condicionamento de sinal, reduzindo custos de material e aumentando a confiabilidade do sistema, uma vez que, quanto mais hardware utilizado em um projeto, mais sujeito a erros estará o sistema. Por isso, buscou-se atribuir a responsabilidade dos ajustes técnicos, o máximo

possível, ao software. A utilização do controlador PID pela sintonia CHR e aliado a técnica de modelagem da planta pelo método de Smith, apresentou um tempo menor de resposta, além de proporcionar o controle efetivo da temperatura do ar quente dentro da estufa, com erro menor que 0,5 °C e obtendo resposta rápida e satisfatória diante a perturbações com eficiência.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### ***Livros:***

[1]AGUIRRE, L. A. Enciclopédia de Automática Controle e Automação 1<sup>a</sup>. ed. Edgard Blucher, 2007.

[2] OGATA, Katsuhiko. Modern Control Engineering. 5.ed. Nova Déli: Asoke K. Ghosh, 2005.

### ***Internet:***

Matlab, Disponível em: <<https://www.mathworks.com/products/matlab.html>> Acesso em: 30 de Maio de 2016.

NORMAN S. Nise.: Control Systems Engeering. 6<sup>o</sup> edição. Disponível em: <[http://web.itu.edu.tr/aybakana/pdf/NISE\\_Control\\_Systems\\_Engineering.pdf](http://web.itu.edu.tr/aybakana/pdf/NISE_Control_Systems_Engineering.pdf) >. Acesso em: 4 de fevereiro de 2017.

CAMPOS, Teixeira.: Controles Típicos de Equipamentos e Processos Industriais. 2<sup>a</sup> Edição. Blucher, 2010.

## PROPOSAL OF CLOSED THERMAL TEMPERATURE CONTROL SYSTEM

***Abstract: The present work tries to develop a study on the identification of a temperature control system and tuning of its PID (Proportional Integral Derivative) control. The system was implemented with LabVIEW software, which has great analytical capabilities and data blocks and results. An Arduino was also used as microcontroller of the system and data acquisition module, a wood and glass oven with a capacity of 25 liters of volume, built a dimmer circuit using mosfet as power switch controlled by pwm pulses, temperature sensor lm35 , And a 100W incandescent bulb as actuator for heating through the Joule (heat) effect. The system is a small scale, portable model developed with the objective of assisting the teaching and learning of the discipline Control Theory when addressing the issues of system identification and PID control. The result of this work proved to be possible to implement an efficient temperature control with relative ease besides the identification of the system.***

***Key-words:***control PID, LabVIEW, Arduino, Dimmer, incandescente bulb.