

# CONTROLE DE TEMPERATURA DE SONDA LAMBDA DE USO VEICULAR APLICADA EM UM SENSOR DE TEOR DE OXIGÊNIO PARA USO EM SISTEMAS DE COMBUSTÃO DE BIOMASSA

JAIME ALEX BOSCOV<sup>1</sup>, GIOVANNI BARROSO<sup>2</sup>, GUSTAVO DE ALENCAR FERNANDES<sup>3</sup>

1. *Departamento de Engenharia de Teleinformática, Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici, Fortaleza, CE  
E-mails: aboscov@gmail.com*

2. *Depto. de Física, Universidade Federal do Ceará  
Campus do Pici, Fortaleza, CE  
E-mails: gcb@fisica.ufc.br*

3. *Centro de Ciências Tecnológicas, Universidade de Fortaleza  
Campus da Unifor, Fortaleza, CE  
E-mails: gustavofer@gmail.com*

**Abstract**— This article is about the project and construction of a temperature control system for a lambda probe, used in the development of an Oxygen level sensor for applications in biomass burning systems. This kind of probe needs a good temperature control to work accurately. This article describe the identification of a mathematical model of the probe and the project and implementation of a temperature control, with field verification of the system performance.

**Keywords**— lambda probe, biomass combustion, control, system identification

**Resumo**— O artigo trata do projeto e implementação de um sistema de controle de temperatura de uma sonda lambda de uso veicular, utilizado no desenvolvimento de um sensor de teor de oxigênio para aplicação em sistemas de combustão de biomassa. Para um bom funcionamento desse elemento sensor é necessário o controle preciso de temperatura. O trabalho compreendeu o levantamento de um modelo matemático da sonda, o projeto e a implementação de um controlador de temperatura, com verificação do desempenho do sistema em uma aplicação real.

**Palavras-chave:** sonda lambda, combustão de biomassa, controle, identificação de sistemas

## 1 Introdução

A utilização de biomassa para produção de vapor em caldeiras industriais está se popularizando em função do aumento do custo de combustíveis fósseis, com destaque para o gás natural. A maioria dos estabelecimentos industriais da região Nordeste do Brasil que produz vapor utiliza biomassa como matéria prima, seja na forma de lenha em toras, lenha picada (cavaco) ou briquetes. A admissão de combustível na fornalha de uma caldeira geralmente é realizada de maneira manual e a admissão de ar é realizada através de moto-ventilador com velocidade fixa, sempre superdimensionado para garantir excesso de ar no processo. O resultado é um baixo rendimento da operação com grande desperdício de biomassa, uma vez que o processo de queima é sempre realizado com a relação combustível/comburente fora da faixa ideal, com elevada perda de calor pela chaminé.

O controle da relação combustível/comburente é fundamental para aumento do rendimento energético das caldeiras, o que pode trazer economias expressivas no consumo de biomassa, com impactos econômicos e ambientais consideráveis. Para esse controle é necessário um método para

medir em tempo real a relação combustível comburente na reação de combustão. De acordo com Bazzo (1995), uma maneira simples e eficaz de avaliar essa relação é através da análise do teor de Oxigênio nos gases de escape. A partir dessa informação é possível inferir a relação ar combustível na fornalha visto que a composição do ar de admissão é plenamente conhecida e há boas estimativas do teor de Oxigênio ideal nos gases de escape de uma fornalha que utiliza biomassa (J. Collazo, J. Porteiro, 2012).

Caldeiras de última geração utilizam sensores de teor de Oxigênio de uso industrial. Tratam-se de equipamentos de alto custo que são inviáveis para aplicação em caldeiras de pequeno porte e, principalmente, caldeiras antigas.

## 2 Proposta

Esse artigo trata de um dos aspectos de um projeto que visa a criação de um sensor de teor de Oxigênio de baixo custo, adequado para aplicações com combustão de biomassa. O ponto de partida é a utilização de um sensor de Oxigênio de uso veicular (sonda lambda), de baixíssimo custo em função de sua fabricação em larga escala. Esse tipo de sensor foi desenvolvido em 1976 pela empresa Robert

Bosch GmbH e hoje é utilizado em praticamente todos os veículos automotores existentes. Essas sondas produzem uma corrente de saída relacionada ao nível de oxigênio presente nos gases de escape (Jakobson 2007), mas sua resposta é bastante não linear, sendo útil para indicação da combustão próxima da estequiometria, ou seja, da combustão completa, sem excesso ou falta de comburente. O processo de queima de biomassa atinge maior rendimento com cerca de 30 a 60% de excesso de oxigênio, com pressões e temperaturas dos gases de escape bem diferentes dos encontrados em motores de combustão interna. Dessa forma, para utilização dessas sondas, é necessário o desenvolvimento de um equipamento que interprete e processe as informações do sensor e apresente uma saída linear em uma faixa bem mais ampla. Um dos aspectos fundamentais é o controle de temperatura da sonda, necessário para uma operação satisfatória do equipamento. Este artigo trata justamente do projeto e implementação desse controle

### 3 Métodos

Primeiramente foi selecionado o modelo de sonda lambda a ser utilizado. Optou-se pela sonda de banda larga LSU 4.9 de fabricação Bosch. Foi projetado e construído um hardware capaz de alimentar a sonda de maneira apropriada, efetuar o controle de temperatura e interpretar o sinal de saída da mesma.

O projeto partiu de circuitos eletrônicos básicos sugeridos pelo próprio fabricante da sonda, com utilização de um circuito integrado específico para a aplicação (Circuito Integrado Bosch CJ 125) e um microcontrolador. O elemento sensor só tem um desempenho aceitável e mensurável se o mesmo se mantiver em uma temperatura específica (780°C para a sonda Bosch LSU 4.9). O hardware desenvolvido possui um circuito de potência controlado por largura de pulso (PWM) que permite a modulação da tensão de alimentação de uma resistência interna de aquecimento da sonda. A sonda possui também uma resistência interna cujo valor varia em função da temperatura, o que permite uma leitura indireta da temperatura e, conseqüentemente, o fechamento de uma malha de controle.

Primeiramente foi elaborado um algoritmo de controle de temperatura bastante simples, tipo *On-Off*, que se mostrou ineficaz, causando grande instabilidade na operação do sensor.

A partir daí concentrou-se esforços para um refinamento do controle de temperatura da sonda. O primeiro passo foi a identificação do sistema para elaboração de um modelo matemático que pudesse servir de base para o projeto de um controlador de temperatura em malha fechada eficiente.

A primeira aproximação que podemos fazer é assumir que a sonda possui uma capacidade térmica e há uma entrada de calor através da resistência de aquecimento e uma saída de calor através da convecção com os gases no entorno da sonda. A modelagem

da perda de calor por convecção é um tanto complexa pois depende da temperatura dos gases no entorno da sonda e da velocidade dos mesmos. Como essas duas variáveis dependem das condições de instalação e aplicação do instrumento, faremos o estudo em um ambiente controlado, com temperatura ambiente e convecção natural. Como a perda de calor está diretamente relacionada à diferença de temperatura entre a sonda e o ambiente, é de se esperar que a perda diminua quando a sonda for utilizada em uma chaminé, cuja temperatura poderá se situar na faixa dos 300°C. Nessas condições o tempo de resposta da sonda deve ser menor e, portanto, espera-se que o controle projetado para operação em temperatura ambiente seja adequado para operação em temperatura de trabalho. A realimentação do sistema deve superar essa simplificação do modelo.

Como estamos tratando de um sistema térmico, presume-se que a dinâmica do mesmo seja essencialmente de primeira ordem (Ogata, 2002). Para identificação do sistema, optou-se pela análise da resposta do mesmo a uma entrada degrau, o que permitiria a identificação da função de transferência de maneira bastante simples. A variável de entrada é a tensão aplicada na resistência de aquecimento. A taxa de calor introduzida na sonda varia com o quadrado da tensão aplicada e é inversamente proporcional à resistência de aquecimento, que varia consideravelmente em função da temperatura. Dessa forma a resposta do sistema a variações da tensão de entrada deverá ser estudada em uma faixa próxima à temperatura de trabalho da sonda, pois certamente a dinâmica é distinta em outras faixas.

Para estudo da resposta do sistema é necessário o levantamento de uma curva da temperatura em função do tempo para uma entrada de tensão degrau. O sistema não permite a leitura direta da temperatura da sonda, mas sim de uma grandeza (resistência) relacionada à temperatura interna. Essa grandeza é medida pelo CJ125 e disponibilizada através de uma porta analógica que, por sua vez, é lida por um conversor analógico digital do microcontrolador. O *set point* de temperatura é definido através da colocação do CJ125 em modo de calibração. Nesse modo de operação, o CI lê o valor de uma resistência externa (com valor igual à resistência da sonda no ponto ótimo de operação) e disponibiliza essa medida em sua saída analógica para armazenamento como *set point*. A documentação disponível não informa a relação entre essa saída analógica do CJ125 e a resistência medida. Para contornar essa questão utilizaram-se quatro valores de resistência de calibração e registrou-se a tensão correspondente na entrada analógica do microcontrolador (conversor A/D). Foi evidenciada uma relação linear entre a resistência e a tensão lida (veja Figura 1).

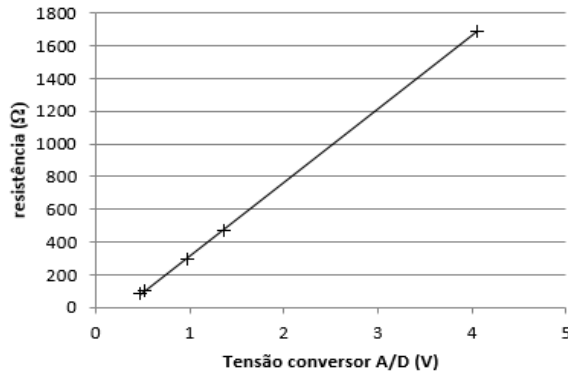


Figura 1. Função resistência x tensão conv. A/D

Utilizando-se o método dos mínimos quadrados obteve-se a função que relaciona o valor da resistência ( $r$ ) com a leitura obtida no conversor A/D de 10 bits de resolução ( $l$ ).

$$r = 2,1996l - 139,3115 \quad (1)$$

A relação entre a temperatura da sonda e a resistência interna da mesma é dada pela figura 2, fornecida pelo fabricante do equipamento (fonte: LSU4.9 TechProductInfo Bosch, 2005):

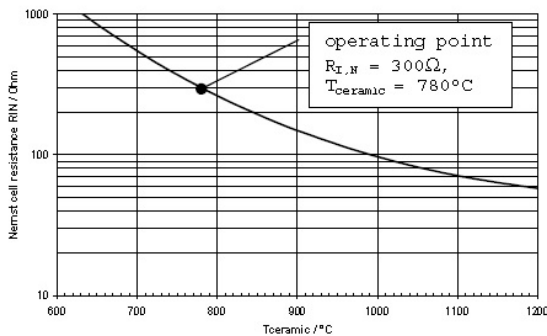


Figura 2. Resistência interna x temperatura

Para permitir o mapeamento da temperatura em função da resistência de maneira contínua foi necessária a interpolação de pontos extraídos da curva acima. Para melhorar a performance dos métodos numéricos de interpolação, a variável do eixo x (resistência interna) foi centralizada e escalada da seguinte maneira:

$$x_c = \frac{x - \text{média}(x)}{\sigma(x)} \quad (2)$$

Em que  $x_c$  = resistência centralizada e escalada,  $\text{média}(x) = 463,3333$  e  $\sigma = 283,2521$

Através do método dos mínimos quadrados obteve-se um polinômio para relacionar a temperatura com a resistência da célula centralizada e escalada ( $x_c$ ).

$$\begin{aligned} \text{temp} = & -12,1976x_c^5 + 29,6409x_c^4 - 7,8138x_c^3 \\ & + 11,7698x_c^2 - 84,5413x_c + 721,8963 \end{aligned} \quad (3)$$

A partir de (1), (2) e (3) pode-se estabelecer uma função analítica que relaciona a temperatura da sonda com a leitura do conversor analógico digital na faixa de temperatura estudada ( $\text{temp} = f(l)$ ). (4)

#### 4 Identificação do sistema.

Foi montada uma plataforma de teste capaz de registrar o valor lido no conversor analógico digital ( $l$ ) em função do tempo ( $t$ ) e também o instante em que é aplicado o degrau à sonda. Como o mapeamento disponível da temperatura é restrito à faixa de  $635^\circ\text{C}$  a  $900^\circ\text{C}$ , a sonda foi estabilizada em cerca de  $650^\circ\text{C}$  com a aplicação de uma tensão constante de  $4,06\text{V}$  e então foi aplicado um degrau de  $2,93\text{V}$  que elevou a temperatura até cerca de  $850^\circ\text{C}$  (veja Figura 3).

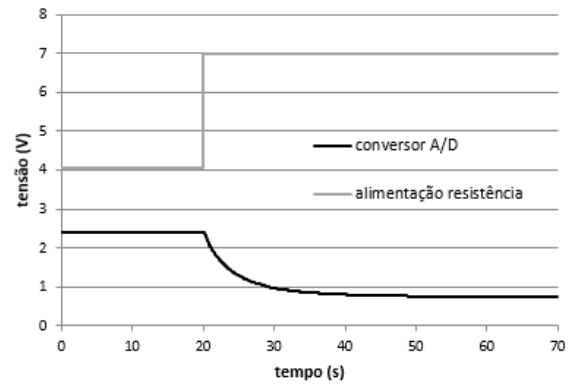


Figura 3. Tensão no conversor A/D x tempo

Aplicando-se a equação (4) obteve-se a curva de temperatura em função do tempo, na qual foi desenhado o degrau de entrada já multiplicado pelo ganho do sistema (veja Figura 4).

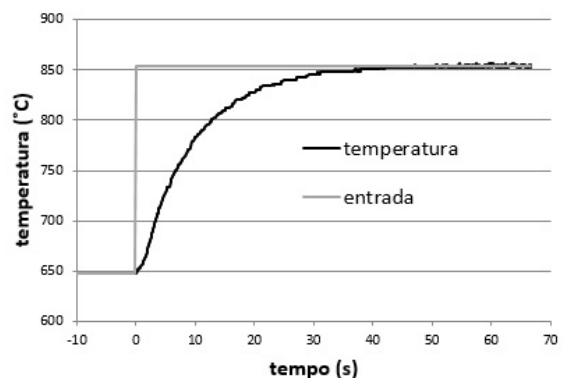


Figura 4. Mapeamento da temperatura x tempo na aplicação de um degrau

A resposta é tipicamente de um sistema de primeira ordem e o atraso de transporte se mostrou desprezível (cerca de  $0,2\text{ s}$ ). A pequena deformação da curva de resposta no início da aplicação do degrau indica uma dinâmica de ordem superior, mas com ganho e constantes de tempo desprezíveis. Dessa forma o sistema foi tratado como de primeira ordem. A função de

transferência de um sistema de primeira ordem é tipicamente:

$$G(s) = \frac{K}{Ts + 1} \quad (5)$$

A resposta  $Y(s)$  ao degrau de amplitude  $K_d$

$$Y(s) = \frac{K_d}{s} G(s) + Y_0 \quad (6)$$

em que  $Y_0$  é a condição inicial

$$Y(s) = \frac{K_d}{s} \cdot \frac{K}{Ts + 1} + Y_0 \quad (7)$$

Decompondo em frações parciais:

$$Y(s) = \frac{K_d K}{s} - \frac{K_d K}{s + 1/T} + Y_0 \quad (8)$$

Fazendo a transformada de Laplace inversa:

$$y(t) = y(0) + K_d K \cdot (1 - e^{-t/T}) \quad (9)$$

A amplitude do degrau foi de 2,93 V. Para se trabalhar com números na mesma ordem de grandeza da temperatura, a tensão foi considerada em centésimos de Volts. Dessa forma  $K_d = 293$ . O ganho do sistema pode ser facilmente identificado em função da variação de amplitude da resposta em tempo infinito ao degrau de amplitude  $K_d$ .

$$\text{amplitude} = K \cdot K_d \quad (10)$$

Como  $\text{amplitude} = 204^\circ \text{C}$ ,  $K = 0,6962$

A constante de tempo ( $T$ ) de um sistema de primeira ordem pode ser obtida verificando-se o instante em que o sistema atinge 63,2% da resposta a um degrau ( $t=T$ ). Observa-se que esse patamar é obtido em 9,4 s e, portanto,

$$y(t) = 650 + 204 \cdot (1 - e^{-t/9,4}) \quad (11)$$

Sobrepondo-se a curva de resposta ao degrau do modelo, respeitando-se as condições iniciais, sobre a curva obtida experimentalmente, pode-se observar a consistência do modelo identificado (veja Figura 5).

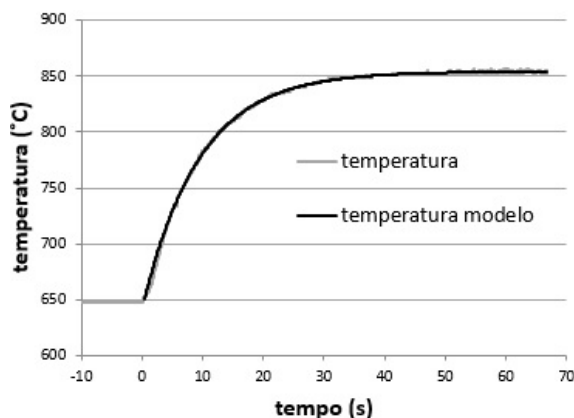


Figura 5. Resposta ao degrau do sistema sobreposta a resposta ao degrau do modelo

Finalmente pode-se escrever a função de transferência  $G(s)$  da sonda para as condições de teste.

$$G(s) = \frac{0,6962}{9,4s + 1} + Y_0 \quad (12)$$

em que  $Y_0$  é a condição inicial

## 5 Projeto do controlador:

As premissas para o projeto do controlador são obter respostas rápidas, com estabilidade e limitação de um eventual sobressinal. O fato de o sistema ser essencialmente de primeira ordem sem atraso de transporte permite que seja utilizado um controlador simples, do tipo proporcional e integral em malha fechada.

Deve-se levar em consideração que o controle será implementado em um microcontrolador com software de baixo nível e, portanto, todas as simplificações matemáticas possíveis deverão ser consideradas. Em função disso será utilizada a leitura do conversor A/D como variável controlada, considerando como *set point* o valor de referência informado pelo CJ 125 em modo de calibração, ou seja, o valor de leitura do conversor A/D que corresponde à temperatura ótima de trabalho da sonda. Com isso evita-se a necessidade de implementação do mapeamento da temperatura real em função da leitura do conversor A/D no firmware do equipamento.

Porém a análise de desempenho do sistema deve ser realizada em termos da temperatura da sonda. Para contornar esse problema, foi criado um modelo da sonda em que a referência é dada em termos da leitura do conversor AD, mas a saída é dada em temperatura da sonda. Esse modelo permite a definição dos ganhos do controlador (que utiliza como entrada a leitura do conversor AD) a partir da análise de resposta de temperatura da sonda, que de fato é a grandeza de interesse.

Para criação desse modelo é necessário a obtenção de uma função  $\text{leitura AD} = f(\text{temp})$ . Isso foi obtido a partir da interpolação dos dados do mapeamento de  $\text{temp} = f(\text{AD})$  (4) na faixa de 650 °C a 850 °C (veja Figura 6).

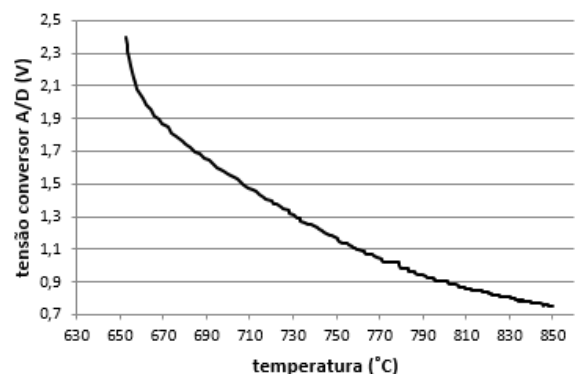


Figura 6. Leitura conversor A/D x temperatura

$$AD = 7,3828t_c^6 - 39,4128x_c^5 + 57,8118t_c^4 + 2,78t_c^3 - 29,8885t_c^2 - 84,1669t_c + 297,0801 \quad (13)$$

$$\text{em que } t_c = \frac{\text{temp} - 709,4558}{56,4079} \quad (14)$$

Para complementação do modelo, foi introduzido um limitador na malha de realimentação para garantir que a temperatura permaneça dentro da faixa mapeada durante a simulação. A tensão máxima de alimentação da resistência de aquecimento é de 12 V e, portanto, foi acrescentado um elemento limitador após o controlador. Para finalizar o modelo, foram introduzidas as condições iniciais para efetuar as simulações na faixa de temperatura mapeada (veja Figura 7).

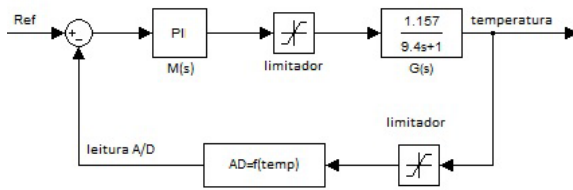


Figura 7. Diagrama de blocos do sistema com controle PI em malha fechada

Primeiramente será definido um ganho proporcional que em malha fechada garanta uma resposta relativamente rápida e posteriormente será introduzido um fator integral para anular o erro em regime permanente inerente a controladores proporcionais.

A saída do controlador proporcional é dada pela equação:

$$m(t) = K_p e(t) \quad (15)$$

em que  $e(t)$  é o erro e  $K_p$  é o ganho proporcional

Quanto maior o ganho proporcional, mais rápida é a resposta do sistema. Porém, ganhos muito elevados podem causar instabilidades decorrentes do atraso de transporte e de componentes de ordem superior que foram desprezados. Como primeiro critério de seleção do ganho  $K$ , foi estabelecido que o novo sistema em malha fechada tenha um erro estacionário para entrada degrau de teste de no máximo 10% da amplitude do degrau e que a constante de tempo seja pelo menos 5 vezes menor que a do sistema em malha aberta. Esse critério garantirá uma resposta sensivelmente mais rápida e com um erro em regime permanente que poderá ser facilmente compensado com a ação integral do controlador. A definição do ganho  $K$  foi realizada empiricamente através de aproximações sucessivas da simulação. O ganho encontrado foi de 16,5, que garantiu um erro estacionário de cerca de 10% da amplitude do degrau e uma constante de tempo menor que 2 s.

A ação de um controlador PI é dada por:

$$m(t) = K_p e(t) + \frac{K_p}{T_i} \int_0^t e(t) dt \quad (16)$$

em que  $m(t)$  é a saída do controlador,  $e(t)$  é o erro da variável controlada,  $K_p$  é o ganho proporcional e  $T_i$  é o tempo integral.

O critério utilizado para definição do tempo integral foi a obtenção de uma resposta subamortecida com um pequeno sobressinal máximo de 10% na resposta ao degrau (veja Figura 8), com valor inicial de 645° C (501 unidades do conversor AD) e valor final de 780 °C (valor ótimo de operação da sonda). O parâmetro obtido para  $T_i$ , utilizando o ganho proporcional definido anteriormente foi 11 segundos.

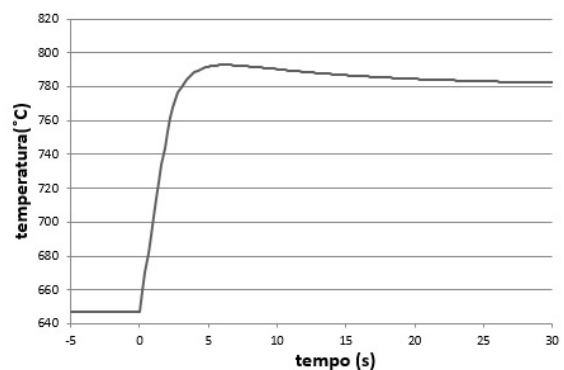


Figura 8. Resposta do modelo com controle proporcional mais integral para entrada degrau

## 6 Implementação do controle:

A seguir foi implementado o controle no microcontrolador do equipamento. Como trata-se de um sistema em tempo discreto, foi necessária a conversão do controlador em tempo contínuo para um controlador em tempo discreto. Para simplificar essa conversão foi selecionado um período de amostragem bastante reduzido (100mS), da ordem de um centésimo da principal constante de tempo do sistema (9,4s). Esse período bastante reduzido permite desprezar o atraso inerente a sistemas discretos (Ogata, 2005) e permite aproximarmos o controlador em tempo contínuo a um controlador em tempo discreto apenas trabalhando os ganhos do mesmo. Para essa implementação foi realizada uma conversão dos ganhos do controlador em tempo contínuo para um controlador em tempo discreto dado por (Medeiros, C. M. S):

$$K_{pd} = K_p - \frac{K_p T}{T_i} \quad (18)$$

$$K_{id} = \frac{KT}{T_i} \quad (19)$$

Em que  $K_{pd}$  é o ganho proporcional e  $K_{id}$  é o ganho integral ( $K_p/T_i$ ) do controlador em tempo discreto.

Na Figura 9, pode-se observar a resposta do sistema real para as mesmas condições utilizadas na simulação do modelo.

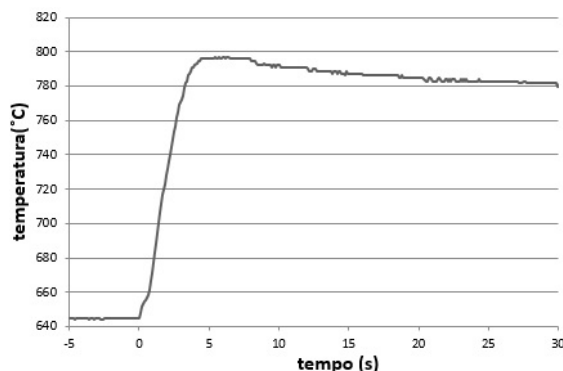


Figura 9. Resposta do sistema com controle proporcional mais integral para entrada degrau

Pode-se observar a efetividade do sistema de controle para as condições de ensaio. A resposta foi muito semelhante à resposta do modelo simulado. A seguir o sistema foi submetido a uma condição de operação real em um queimador alimentado por gás liquefeito de petróleo (GLP). Nessas condições a temperatura ambiente da sonda é bastante superior à temperatura dos ensaios de laboratório e também há um processo de convecção forçada em função da expulsão dos gases de combustão. O sistema foi submetido no instante  $t=0$  ao *set point* de operação ( $780^{\circ}\text{C}$ ) e foram coletados os dados do conversor analógico digital e mapeada a temperatura real. O gráfico apresentado na Figura 10 indica a efetividade do sistema de controle mesmo em condições distintas das de projeto.

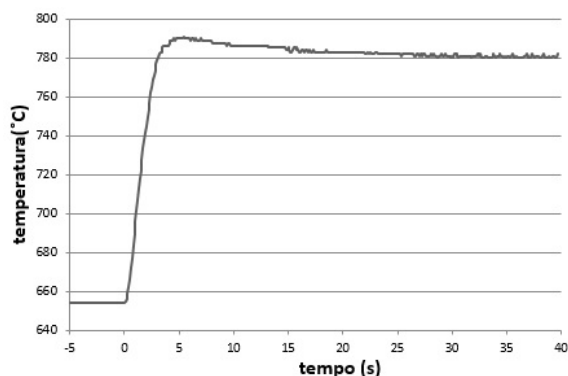


Figura 10: temperatura da sonda em operação em um queimador a gás

## 7 Conclusões

A análise dos resultados obtidos em campo mostrou que os métodos utilizados para identificação do sistema e projeto do controlador foram realmente eficazes, com desempenho totalmente satisfatório. As respostas do sistema real foram muito semelhantes às respostas do modelo, apesar das simplificações utili-

zadas. O sistema de controle projetado e implementado se mostrou robusto o suficiente para garantir um bom desempenho em condições reais de utilização, apesar das limitações das condições de operação da sonda na fase de projeto.

A modelagem do sistema de controle em malha fechada utilizando-se uma grandeza indireta como referência e a grandeza real como variável analisada pode ser replicada para outras situações nas quais o sistema disponibiliza apenas uma grandeza indireta, mas é possível relacioná-la analiticamente com a grandeza real a ser controlada. Nessa situação, é possível realizar todo o projeto de controle através da análise da grandeza real no modelo matemático e posteriormente implementar o controle utilizando apenas a grandeza indireta, o que pode trazer grandes simplificações na elaboração de algoritmos de controle em baixo nível.

O próximo passo é o levantamento da curva de resposta do sensor para diversas situações operacionais, com níveis de oxigênio variando de 0 a 21% (ar) para linearização da saída condicionada do equipamento. Dessa forma, o mesmo poderá operar em qualquer sistema de combustão, garantindo uma aplicação bastante flexível.

## Agradecimentos

Gostaria de agradecer a empresa Infitech Automação, que, através do seu setor de P&D&I está desenvolvendo um sistema de controle de combustão de biomassa com apoio da Funcap (Fundação Cearense de Apoio a Pesquisa). À Unifor, que cedeu seu laboratório de combustão para a realização de ensaios diversos. Agradecimentos também ao pesquisador Manuel Pereira da Costa, que auxiliou na pesquisa das tecnologias existentes para monitoramento e controle de processos de combustão de biomassa.

## Referências Bibliográficas

- Bazzo, Edson(1995). Geração de vapor, Ed. UFSC
- Jakobsson, Thommy(2007). Model Based Evaluation of UEGO Performance and Sensitivity, Tese de mestrado, Linkopings universitet, Suécia.
- J. Collazo, J. Porteiro, 2012. Numerical modeling of the combustion of densified wood under fixed-bed conditions.
- Medeiros, C. M. S(2012). Apostila Controle Digital
- Ogata, Katsuhiko(2002). Modern Control Engineering -4th edition. Prentice Hall
- Ogata, Katsuhiko(2005). Discrete Time Control Systems -2th edition. Prentice Hall
- Bosch (2005). LSU4.9 Planar Wide Band Lambda Sensor Technical Product Info