



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

CONTROLE DE AQUECEDORES DE PASSAGEM A GÁS COM CHAMA MODULANTE

Leonardo Maraschin Gutterres ¹, Eduardo André Perondi ^{*2}

¹ E-mail: leogut@gmail.com

^{*2} Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS)

Rua Sarmento Leite, 425. Porto Alegre/RS - Brasil

E-mail: eduardo.perondi@ufrgs.br

RESUMO

Este trabalho apresenta o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura para aquecedores de passagem de água a gás baseado no conceito de chama modulante, cujo princípio de funcionamento consiste na possibilidade de acendimento individualizado dos bicos queimadores presentes no aquecedor.

No projeto proposto, o sistema de controle, composto por um controlador Proporcional Integral e um preditor de Smith, monitora as temperaturas de entrada e saída da água, acionando sequencialmente as passagens de gás, de forma que o aquecedor opere apenas com o número necessário de queimadores para que a água mantenha-se o mais próxima possível da temperatura desejada. O aquecimento pode, assim, ser obtido com menor consumo e emissões, uma vez que é utilizada apenas a quantidade de gás suficiente para elevar a temperatura da água até o valor desejado, sem a necessidade de se misturar a água quente da saída com água não aquecida.

Outra vantagem deste tipo de atuação consiste em um maior aproveitamento energético nas trocas de calor, pois a diminuição da altura das chamas pode resultar em perdas de eficiência do aquecedor, além do aumento da faixa de operação do aquecedor em comparação com aquecedores tradicionais.

O texto descreve a bancada experimental utilizada e o processo de identificação dos parâmetros do processo. Também são apresentadas as características do sistema de controle e os resultados obtidos por meio de simulações e testes experimentais.

Palavras Chaves: *Aquecedor de passagem; controle de combustão; controle de temperatura; chama modulante.*



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUÇÃO

Aquecedores de passagem a gás são equipamentos geralmente utilizados no aquecimento de água em aplicações domésticas. Seu princípio de funcionamento consiste em, através da queima de gás em um determinado número de bicos queimadores, aquecer a água que circula em um conjunto de aletas e serpentina.

Quando o usuário abre a válvula “quente” de uma torneira ou chuveiro, o aquecedor detecta a circulação de água e libera a saída de gás para a câmara de combustão, onde há um determinado número de bicos queimadores. A ignição do gás pode ser provocada por uma chama piloto ou com o uso de um centelhador eletrônico. O ar aquecido sobe, atravessando um trocador de calor que transfere energia térmica do ar para a água, elevando sua temperatura.

A maneira usual de controlar automaticamente a temperatura de saída em aquecedores de passagem é geralmente feita por meio da variação da vazão de gás inserida na câmara de combustão através da abertura ou fechamento de uma válvula eletromecânica. Quando a vazão necessária para fornecer uma dada quantidade de potência calorífica é tal que a altura geométrica das chamas diminui com relação à sua altura máxima, pode ocorrer uma perda de eficiência no trocador de calor, conforme demonstrado por Perondi [5].

Alguns autores como Nakane [4] e Wang [9] propõem o uso de uma válvula de água que atua em paralelo com a válvula de gás, regulando a vazão de água que circula pelo aquecedor. Já, Yara [10], propõe o uso de um motor elétrico acoplado à válvula de água fria de um misturador, regulando a temperatura na saída através do controle da relação entre as vazões de água quente e fria.

São empregados os mais variados tipos de controladores em aquecedores automáticos, desde os mais simples, com controladores do tipo PID (Proporcional-Integral-Derivativo) [10], até os baseados em lógica difusa e redes neurais [8]. Alguns autores como Zuh [11] fazem uso de múltiplos controladores, aplicando técnicas de *gain-scheduling*, subdividindo o processo em faixas de operação, de modo que os diferentes controladores entrem em ação conforme as condições de operação.

O projeto descrito aqui (em desenvolvimento no Laboratório de Mecatrônica e Controle – LAMECC – da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS), propõe uma forma de atuação e controle que mantém a altura da chama o mais próximo possível de sua altura máxima através do uso de um aquecedor de passagem com capacidade de acionar individualmente os



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

queimadores do aquecedor. Assim, quando há menor demanda por potência calorífica, são acionados menos queimadores, mantendo, porém, as respectivas vazões de gás no valor máximo possível, garantindo a altura da chama mais eficiente para as trocas de calor.

Na Figura 1 (Perondi [5]) podem ser comparadas as curvas de eficiência energética de um aquecedor típico e do mesmo aquecedor após feitas as alterações descritas. A variação de temperatura do aquecedor original foi feita com o ajuste de uma válvula de gás manual tradicional, enquanto que no sistema modificado, o controle de temperatura foi feito com o acionamento dos queimadores individuais.

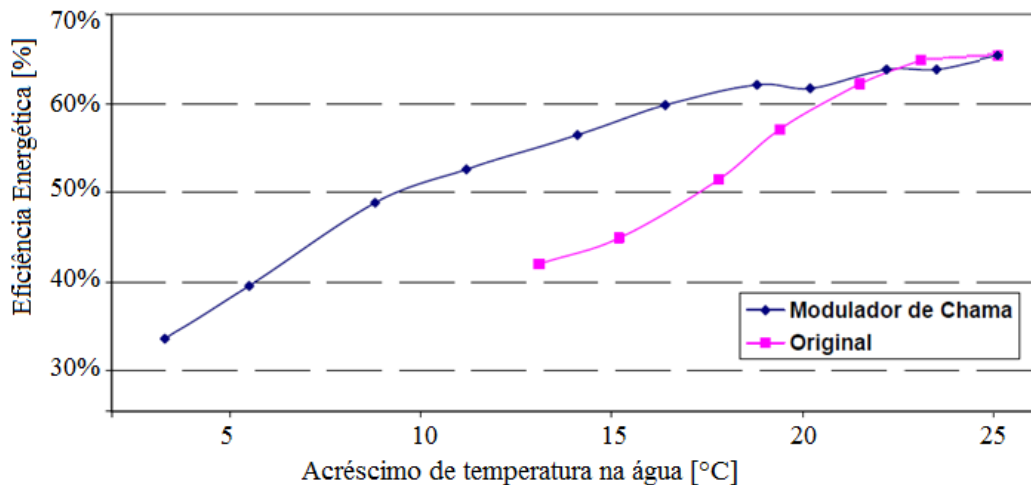


Figura 1 Curvas de eficiência de um aquecedor típico e com modulador de chama [5]

Observa-se, no gráfico do aquecedor original, que a eficiência energética decai com a redução do acréscimo de temperatura, decorrente da diminuição da potência fornecida, ou seja, da diminuição da altura da chama. No gráfico do sistema com modulador de chama, a altura da chama é mantida no nível mais alto possível, verificando-se um melhor aproveitamento energético para menores demandas de potência. Também pode ser observado que o aquecedor equipado com o modulador de chama aumenta a faixa de operação do aquecedor, vantajoso especialmente em dias mais quentes, quando se deseja aquecer a água em poucos graus. Além disso, nesses casos, a mistura de água não aquecida se torna dispensável.

A Figura 2 apresenta um esquema que permite a comparação entre o sistema de controle de temperatura típico (a) com o sistema que utiliza o princípio de chama modulante (b). No sistema tradicional, a partir da medição da temperatura da saída, é realizado o ajuste automático da vazão de gás que alimenta os queimadores. No sistema desenvolvido, o ajuste da vazão de gás é feito



por meio do acionamento de válvulas solenoides instaladas em cada saída de gás, permitindo o acendimento individual de cada queimador.

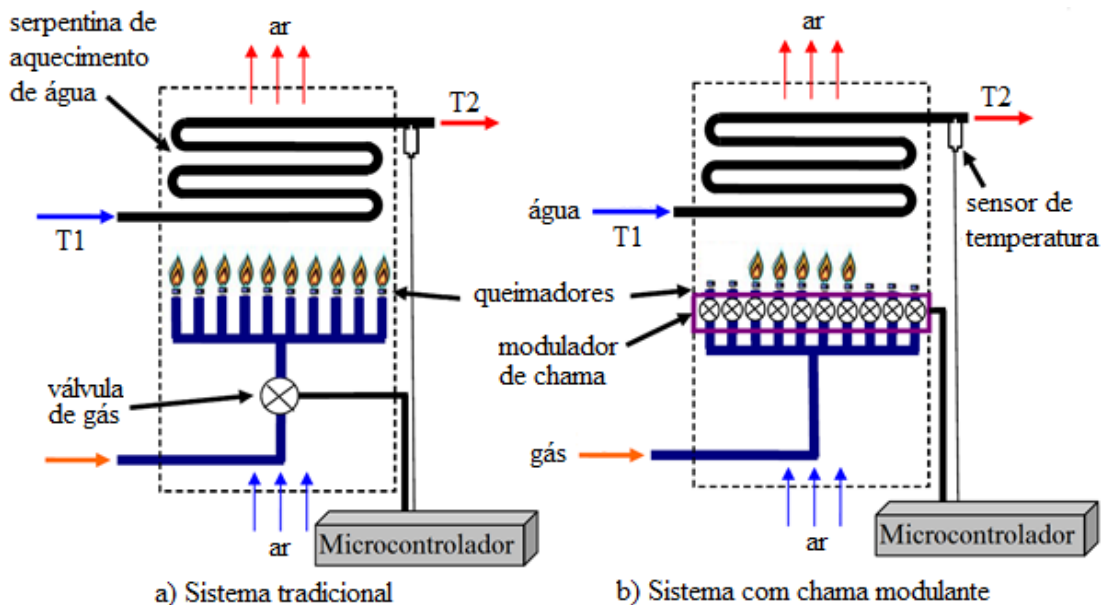


Figura 2 Comparação entre o sistema de controle típico com modulador de chama [4]

O presente trabalho propõe uma alternativa para o controle da queima de gás, utilizando o conceito de chama modulante. Este sistema tem como princípio a seleção pelo usuário da temperatura desejada da água de saída e a regulação automática da quantidade de gás necessária para se atingir esse objetivo por meio do acionamento individual dos queimadores, dispensando a mistura com água não aquecida e mantendo a chama com maior altura possível.

2. O SISTEMA EXPERIMENTAL

Foi estruturada uma bancada de testes composta por um aquecedor e seu respectivo sistema de controle. Esta bancada está instrumentada com sensores de temperatura na entrada e na saída de água e com sensores que detectam a presença de chama e de vazão de água.

O aquecedor possui uma válvula mecânica que obstrui o fluxo de gás enquanto não há circulação de água. Esta válvula também é responsável pelo envio do sinal de existência de vazão de água ao sistema de controle que, a partir desse comando, interpreta que o aquecedor deve começar a operar, enviando o sinal a uma válvula eletromecânica de segurança que também libera o gás e ao sistema automático de ignição para que este execute o centelhamento que viabiliza o início da combustão.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

A ocorrência de chama é monitorada por um sensor eletrônico que se baseia nas propriedades de condutividade elétrica do fogo. Se a corrente elétrica que atravessa a chama é interrompida (ou inexistente), o sistema de controle bloqueia a saída de gás através da válvula de segurança, reduzindo a possibilidade de acidentes.

O controle do sistema é realizado por meio de um sistema eletro-eletrônico composto basicamente por um microprocessador, um circuito de potência para acionamento dos solenóides e condicionadores de sinal para leitura dos sinais dos sensores. O diagrama esquemático do circuito eletrônico está apresentado na Figura 3.

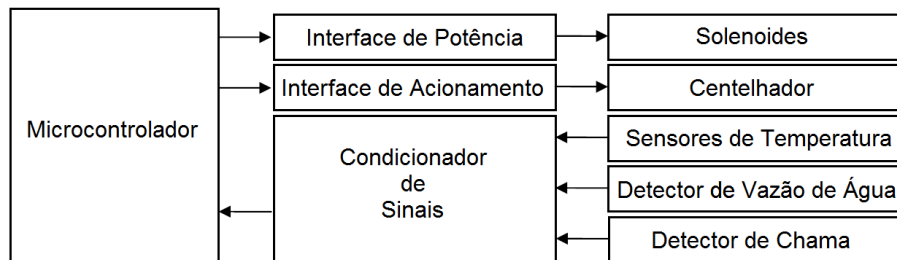


Figura 3 Diagrama esquemático do circuito eletro-eletrônico de controle

Visando ao desenvolvimento do sistema de controle, foi feita a determinação dos valores de potência fornecidos por cada quantidade de queimadores acesos. Para tanto, com a vazão de água fixada em 5,1 l/min, foram acionados os dois queimadores centrais e mediu-se a variação da temperatura da água, registrando-se seu valor máximo. A seguir, acendeu-se um queimador adjacente aos queimadores centrais e, novamente, registrou-se a variação máxima da temperatura da água em regime permanente. Assim, foram sucessivamente ativados os queimadores, alternando, a cada novo queimador aceso, o lado em que ele é aceso em relação ao centro, conforme ilustrado na Figura 4.

Nº queimadores	Posição dos queimadores	Nº queimadores	Posição dos queimadores	Nº queimadores	Posição dos queimadores
Sistema Desligado		3		7	
0		4		8	
1		5		11	
2		6		12	

Figura 4 Relação entre número de queimadores ligados e suas respectivas posições.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

A partir dos resultados dos ensaios, foram calculados os valores de potência correspondentes a cada número de queimadores, aplicando-se os valores máximos de variação da temperatura na Equação 1, que expressa a potência calorífica transmitida para a água em função da variação de temperatura ΔT . Os resultados desses procedimentos estão apresentados na Tabela 1.

$$P = \dot{m} c_p \Delta T, \quad (1)$$

onde, \dot{m} é a vazão mássica de água que passa pelo aquecedor (5,1 [l/min] ou 0,085 [kg/s]) e c_p é o calor específico da água (4181 [J/kg °C]).

Tabela 1 Relação entre número de queimadores, incremento de temperatura e potência.

Nº de queimadores	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ΔT [°C]	8,3	12,0	15,5	19,6	22,8	26,4	29,0	32,1	35,2	37,8	40,8
Potência [W]	2950	4265	5508	6966	8103	9382	10306	11408	12510	13434	14500

3. SISTEMA DE CONTROLE

Sistemas de controle de temperatura como o estudado apresentam atraso de transporte significativo que pode provocar oscilações na saída ou até mesmo levar o sistema à instabilidade. Portanto, neste trabalho foi empregada uma técnica de compensação de atraso, conhecida como Preditor de Smith [7].

O Sistema de controle desenvolvido é composto por um controlador do tipo PI acrescido de um Preditor de Smith. Seu funcionamento está esquematizado na Figura 5 e é baseado em uma estratégia que estabelece que, para uma dada vazão de água suposta constante, o sinal de referência é comparado com o sinal de temperatura medido na saída do aquecedor. O desvio é enviado para o controlador PI, o qual gera um sinal de controle que é enviado para o bloco de acionamento dos solenoides.

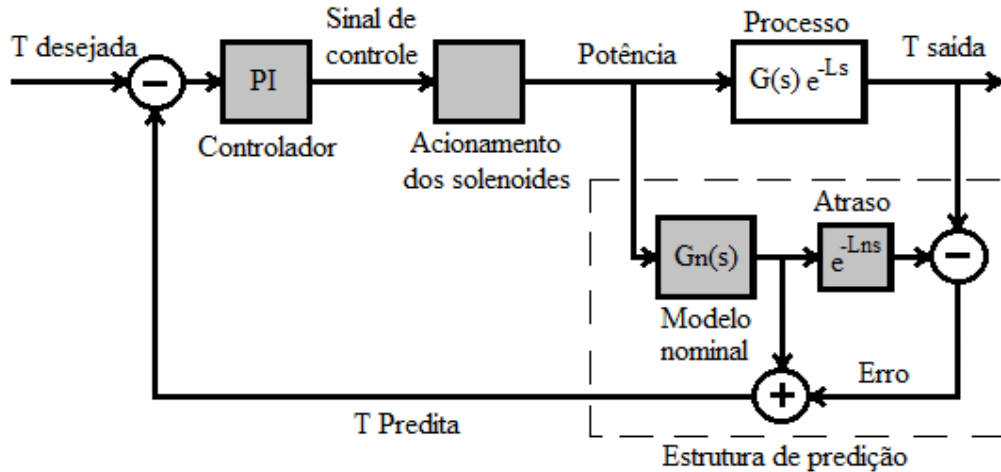


Figura 5 diagrama de blocos do sistema de controle

A partir do sinal de controle, são acionadas as válvulas solenoides que, por sua vez, liberam as saídas de gás para os queimadores. A vazão total de gás varia de acordo com o número solenoides acionados e a eles estão relacionados os níveis de potência apresentados na Tabela 1. Os valores da potência calorífica são enviados para o modelo nominal do processo sem atraso, utilizado na estrutura de predição. O modelo do atraso de transporte serve para compensar erros de modelagem através da comparação da temperatura medida na saída da planta com a calculada pela estrutura de predição. No caso ideal, onde não há erros de modelagem, o sinal que realimenta o sistema é igual ao sinal de saída do modelo da planta sem atraso.

3.1. Função de Transferência da Planta

O modelo da planta foi obtido por meio de um processo de identificação, realizado por meio de análise dos resultados de ensaios experimentais de resposta ao degrau, nos quais as amplitudes dos degraus corresponderam às potências fornecidas por cada conjunto com diferentes números de queimadores acesos, partindo de 2 até 12 queimadores, com incremento unitário. Utilizando este procedimento, a função de transferência encontrada para a planta foi:

$$G(s) = \frac{2,81 \times 10^{-3}}{48,6 s^2 + 15,5 s + 1} e^{-3s}, \quad (2)$$

apresentando um atraso de transporte de três segundos. Essa função de transferência recebe um valor de potência [W], e responde com um valor de incremento de temperatura [°C].



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

3.2. Projeto do Controlador

O controlador pode ser decomposto em duas partes: um controlador com ação Proporcional Integral (PI), que recebe o desvio de temperatura e gera um sinal de controle em termos de temperatura; um bloco com valores pré-estabelecidos que converte o sinal de saída do PI em um valor que corresponde ao número de queimadores acesos.

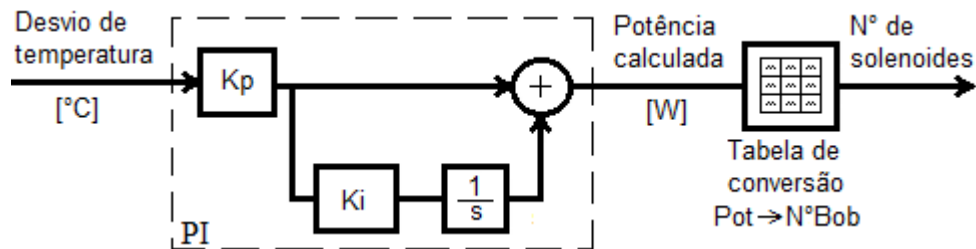


Figura 6 Diagrama do bloco do controlador

3.2.1 Cálculo dos parâmetros do PI

Os parâmetros do controlador PI foram calculados pelo método do lugar geométrico das raízes, com a alocação do zero do controlador ($-K_i$) na posição do polo dominante da função de transferência da planta $G(s)$. O ganho K_p foi calculado com o auxílio da ferramenta *rltool* do programa de processamento e manipulação simbólica MATLAB, para um máximo sobrepasso de 1 °C.

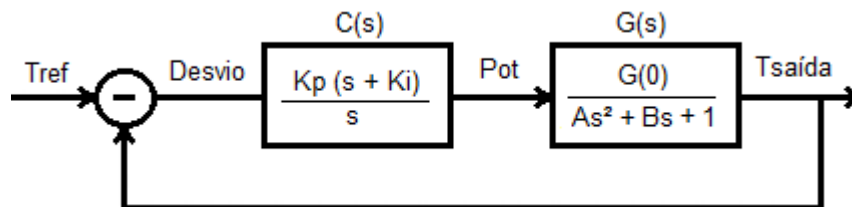


Figura 7 Diagrama utilizado no cálculo dos parâmetros do controlador $C(s)$

3.2.2 Cálculo do número de queimadores

O sinal com o valor correspondente ao número de queimadores que devem ser acionados é gerado com o uso da Tabela 2. Seus valores foram obtidos a partir da média entre cada dois valores adjacentes da Tabela 1. Assim, se, por exemplo, o sinal calculado no bloco do controlador PI tiver o valor 9000 W, são acionados 7 queimadores.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

Tabela 2 Relação entre o acréscimo de temperatura calculado e o número de queimadores a acender.

Potência [W]	3608	4886	6237	7534	8742	9844	10857	11959	12972	13967	
Comparação	≤ >	≤ >	≤ >	≤ >	≤ >	≤ >	≤ >	≤ >	≤ >	≤ >	
Nº queimadores	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12

3.3. Bloco do Acionamento dos Solenoides

Ao receber o valor correspondente ao número de queimadores que devem ser acesos, esse bloco executa duas funções, sendo uma delas a geração dos sinais que acionam cada válvula solenoide. A outra tarefa consiste no envio dos valores de potência da Tabela 1, os quais estão associados ao número dos queimadores acesos, para o modelo da planta sem atraso, na estrutura de predição.

4. RESULTADOS

Na Figura 8 estão apresentadas como exemplo as curvas de resposta do sistema obtidas experimentalmente para uma temperatura desejada de 48 °C.

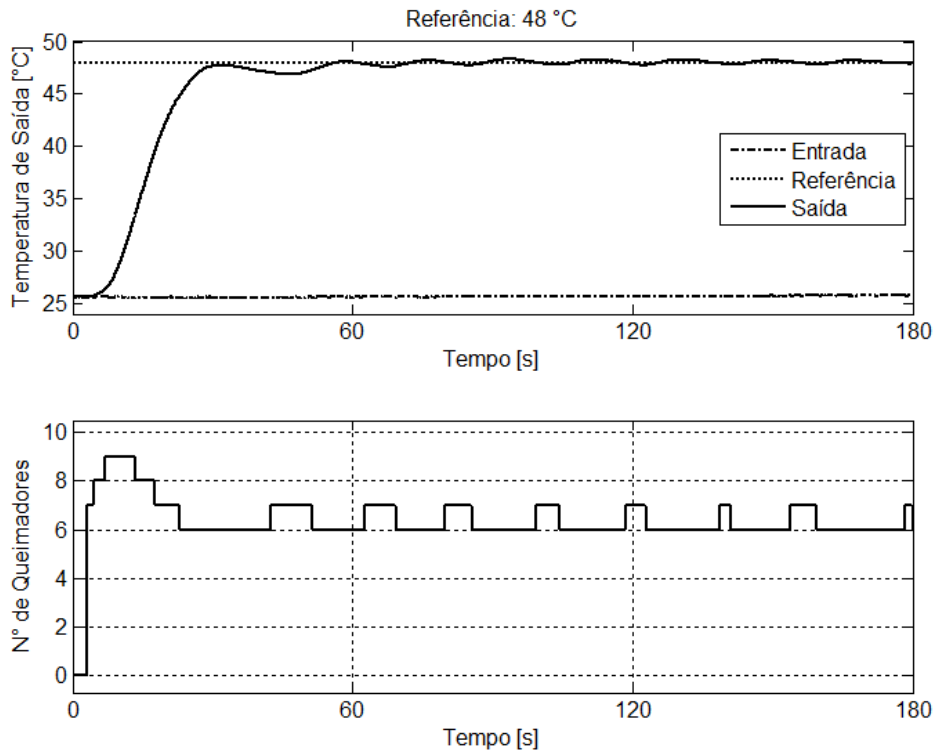


Figura 8 Curvas de resposta do sistema para uma referência de 48 °C



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Estão apresentadas as curvas de temperatura da água ao longo do tempo, tanto na entrada, quanto na saída do aquecedor, além da ação de controle, expressa por meio da quantidade de queimadores acesos ao longo do ensaio. Nesse ensaio, verificou-se uma oscilação em regime permanente de até $\pm 0,2$ °C em torno da temperatura de referência.

5. CONCLUSÕES

O aquecedor equipado com o sistema de atuação proposto foi capaz de elevar a temperatura de saída da água, fazendo-a convergir para a temperatura de referência. A resposta apresenta um comportamento estável em regime permanente, com oscilações de temperatura cujas amplitudes não ultrapassaram 0,5 °C.

A implantação do controlador proposto foi relativamente simples, pois consiste na aplicação de um controlador do tipo PI, uma estratégia amplamente utilizada em sistemas de controle, em conjunto com um Preditor de Smith.

No presente trabalho, não foi abordada a influência da variação da vazão de água, porém, o controlador foi capaz de convergir para a referência, mesmo para vazões diferentes da usada nos cálculos dos parâmetros do controlador. Isso se deve à ação do laço que compara as saídas da planta com as de seu modelo, presentes no Preditor de Smith, realimentando o sistema com esse sinal de erro.

6. REFERÊNCIAS

- [1] Gutterres L. M., Controlador de Aquecedor de Passagem com Chama Discreta, Porto Alegre, 2011.
- [2] Gutterres, L. M., Controle de Aquecedores de Passagem a Gás com Chama Modulante, Porto Alegre, 2014.
- [3] Henz, M. E., Controle de Temperatura com Compensação de Tempo Morto em Aquecedores de Água Baseados em Chama Modulante, Porto Alegre, 2013.
- [4] Nakane, S. et al., Application of Microcomputer-Based Control System to Instantaneous Gas Water Heater. In: IEEE Transactions on Consumer Electronics, [S. l.], p. 310-317, 1983.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

- [5] Perondi, E. A. et al., In: V Congreso Nacional De Engenharia Mecânica, Análise de Desempenho de um Novo Sistema de Controle de Temperatura de Aquecedores de Passagem Baseado em Chama Modulante, Bahia, Salvador, 2008.
- [6] Perondi, E.A. et al., In: V Congreso Nacional De Engenharia Mecânica, Desenvolvimento de um Novo Sistema de Controle de Temperatura de Aquecedores de Passagem Baseado em Chama Modulante, Bahia, Salvador, 2008.
- [7] Smith, O. J. M. Closed Control of Loops with Dead-time. Chemical Engineering Progress, 53. - 217-219, 1957.
- [8] Vieira, J.; Mota, A.; Dias, F., Hybrid Neuro-Fuzzy Network-Priori Knowledge Model in Temperature Control of a Gas Water Heater System. In:Fifth International Conference on Hybrid Intelligent Systems, [S. l.], 2005.
- [9] Wang, L.; Zang, H.; Ning, Y., The Gas Water Heater Control System Design Based on Fuzzy Control. In: International Conference on Electric Information and Control Engineering, Wuhan, p. 840-843, 2011.
- [10] Yara, H. E., Projeto de um Sistema de Controle de Temperatura para Chuveiros Aquecidos por Queima de Gás. Universidade de São Paulo Escola Politécnica, São Paulo, 2010.
- [11] Zhu, R. et al., Application of Fuzzy Logic in Home Appliance Gas Heater Controller Design. In: IEEE International Conference on Intelligent Processing Systems, Pequim, v. 1, p. 373 – 376, 1997.