

MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

CONTROLE DE AQUECEDORES DE PASSAGEM
A GÁS COM CHAMA MODULANTE

por

Leonardo Maraschin Gutterres

Dissertação para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia

Porto Alegre, junho de 2014

CONTROLE DE AQUECEDORES DE PASSAGEM
A GÁS COM CHAMA MODULANTE

por

Leonardo Maraschin Gutterres
Engenheiro Eletricista

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Escola de Engenharia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, como parte dos requisitos necessários para a obtenção do Título de

Mestre em Engenharia

Área de Concentração: Processos de Fabricação

Orientador: Prof. Dr. Eduardo André Perondi

Aprovada por:

Prof. Dr. Paulo Otto Beyer, PROMEC / UFRGS

Prof. Dr. Pedro Rafael Bolognese Fernandes, DEQUI / UFRGS

Prof. Dr. Renato Ventura Bayan Henriques, DELET / UFRGS

Prof. Dr. Rogério José Marczak
Coordenador do PROMEC

Porto Alegre, 5 de junho de 2014

RESUMO

Este trabalho aborda o desenvolvimento de um sistema de controle de temperatura para um aquecedor de passagem de água a gás. O sistema de controle Controlgás é apresentado e comparado ao sistema de controle típico, usado em aquecedores de passagem convencionais. São apresentadas as características e objetivos do projeto Controlgás, o qual serviu de base para o desenvolvimento deste trabalho. É apresentada uma fundamentação teórica sobre técnicas de controle para compensação de variações paramétricas e de atrasos de transporte, bem como uma revisão sobre as principais soluções já desenvolvidas para o controle de temperatura da água em aquecedores de passagem. A bancada experimental, contendo o aquecedor e o sistema de controle, utilizada em trabalhos anteriores, foi reestruturada e instrumentada com sensores de temperatura na entrada e na saída de água e com sensores que detectam a presença de chama e de fluxo de água. Foi desenvolvida uma servo-válvula que permite a regulação automática da vazão de gás. Desenvolveu-se um circuito de potência para o acionamento dos atuadores (solenoides e servo-válvula) da bancada, assim como algoritmos que geram os sinais adequados para seu funcionamento. Foi feita a identificação do processo e o modelo da servo-válvula foi obtido por meio da análise de ensaios experimentais. O modelo do sistema completo foi desenvolvido no programa Simulink, onde foram feitas simulações do comportamento dinâmico do sistema proposto. O sistema foi implantado experimentalmente e foi capaz de convergir para as temperaturas de referência durante os ensaios.

Palavras-chaves: aquecedor de passagem, controle de combustão, controle de temperatura, chama modulante.

ABSTRACT

This work addresses the development of a temperature control system for a gas tankless water heater. The Controlgás control system is presented and compared to typical control systems used in regular tankless water heaters. The characteristics and objectives of Controlgás project, which formed the basis for the development of this work, are presented. A theoretical foundation on control techniques for compensation of parametric variations and transport delays is presented, as well as a review of the main solutions already developed for the control of water temperature on tankless water heaters. The experimental set containing the heater and the control system used in previous work was restructured and instrumented with temperature sensors at the water's input and output and with sensors which detect the presence of flame and the water flow. A servo-valve that allows automatic adjustment of the gas flow was developed. A power circuit was created to drive the actuators (solenoids and servo-valve) of the set, as well as algorithms that generate the appropriate signals for its operation. The process identification and the servo-valve's model were obtained through experimental analysis. The system's complete model was developed in Simulink, where simulations of the dynamic behavior of the proposed system were made. The system was implemented experimentally and was able to converge to the reference temperatures during the tests.

Keywords: tankless water heater, combustion control, temperature control, modulating flame.

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos.....	4
1.1.1	Objetivos Específicos	6
1.2	Descrição do Trabalho	6
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Estado da Arte do controle de temperatura em aquecedores de passagem.....	7
2.1.1	Forma de Atuação	7
2.1.2	Tipo de Controlador.....	7
2.1.3	Compensação de Atraso	8
2.1.4	Resposta a Perturbações	8
2.1.5	Eficiência Energética	9
2.2	Fundamentação Teórica.....	9
2.2.1	<i>Gain Scheduling</i>	9
2.2.2	Compensação de Atraso - Preditor de Smith.....	11
3	MATERIAIS E MÉTODOS	15
3.1	Descrição da Bancada.....	15
3.2	Fonte de Gás Combustível.....	16
3.3	Válvula Mecânica de Gás	16
3.4	Válvulas Solenoides e Queimadores	18
3.4.1	Acionamento dos Solenoides.....	18
3.4.2	Algoritmo de Acionamento dos Solenoides	19
3.5	Servo-válvula.....	20
3.6	Centelhador.....	24
3.7	Sensor de Chama	25
3.8	Sensores de Temperatura	26
3.9	Interface de Controle	27
3.10	Circuito de Potência.....	28
4	IDENTIFICAÇÃO DA PLANTA	29
4.1	Ensaio para a Identificação	29
4.2	Estrutura do Modelo	30
4.3	Método Utilizado	30
4.4	Resultados dos Ensaio.....	33
4.5	Validação	34
4.6	Outros Parâmetros	35
4.7	Modelo do Processo.....	36
5	PROJETO DO CONTROLADOR	38
5.1	Controle da Temperatura em Regime Transiente	40
5.1.1	Projeto do Controlador PI.....	41
5.1.2	Controlador PI com Preditor de Smith	44
5.2	Controlador da Servo-válvula.....	46

5.2.1	Estrutura do Controlador da Servo-válvula	46
5.2.2	Cálculo dos Parâmetros do Controlador da Servo-válvula.....	48
5.3	Sistema de Controle de Temperatura Combinado	50
6	RESULTADOS	52
7	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	62
7.1	Sugestões para Trabalhos Futuros	63
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65
	APÊNDICE A	68
	APÊNDICE B	71
	APÊNDICE C	72

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1: Diagrama esquemático de um aquecedor de passagem a gás (Fonte: Chaguri, J. J., 2001 apud Chaguri, J. J., 2009 apud Yara, H. E., 2010)	1
Figura 1.2: Eficiência de um aquecedor convencional (Adaptado de Perondi et al., 2008a).....	2
Figura 1.3: Curvas de eficiência de um aquecedor típico e do Controlgás (Perondi et al., 2008a)	3
Figura 1.4: Comparação entre o sistema de controle típico e o Controlgás	4
Figura 1.5: Sistema proposto	5
Figura 2.1: Sistema de controle com <i>gain scheduling</i> [Åström, 1995]	10
Figura 2.2: Controlador baseado em transformadas não lineares [Åström, 1995]	11
Figura 2.3: Sistema de controle com previsão em malha aberta	12
Figura 2.4: Sistema de controle com previsão em malha fechada [adaptado de Camacho, 2007]	12
Figura 2.5: Estrutura tradicional do preditor de Smith [adaptado de Camacho, 2007]	13
Figura 3.1: Dispositivos utilizados no acionamento do controlador e sensores de temperatura	16
Figura 3.2: Diagrama da válvula de gás acionada pela passagem de água [Oliveira, 2007]....	17
Figura 3.3: Diagrama construtivo da válvula solenoide [adaptado de Perondi, 2008c]	18
Figura 3.4: Estágios de acionamento das válvulas solenoides	19
Figura 3.5: Operação do algoritmo de acionamento dos solenoides para diferentes entradas .	20
Figura 3.6: Modelo da servo-válvula construída	21
Figura 3.7: Resposta da planta frente ao fechamento da servo-válvula de gás	22
Figura 3.8: Resultados do ensaio da servo-válvula com 10 queimadores acesos.....	23
Figura 3.9: Resultados do ensaio com 5 queimadores acesos	23
Figura 3.10: Curvas de interpolação para a servo-válvula	24
Figura 3.11: Comportamento elétrico do fogo	25
Figura 3.12: Ponteiras do centelhador e sensor de chama	26
Figura 3.13: Interface gráfica ao usuário para operação do sistema de controle.....	27
Figura 3.14: Caixa do circuito de potência e interfaceamento entre a dSPACE e a bancada ..	28
Figura 4.1: Diagrama de blocos do método de Kosaka [Silva, 2008]	31
Figura 4.2: Diagrama de blocos para um sistema com dois polos e nenhum zero	32
Figura 4.3: Validação do sistema identificado	35
Figura 4.4: Modelo do aquecedor em diagrama de blocos.....	37
Figura 4.5: Modelo do aquecedor para vazão constante de 0,085 l/s	37

Figura 5.1: Desempenho esperado para o sistema de controle proposto.....	39
Figura 5.2: Influência do compensador de atraso SP	41
Figura 5.3: Diagrama de blocos do modelo do sistema com controlador PI.....	41
Figura 5.4: Lugar das raízes para o cálculo dos parâmetros do controlador PI.....	42
Figura 5.5: Resposta ao degrau com o controlador PI.....	43
Figura 5.6: Controlador PI do número de bobinas	44
Figura 5.7: Diagrama de blocos do controlador PI com preditor de Smith.....	45
Figura 5.8: Sistema de controle de temperatura da servo-válvula.....	47
Figura 5.9: Estrutura preliminar do controlador PI da servo-válvula.....	48
Figura 5.10: Controlador PI com <i>gain-scheduling</i> da servo-válvula.....	50
Figura 5.11: Sistema de controle combinado	50
Figura 6.1: Ensaio realizado para temperatura desejada de 37,5 °C	52
Figura 6.2: Ensaio realizado para temperatura de referência de 38 °C	53
Figura 6.3: Ensaio com saturação do integrador do controlador da servo-válvula	54
Figura 6.4: Ensaio realizado para referência de 36 °C, sem saturação do integrador	55
Figura 6.5: Ensaio realizado com variação na temperatura de referência.....	56
Figura 6.6: Ensaio realizado para diferentes referências e falta de gás.....	57
Figura 6.7: Ensaio realizado para temperatura de referência de 43 °C	58
Figura 6.8: Ensaio realizado para temperatura de referência de 47 °C	59
Figura 6.9: Ensaio realizado para uma temperatura de referência de 55 °C	60
Figura 6.10: Comparação dos resultados entre o controlador proposto e um PI ($T_{ref} = 48$ °C).....	61
Figura A.1: Vista em corte do conjunto de solenoides instalados no manifold	68
Figura A.2: Protótipo: Manifold e solenoide.....	68
Figura A.3: Fluxograma: algoritmo para acionamento das válvulas solenoides.....	70
Figura C.1: Fotografia do centelhador.....	72
Figura C.2: Circuito elétrico do Centelhador	73
Figura C.3: Diagrama esquemático do circuito do sensor de chama.....	74
Figura C.4: Circuito elétrico do sensor de temperatura.....	75

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1: Posições limites da servo-válvula.....	21
Tabela 4.1: Resultados da Identificação de 2 a 12 queimadores acesos.....	33
Tabela 4.2: Relação entre o número de queimadores e a potência.....	36
Tabela 5.1: Valores do sobrepasso percentual correspondentes a 1 °C	43
Tabela 5.2: Relação entre a potência calculada e o número de queimadores a acender	44
Tabela 5.3: <i>Gain-scheduling</i> do controlador PI da servo-válvula	49

LISTA DE ABREVIATURAS

AD: Analógico-digital

DA: Digital-Analógico

GLP: Gás Liquefeito de Petróleo

LAMECC: Laboratório de Mecatrônica e Controle

PID: Controlador tipo Proporcional-Integral-Derivativo

PWM: Modulação por Largura de Pulso (do inglês: Pulse Width Modulation)

SP: Preditor de Smith (do inglês: Smith Predictor)

UFRGS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul

1 INTRODUÇÃO

O aquecedor de passagem é um equipamento geralmente utilizado no aquecimento de água em aplicações domésticas. A água que por ele circula passa por um trocador de calor submetido a uma fonte de calor, podendo ser de origem elétrica ou combustão de gás.

Uma característica do aquecedor de passagem é a ausência de um reservatório de água. Toda água é aquecida a partir da temperatura ambiente e consumida durante seu funcionamento, ou seja, não é armazenado nenhum volume significativo de água quente após o desligamento do sistema.

A operação de um aquecedor a gás é relativamente simples. 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, a qual contém um determinado número de bicos queimadores. O ar quente sobe, atravessando um trocador de calor, que transfere a energia térmica para a água que circula no aquecedor, elevando sua temperatura. A Figura 1.1 Apresenta um diagrama esquemático de um aquecedor de passagem a gás.

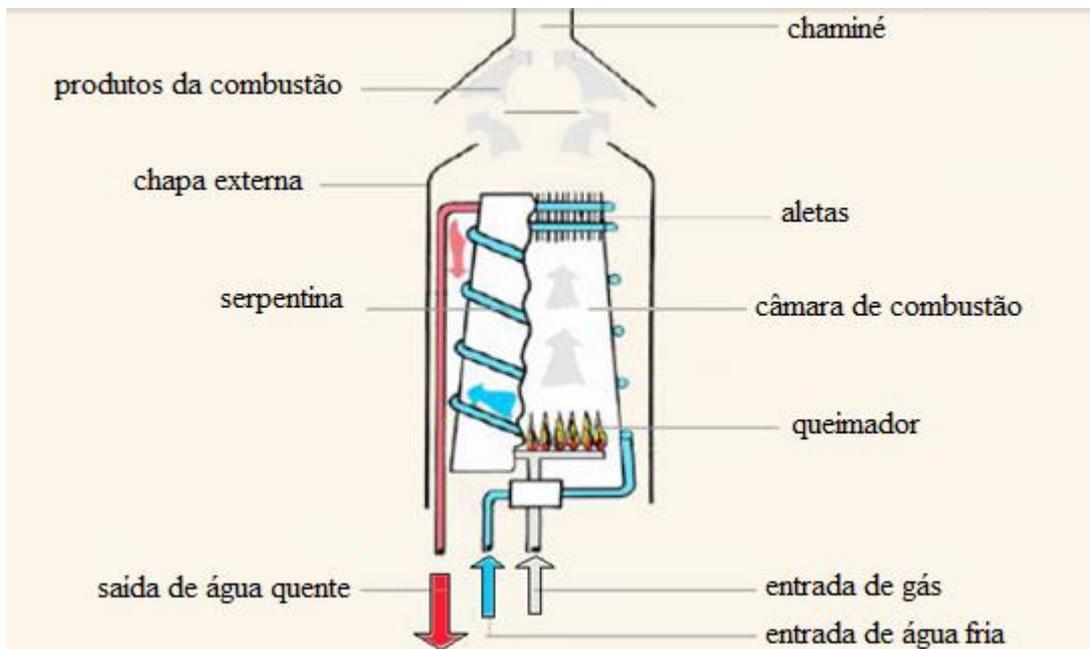


Figura 1.1: Diagrama esquemático de um aquecedor de passagem a gás (Fonte: Chaguri, J. J., 2001 apud Chaguri, J. J., 2009 apud Yara, H. E., 2010)

Alguns aquecedores mantêm acesa uma pequena chama piloto que serve para provocar a ignição da chama principal, responsável pelo funcionamento do aquecedor. Outros modelos fazem uso de um dispositivo eletrônico chamado centelhador ou faiscador, que gera descargas

elétricas capazes de acender a chama principal. A vantagem destes modelos está na eliminação do consumo de gás que mantém a chama piloto. Por outro lado, é necessária uma fonte de energia elétrica para acionar o centelhador.

Aquecedores a gás, tanto de reservatório como de passagem, geralmente aquecem a água a uma temperatura acima da desejada. Essa água segue para um misturador, onde é resfriada através da sua combinação com água na temperatura ambiente. O usuário regula manualmente a temperatura de saída por meio da abertura e fechamento de válvulas das torneiras de água quente e fria.

Aparelhos modernos buscam fazer o ajuste da temperatura automaticamente. A maneira mais usual é por meio do controle da vazão de gás utilizada na combustão. Quando a vazão necessária para fornecer uma dada quantidade de potência calorífica é tal que a altura das chamas diminui com relação à sua altura máxima, pode ocorrer uma perda de eficiência no trocador de calor, conforme demonstrado por Perondi et al., 2008a. A Figura 1.2 apresenta uma curva de eficiência energética em função do acréscimo de temperatura na água de um aquecedor tradicional, obtida experimentalmente em Perondi et al., 2008a. Observa-se, no gráfico, que a eficiência energética decai com a redução do acréscimo de temperatura, decorrente da diminuição da potência calorífica fornecida, ou seja, da diminuição da altura da chama.

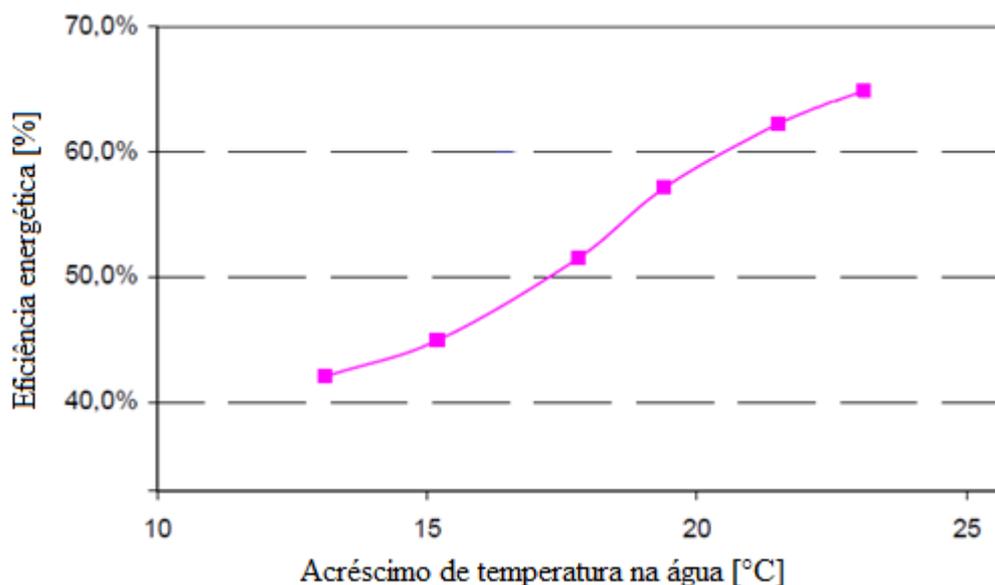


Figura 1.2: Eficiência de um aquecedor convencional (Adaptado de Perondi et al., 2008a)

O projeto Controlgás, em desenvolvimento no Laboratório de Mecatrônica e Controle (LAMECC) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) e financiado pela Finep (convênio 01.04.0844.00 - RBT), propõe uma forma de atuação e controle que mantém a

altura da chama o mais próximo possível de sua altura máxima. O projeto consiste em um aquecedor de passagem com capacidade de acionar individualmente os queimadores. Assim, quando há menor demanda por potência calorífica, são acionados menos queimadores, porém, as respectivas vazões de gás são mantidas no valor máximo possível, garantindo a altura da chama mais eficiente para as trocas de calor. Algumas características e objetivos do projeto Controlgás são:

- a) Controle automático de temperatura;
- b) Utilização somente da quantidade de gás necessária para aquecer e manter a água na temperatura desejada, dispensando mistura com água fria.
- c) Ignição automática;
- d) Maior faixa de operação (temperatura de saída);
- e) Maior eficiência do trocador de calor na faixa de operação abaixo da potência máxima;

Os itens (a) e (b) eliminam a necessidade o usuário buscar manualmente a posição adequada das válvulas de água “fria” e “quente” do misturador, fazendo com que o tempo de assentamento da temperatura se torne mais rápido. O acendimento da chama com centelhador evita consumo de gás pela chama piloto.

O item (d) está relacionado com a quantidade de queimadores acesos. A capacidade de acender menos queimadores permite que o sistema forneça menores níveis de potência calorífica, em comparação com o aquecedores tradicionais. Na Figura 1.3 podem ser comparadas as curvas de eficiência energética de um aquecedor típico e de um aquecedor que utiliza o modulador de chama proposto no projeto Controlgás.

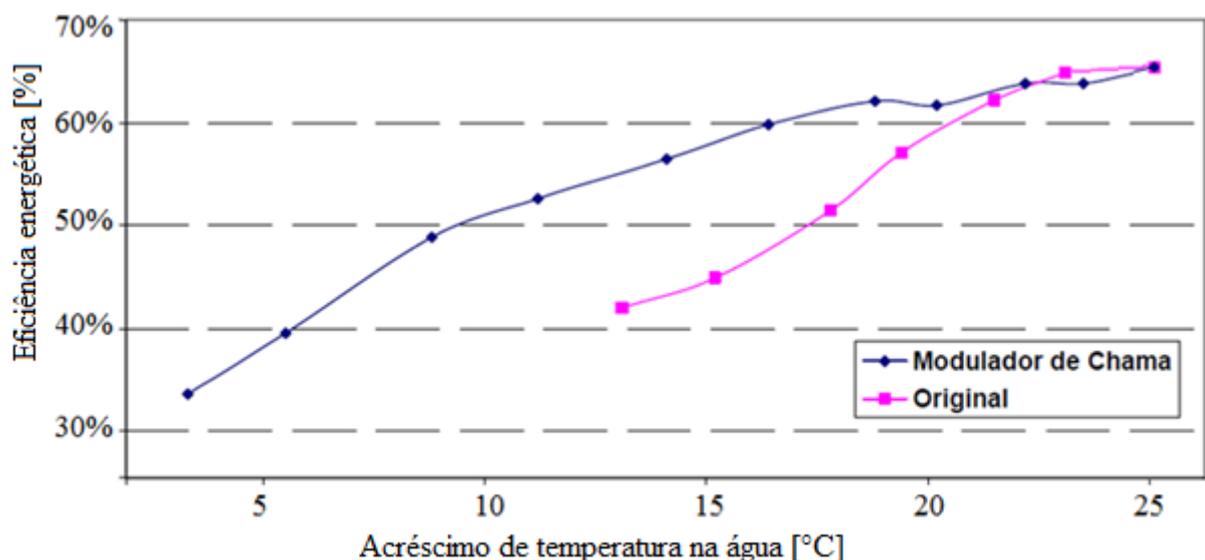


Figura 1.3: Curvas de eficiência de um aquecedor típico e do Controlgás (Perondi et al., 2008a)

A Figura 1.4 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). Na Figura 1.5 é apresentado um sistema automático híbrido, proposto no presente trabalho.

No sistema do tipo tradicional, a partir da medição da temperatura da saída, é realizado o ajuste automático da vazão de gás que alimenta os queimadores. O sistema (b) representa o projeto Controlgás, no qual o controle da vazão de gás é feito por meio do acionamento de válvulas solenoides instaladas em cada saída de gás, permitindo o acionamento individual de cada queimador. O terceiro é um sistema híbrido que apresenta simultaneamente a funcionalidade de ambos os sistemas citados anteriormente. Este tipo de aquecedor é inédito, tendo sido, conforme já comentado, proposto no presente trabalho.

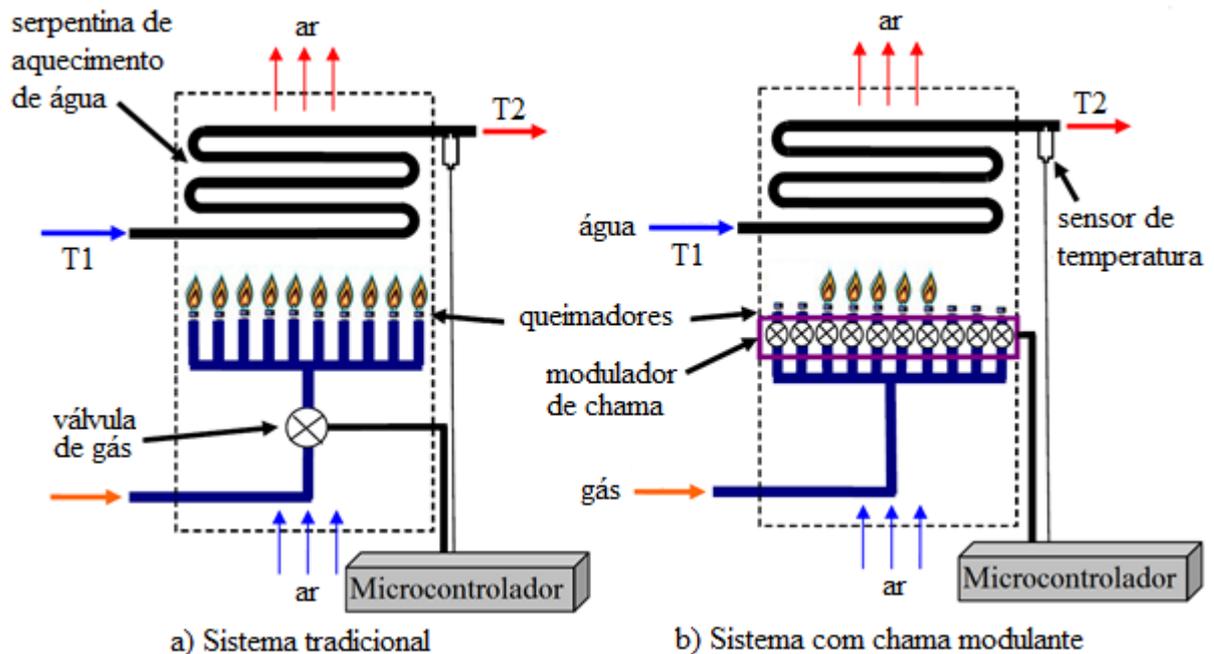


Figura 1.4: Comparação entre o sistema de controle típico e o Controlgás

1.1 Objetivos

Este trabalho procura dar continuidade no desenvolvimento do projeto Controlgás. Nas versões anteriores do sistema [Gutterres, 2011 e Henz, 2013], verificou-se que, para seguir uma dada referência de temperatura, o controlador mantém um comportamento de um sistema de controle liga-desliga (ON-OFF) de, no mínimo, uma válvula solenoide durante a operação. Este chaveamento contínuo é indesejável por alguns fatores como, por exemplo, o

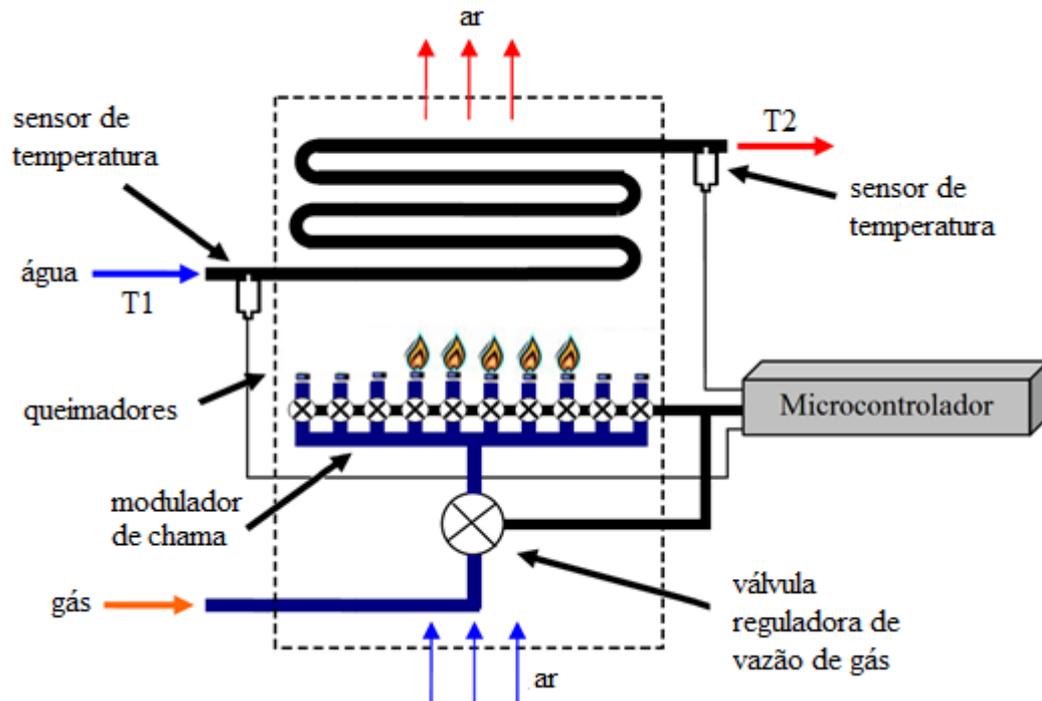


Figura 1.5: Sistema proposto

desgaste mecânico dos componentes que compõem as válvulas e a perda de eficiência energética devido ao desbalanço estequiométrico na queima dos gases, provocado por pequenas explosões, e por flutuações na altura da chama do último solenóide acionado. Assim, para eliminar esse chaveamento, foi proposta a incorporação de uma servo-válvula de gás em série com os conjuntos de queimadores, resultando em um sistema híbrido, composto pelo atuador discreto do projeto Controlgás associado a uma válvula de gás usada em aquecedores tradicionais comandada por um servo-motor. Este sistema foi concebido para permitir o controle com flutuações de temperatura reduzidas, considerando que para o sistema operar com melhor eficiência deve ser ligado o mínimo número de queimadores necessários para obter a temperatura desejada. Desta forma, o sistema proposto opera em duas fases. Na primeira (regime transitório) o sistema de controle discreto faz com que a temperatura, através da abertura do número adequado de válvulas, convirja para uma temperatura ligeiramente superior à desejada. Posteriormente, na segunda fase (regime estacionário), é realizado o fechamento proporcional da servo-válvula, de forma que a redução da vazão induza a convergência da temperatura para o valor desejado. É importante destacar que na fase transiente a servo-válvula de controle se mantém completamente aberta, de forma que a maior vazão de gás esteja disponível.

Assim, o principal objetivo do trabalho é desenvolver um sistema de controle de temperatura que utilize o conceito de chama modulante [Perondi et al., 2008b] e, associado a uma válvula eletromecânica de gás, faça com que o sistema atinja uma temperatura de referência, priorizando uma maior altura da chama durante a operação do aquecedor, sem o chaveamento excessivo dos solenoides em regime.

1.1.1 Objetivos Específicos

Os principais objetivos específicos deste trabalho são:

- Instalar e testar a operação de um *hardware* comercial para desenvolvimento de algoritmos de controle (modelo DS1104 da marca dSPACE) em uma bancada experimental com o aquecedor de passagem;
- Utilizar os *softwares* MATLAB e ControlDesk para aquisição e processamento de dados, bem como a geração dos sinais de controle;
- Desenvolver e testar uma interface de potência entre essa placa de controle e os atuadores;
- Desenvolver, instalar e testar uma servo-válvula de controle e caracterizar o seu comportamento no controle da vazão de gás;
- Propor um modelo matemático e realizar a identificação da planta;
- Desenvolver algoritmos de controle da temperatura de saída do aquecedor;
- Implantar e testar os controladores por meio de simulação e experimentos;
- Analisar os resultados obtidos e avaliar comparativamente as soluções de controle.

1.2 Descrição do Trabalho

No Capítulo 2 são apresentadas algumas soluções propostas em trabalhos realizados na área de controle de temperatura de aquecedores de passagem e a fundamentação teórica sobre esse tema. No Capítulo 3 são descritos os materiais e métodos empregados para a realização dos experimentos. No Capítulo 4 são descritos os procedimentos e resultados do processo de identificação da função de transferência do trocador de calor. O Capítulo 5 refere-se ao projeto do controlador, enquanto que o Capítulo 6 aborda os experimentos e seus resultados. Finalmente, no Capítulo 7 são apresentadas as conclusões e sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Estado da Arte do controle de temperatura em aquecedores de passagem

Nesta seção são apresentadas as principais tecnologias desenvolvidas por pesquisadores na área de controle de temperatura em aquecedores de passagem a gás. O conteúdo foi dividido em tópicos que abordam as principais características de projeto desses controladores.

2.1.1 Forma de Atuação

O controle automático de temperatura em aquecedores de passagem a gás é geralmente feito por meio da variação da vazão de gás inserida na câmara de combustão, através da abertura ou fechamento de uma válvula eletromecânica. Alguns autores como Nakane, 1983, e Wang, 2011, propõem a adição de uma válvula de água que atua em paralelo com a válvula de gás, regulando a vazão de água que circula pelo aquecedor.

Yara, 2010, propõe o uso de apenas um motor acoplado à válvula de “água fria” instalada na entrada de um misturador. Neste caso, as vazões de gás e de água que circulam pelo aquecedor são mantidas constantes e a temperatura na saída do misturador depende da relação entre as vazões de água quente e fria.

2.1.2 Tipo de Controlador

São encontrados os mais variados tipos de controladores na literatura, desde os mais simples, como em Yara, 2010, que utiliza um controlador PID, até controladores mais complexos, como em Vieira e Mota, 2005, que propõem um controlador baseado em lógica difusa e redes neurais.

Zhu, 1997, propõe um controlador híbrido com *gain scheduling*. Ele foi dividido em três controladores: um do tipo P (Proporcional), outro por lógica difusa e um PI (Proporcional-Integral) com parâmetros adaptados por lógica difusa. Esses controladores operam alternadamente e a troca entre eles é feita de acordo com o valor do desvio de temperatura ($T_{\text{erro}} = T_{\text{desejada}} - T_{\text{saída}}$), conforme as seguintes condições:

se $|T_{\text{erro}}| \geq \text{EMAX}$, então ativar controlador P;

se $\text{EMIN} < |T_{\text{erro}}| < \text{EMAX}$, então ativar controlador por lógica difusa;

se $|T_{\text{erro}}| \leq \text{EMIN}$, então ativar controlador PI com parâmetros adaptados por lógica difusa;

onde EMAX e EMIN são valores limiares definidos no projeto do *gain scheduling*.

No caso de possuir mais de um atuador, o sistema de controle pode ser decomposto, de modo que cada subsistema gerado seja responsável pelo controle de cada atuador [Nakane, 1983; Wang, 2011]. Válvulas de gás, de água e também ventiladores são exemplos de atuadores empregados em aquecedores de passagem com controle automático.

2.1.3 Compensação de Atraso

O atraso de transporte pode ser definido como o tempo transcorrido entre a execução de uma ação sobre uma variável controlada e o instante em que esta variável começa a variar seu valor por conta da ação de controle [Torrice, 2007]. Atrasos são causados, principalmente, pelo tempo necessário para realizar o transporte de massa, energia ou informação.

Em sistemas de controle de temperatura, o atraso de transporte pode provocar oscilações na saída ou até mesmo levar o sistema a instabilidade. Em alguns casos, o ajuste adequado do controlador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) já permite a obtenção de uma solução aceitável [Torrice, 2007]. Alguns autores fazem uso de técnicas de compensação de atraso como o preditor de Smith apresentado em Vieira e Mota, 2005, e em Henz, 2013, ou de controladores auto ajustáveis [Zhu, 1997].

2.1.4 Resposta a Perturbações

As principais as perturbações envolvidas na operação de um aquecedor de passagem são: variação da temperatura da água que entra no aquecedor; variação do valor de referência de temperatura; variação na vazão de água, decorrente de alterações na pressão de suprimento que podem ser resultantes da variação da demanda no sistema hidráulico, por exemplo; variação na vazão de gás (ocorre usualmente em virtude da queda de pressão na fonte).

O uso de controladores adaptativos como em Zhu, 1997, e em Vieira e Mota, 2005, é a solução mais empregada para compensar perturbações ou variações paramétricas. Porém, Nakane, 1983, mostra que bons resultados podem ser obtidos com o uso da técnica de *gain scheduling* (agendamento de ganhos), descrita na Seção 2.2.1.

2.1.5 Eficiência Energética

Atualmente, a busca por equipamentos com maior eficiência energética é cada vez maior. Em Perondi et al., 2008a, foi apresentado um estudo que permitiu concluir que a eficiência dos trocadores de calor em aquecedores a gás diminui com a redução da altura da chama. Outra característica importante está associada à forma de exaustão. Equipamentos com sistema de exaustão forçada são capazes de melhorar a eficiência da queima de gás. Nakane, 1983, faz uso de um ventilador, cuja velocidade de rotação está associada ao fluxo de ar que entra na câmara de combustão que, por sua vez, está relacionado com a estequiometria da mistura de gás e ar.

Burch, 2008, faz um estudo sobre as perdas de energia por dissipação para o ambiente durante o tempo em que o aquecedor está desligado. O autor destaca que os testes¹ realizados por fabricantes na medição da eficiência global de aquecedores geralmente desconsideram o uso intermitente do equipamento, desprezando, assim, as perdas devidas ao resfriamento da água parcialmente aquecida, armazenada na tubulação e no volume interno do aquecedor.

2.2 Fundamentação Teórica

2.2.1 Gain Scheduling

Em muitos casos, sabe-se que a dinâmica de um processo varia com as condições de operação. Esta variação pode ser causada por não linearidades conhecidas [Åstrom, 1995]. A técnica de *gain scheduling* (do inglês: agendamento de ganhos) é aplicada para controlar sistemas não lineares através da divisão do processo em um conjunto de faixas de operação, permitindo a utilização de controladores lineares respectivos à cada faixa.

Quando é possível encontrar variáveis auxiliares que correspondem às mudanças da dinâmica do processo, é possível reduzir os efeitos da variação de parâmetros apenas modificando-se características do controlador em função dessas variáveis auxiliares. O desafio está em encontrar tais variáveis. Normalmente, isto é feito com o conhecimento prévio do comportamento físico do sistema. A Figura 2.1 apresenta um diagrama de blocos que representa o conceito do *gain scheduling*.

¹ Aquecimento de aproximadamente quarenta litros, de hora em hora, durante seis horas consecutivas.

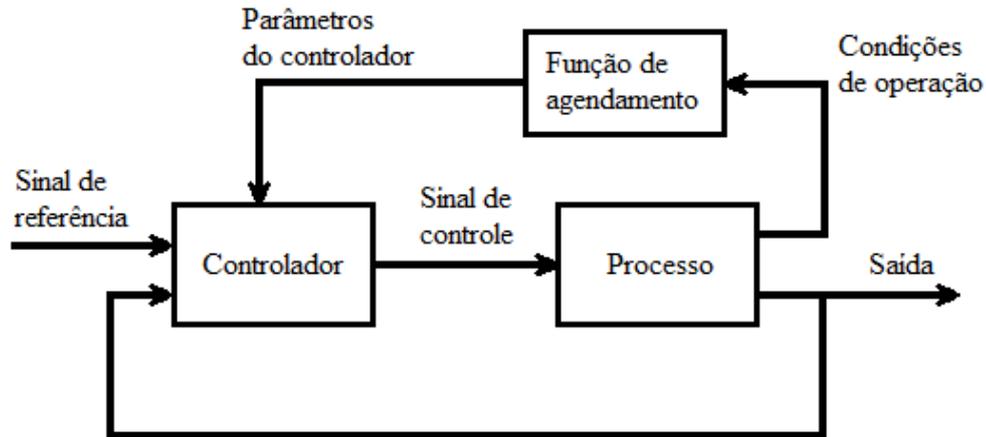


Figura 2.1: Sistema de controle com *gain scheduling* [Åström, 1995]

Após determinadas as variáveis de monitoramento, os parâmetros do controlador devem ser calculados em função delas, segundo um método de projeto adequado [Åström, 1995; Leith, 2000], para um determinado número de condições de operação. O controlador é calibrado para cada faixa de operação e seu desempenho é avaliado em simulações ou em experimentos. Uma desvantagem desta estratégia consiste no fato de o controlador ser uma compensação em malha aberta, ou seja, uma vez definidos os parâmetros agendados, não há verificação por parte do controlador para corrigir agendamentos incorretos. Outra desvantagem é que seu projeto pode ser demorado, uma vez que os parâmetros do controlador devem ser determinados para todas as faixas de operação estabelecidas. Além disso, devem ser geralmente feitas várias análises do desempenho do sistema de controle através de simulações, as quais podem resultar em necessidade de sucessivas recalibrações dos parâmetros do controlador. Uma solução alternativa para evitar parte desse trabalho é a introdução de transformações não lineares de modo que o sistema modificado passe a não depender significativamente das condições de operação. Um exemplo desta abordagem está apresentado da Figura 2.2, onde uma transformação não linear converte os sinais das saídas do controlador e do processo em um sinal de controle transformado, que segue para a planta. A saída da planta é transformada por outra função não linear e realimenta o controlador.

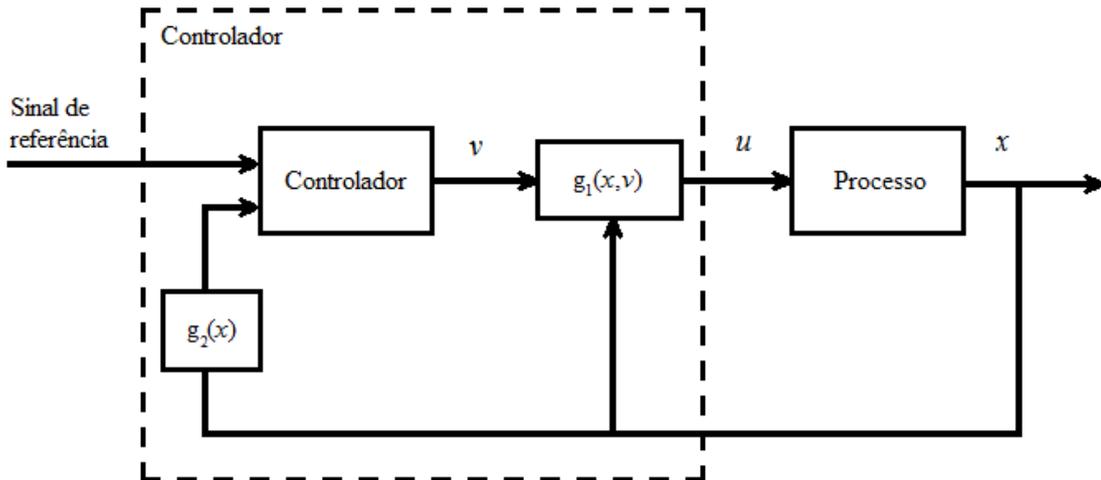


Figura 2.2: Controlador baseado em transformadas não lineares [Åstrom, 1995]

2.2.2 Compensação de Atraso - Preditor de Smith

Atrasos entre as variáveis de entrada e saída de processos são bastante comuns em aplicações industriais. Processos com tempo morto são difíceis de controlar usando esquemas convencionais, tais como PID [Camacho, 2007], pois:

- O efeito das perturbações só se manifesta após um determinado tempo;
- O efeito da ação de controle demora a se manifestar na variável controlada;
- A ação de controle se baseia no erro no instante atual e tenta corrigir uma situação causada por uma ação no passado.

O primeiro compensador de tempo morto que se tem registro na literatura foi proposto por Smith, 1957, e ficou conhecido como preditor de Smith (SP), que consiste de uma das estratégias mais simples e mais aplicadas para compensar atrasos de transporte em processos industriais [Vieira e Mota, 2003; Camacho, 2007].

A estrutura do SP pode ser dividida em duas partes: o controlador primário e a estrutura de predição [Camacho, 2007]. O controlador primário $C(s)$ é tipicamente um PID e a estrutura de predição é composta pelos modelos do processo sem atraso $G_n(s)$ e do atraso, expresso por $e^{-L_n s}$, onde L_n é o valor estimado do atraso. Assim, o modelo completo do processo pode ser expresso por:

$$P_n(s) = G_n(s) e^{-L_n s} \quad (2.1)$$

Nessa estratégia de controle, o sinal de predição $\hat{y}(t + L_n)$ na saída de $G_n(s)$ realimenta o controlador, resultando em um sistema de predição em malha aberta, conforme mostrado no diagrama da Figura 2.3.

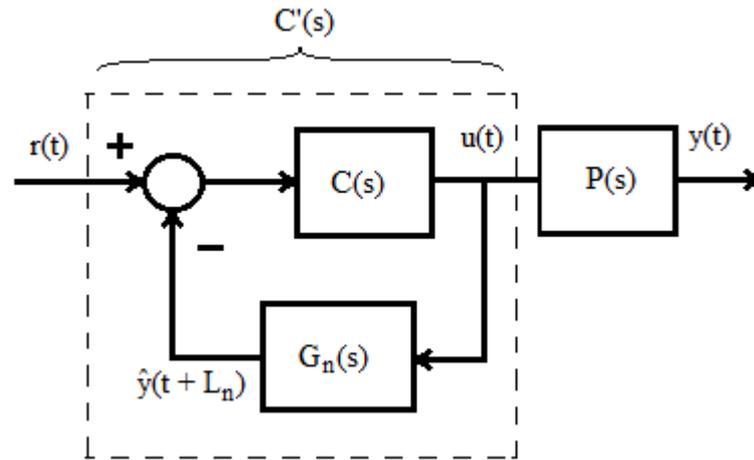


Figura 2.3: Sistema de controle com predição em malha aberta

Para que o sistema possa rejeitar erros de modelagem e efeito de perturbações, realimenta-se a diferença entre a saída $y(t)$ do processo $P(s)$ e a saída $\hat{y}(t)$ do modelo com atraso $P_n(s)$ [Torricono, 2007], conforme mostrado na Figura 2.4:

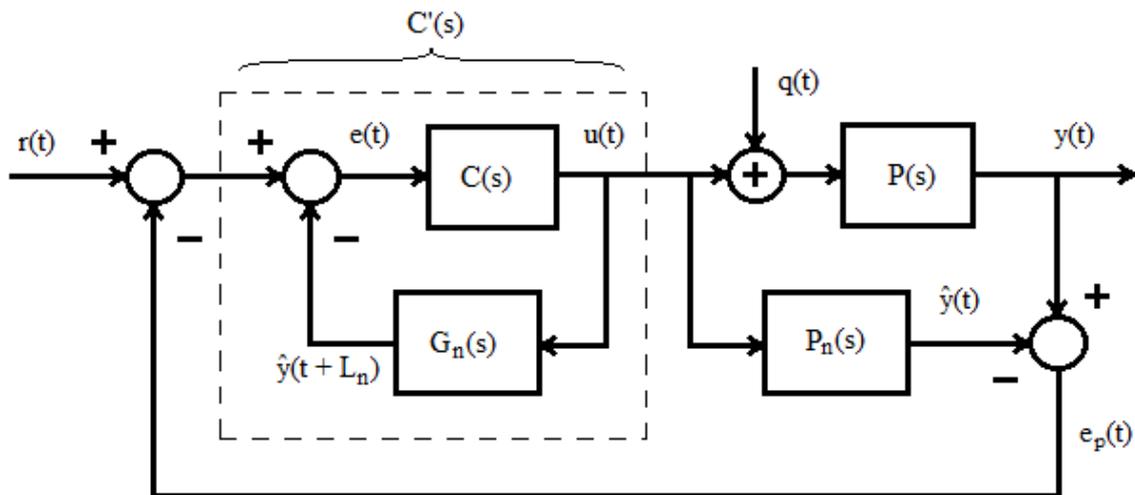


Figura 2.4: Sistema de controle com predição em malha fechada [adaptado de Camacho, 2007]

Esta estrutura pode ser representada por uma forma equivalente, onde o sinal de erro ($e_p(t) = y(t) - \hat{y}(t)$) é somado ao sinal $\hat{y}(t + L_n)$, gerando um sinal de predição $y_p(t)$, conforme mostrado no diagrama da Figura 2.5:

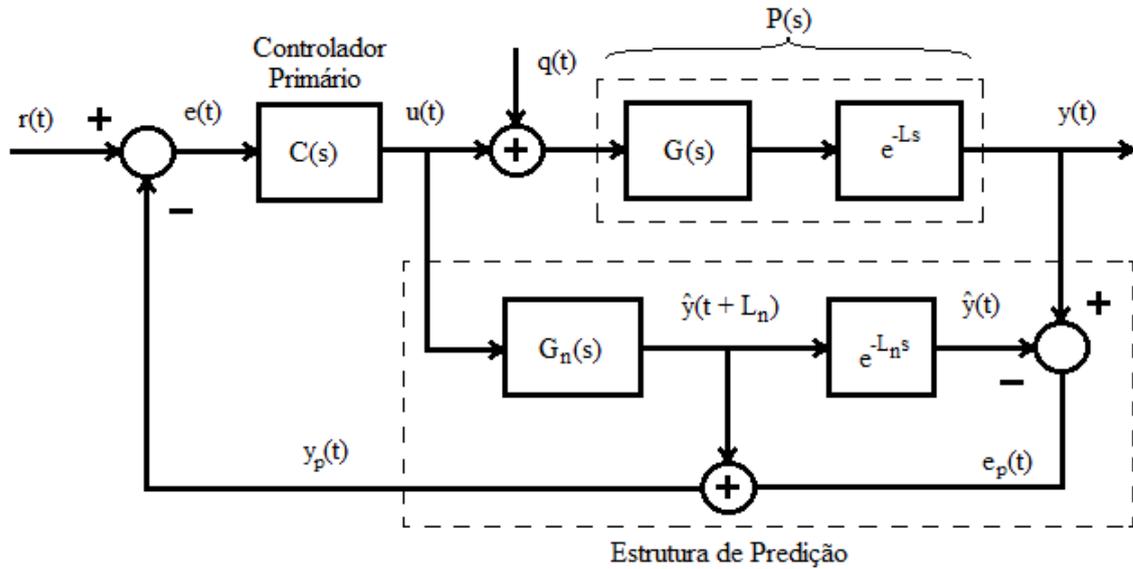


Figura 2.5: Estrutura tradicional do preditor de Smith [adaptado de Camacho, 2007]

A função de transferência em malha fechada do preditor de Smith é dada pela Equação 2.2 [Henz, 2013]. Pode ser observado que, no caso ideal, quando a perturbação $q(t)$ é nula e não há erros de modelagem ($P_n(s) = P(s)$), o erro $e_p(t)$ é igual a zero e o controlador $C(s)$ pode ser ajustado considerando apenas a planta sem o atraso [Torrico, 2007]. As equações 2.3 e 2.4 expressam as funções de transferência do preditor para o caso ideal, em relação à referência e às perturbações, respectivamente.

$$H_r(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s) P(s)}{1 + C(s) G_n(s) + C(s) P(s) - C(s) G_n(s) e^{-L_n s}} \quad (2.2)$$

$$H_r(s) = \frac{Y(s)}{R(s)} = \frac{C(s) P_n(s)}{1 + C(s) G_n(s)} \quad (2.3)$$

$$H_q(s) = \frac{Y(s)}{Q(s)} = P_n \left[1 - \frac{C(s) P_n(s)}{1 + C(s) G_n(s)} \right] = P_n (1 - H_r(s)) \quad (2.4)$$

A estrutura do preditor de Smith possui três propriedades fundamentais para o caso nominal (sem erros de modelagem) [Camacho, 2007], sendo elas:

- Compensação de atraso: o atraso é eliminado da equação característica do sistema em malha fechada ($1 + C(s)G_n(s)e^{-L_n s}$).
- Predição: o sinal de realimentação $y_p(t)$ produzido pela estrutura de predição antecipa a reação do sistema na ocorrência de variações do sinal de referência. O mesmo não acontece no caso das perturbações. Se $q(t)$ variar rapidamente, seus efeitos não poderão ser eliminados do sinal de realimentação.

- Compensação dinâmica ideal: O atraso impõe um limite no desempenho do sistema. Mesmo para um controlador primário ideal (com ganho infinito), a resposta a perturbações sempre apresentará um atraso igual a $2L$, uma vez que o controlador irá demorar um tempo igual a L para detectar a perturbação e a ação de controle levará um tempo L para fazer efeito na saída.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo será descrito o funcionamento da bancada e serão apresentados os dispositivos que a compõem.

3.1 Descrição da Bancada

O sistema possui uma válvula mecânica que libera o fluxo de gás apenas quando há circulação de água. Esta válvula mecânica está acoplada a uma chave elétrica, que se abre a partir de uma vazão mínima, ajustada manualmente pelo usuário. Essa chave contatora é usada como sensor, detectando a passagem de água e servindo de gatilho para o acionamento do sistema de controle.

Uma válvula solenoide, denominada como ‘Geral’, está conectada em série com a válvula mecânica e quando desligada também bloqueia o fluxo de gás. Ainda em série, está instalada uma servo-válvula que permite variar a vazão do gás que segue para os queimadores. A Figura 3.1 mostra a disposição desses componentes e dos sensores de temperatura na bancada.

Quando essas três válvulas de gás estão abertas, o gás é levado à câmara de combustão através dos dois queimadores centrais do aquecedor. Paralelamente, por decorrência da detecção da passagem de água, o sistema de controle ativa o centelhador até que a chama seja estabelecida ou até que se passe determinado tempo¹. Caso, após esse tempo, o sensor de chama não detecte a presença da chama, o sistema interpreta que há falta de gás e desliga a válvula Geral; caso contrário, o controlador inicia o processamento do algoritmo de controle e libera a passagem de gás para os demais queimadores, de acordo com os cálculos realizados para regular a temperatura de saída, a partir da referência definida pelo usuário.

¹ O tempo de espera pela ignição do fogo está regulado como 3 s.

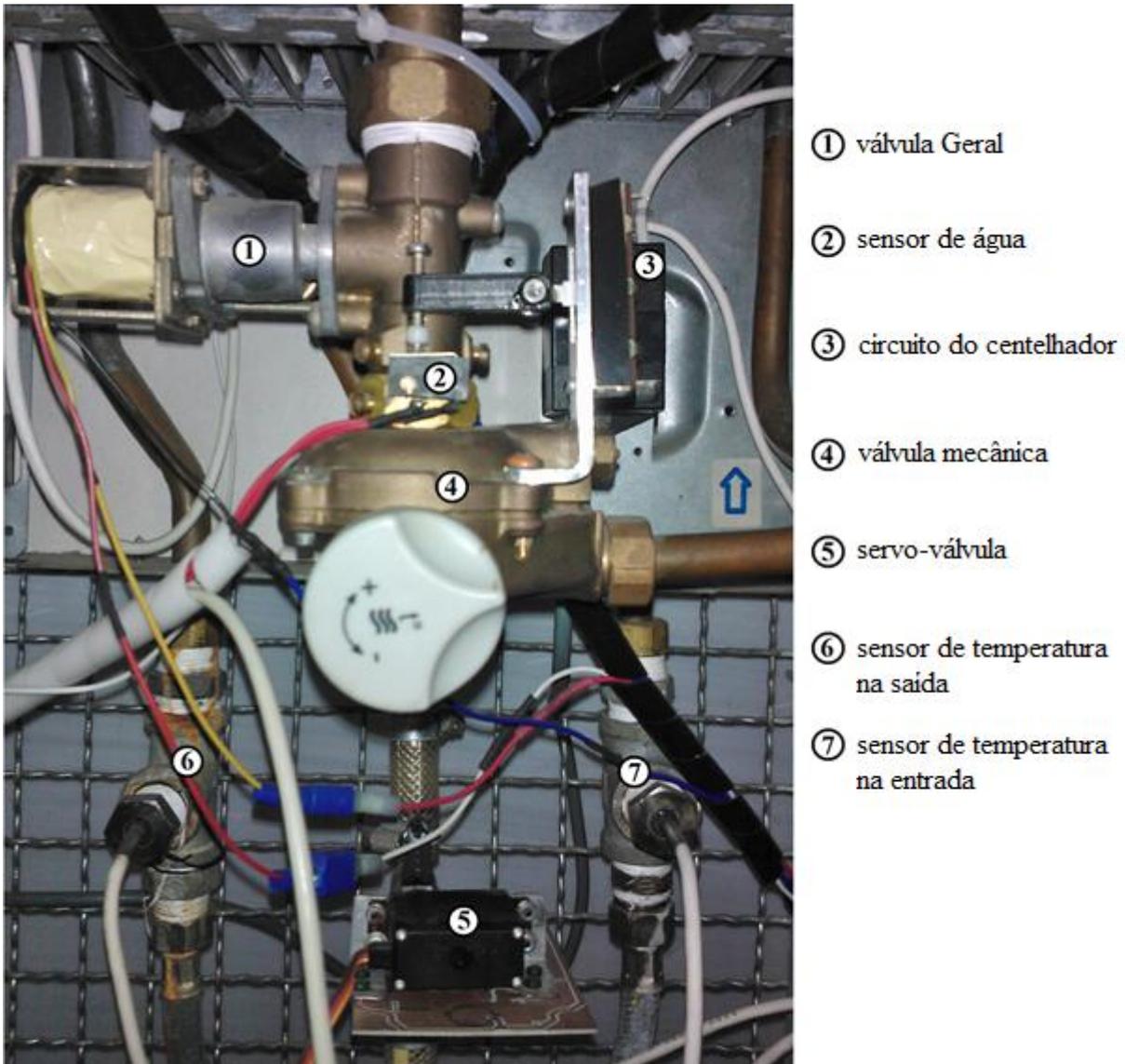


Figura 3.1: Dispositivos utilizados no acionamento do controlador e sensores de temperatura

3.2 Fonte de Gás Combustível

A fonte de gás utilizada consiste de um botijão de gás liquefeito de petróleo (GLP) de 13 kg, de uso doméstico. Na saída do botijão há um regulador que reduz a pressão de saída de 70 kPa para 2,8 kPa (pressões manométricas), valor padrão usado em instalações residenciais de baixa pressão (NBR 8473).

3.3 Válvula Mecânica de Gás

O diagrama apresentado na Figura 3.2 representa esquematicamente a válvula mecânica de gás. Esta válvula permite a regulação para maior ou menor aquecimento da água

através da pré-tensão aplicada à mola da regulação da vazão de água. Em Oliveira, 2007, está apresentado um modelo matemático para esta válvula, sendo seu funcionamento descrito a seguir.

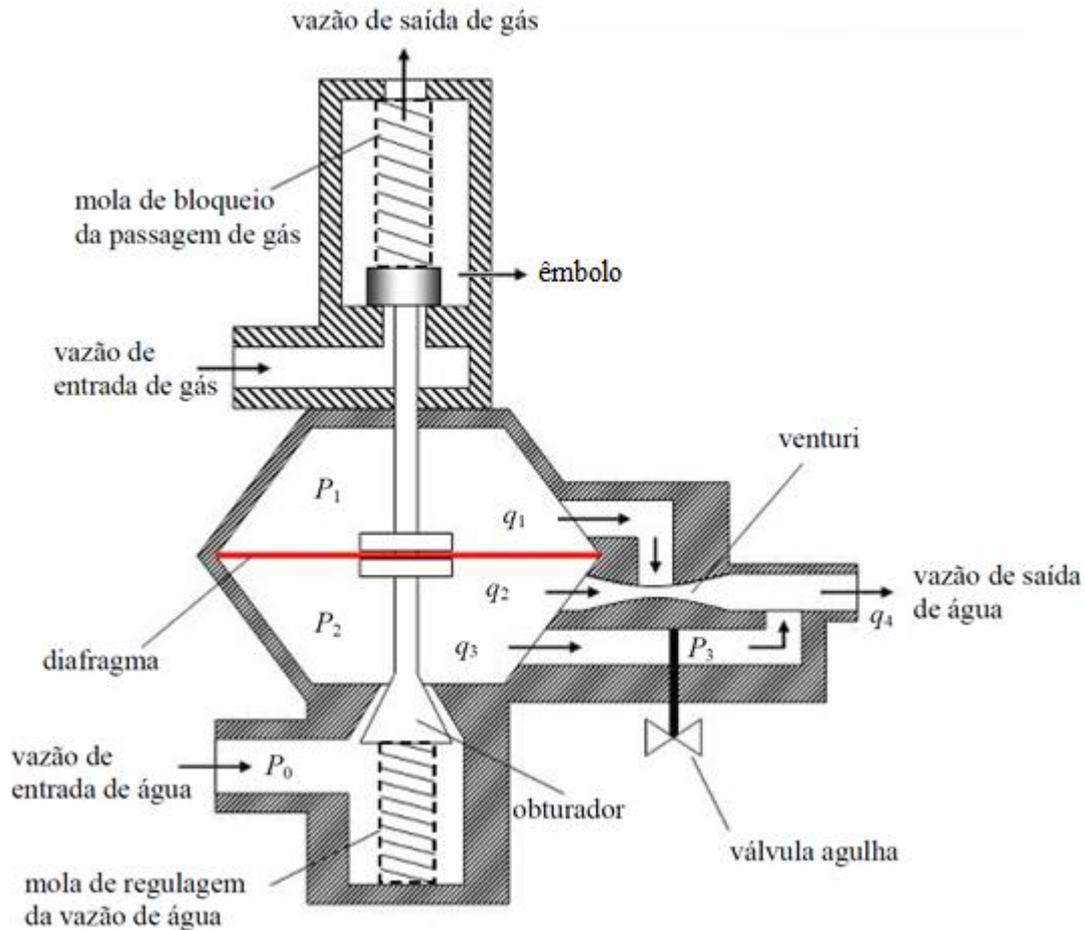


Figura 3.2: Diagrama da válvula de gás acionada pela passagem de água [Oliveira, 2007]

A parte inferior da válvula é conectada à rede de água. No momento em que há demanda por água quente, a vazão representada por q_2 faz com que a pressão no tubo Venturi fique menor que P_1 , ocasionando a vazão q_1 , que provoca a diminuição da pressão P_1 . A diferença entre as pressões P_1 e P_2 é responsável pela deformação do diafragma. Quanto maior a vazão q_2 , maior a deformação do diafragma, e, conseqüentemente, o deslocamento do êmbolo.

Esse êmbolo, além de acionar o sensor de água, opera como válvula de regulação de gás. Assim, quando atinge certo deslocamento, ocorre a liberação de gás para os queimadores. Desta forma, a válvula opera também como dispositivo de proteção, pois a vazão de gás é cortada caso haja falta de água no sistema, evitando, assim, a ocorrência de um possível superaquecimento do aquecedor.

A válvula agulha mostrada no esquema permite regular a vazão q_3 . Quanto mais aberta estiver essa válvula, maior será a vazão q_3 e menor será q_2 , logo, menor o deslocamento do êmbolo. Esse ajuste permite definir um limite mínimo da vazão de água que seja suficiente para causar o acionamento do sensor de água e a liberação do gás para as válvulas solenoides.

3.4 Válvulas Solenoides e Queimadores

O aquecedor possui doze queimadores, sendo que os dois centrais operam como chama piloto e não têm controle individual, sendo alimentados diretamente pela válvula ‘Geral’. Os outros dez apresentam controle individual por válvulas solenoide instaladas no manifold que distribui gás a todos os queimadores. A válvula ‘Geral’ está instalada entre a válvula mecânica (Seção 3.3) e o manifold. Dessa forma, toda a vazão de gás usada pelo aquecedor passa pela válvula geral.

A Figura 3.3 mostra um diagrama construtivo das válvulas solenoides. Cada válvula é composta por um enrolamento de fio de cobre sobre um carretel, uma haste móvel (ferromagnética) com uma borracha de vedação na ponta, uma haste fixa e uma mola que mantém a haste móvel afastada do carretel, fechando o orifício de saída de gás na falta de energia elétrica.

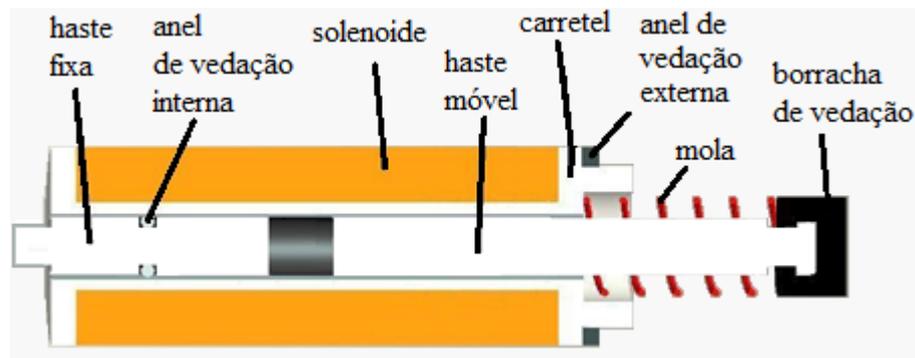


Figura 3.3: Diagrama construtivo da válvula solenoide [adaptado de Perondi, 2008c]

3.4.1 Acionamento dos Solenoides

O acionamento de cada solenoide é feito em dois estágios, denominados ‘pulso’ e ‘regime’. O primeiro deles ocorre com a aplicação de um pulso de corrente elétrica maior² nos

² Pulso de 490 mA com duração de 50 ms.

terminais de sua bobina. A força magnética produzida é suficiente para superar a força da mola e deslocar o pistão que obstrui o orifício de saída de gás.

O segundo estágio é responsável por manter o pistão deslocado. Para isto, uma menor³ corrente elétrica é aplicada durante o tempo em que a válvula é mantida aberta. Este acionamento em estágios visa a reduzir do consumo de energia elétrica durante o funcionamento do equipamento. A Figura 3.4 ilustra os estágios de acionamento dos solenoides.

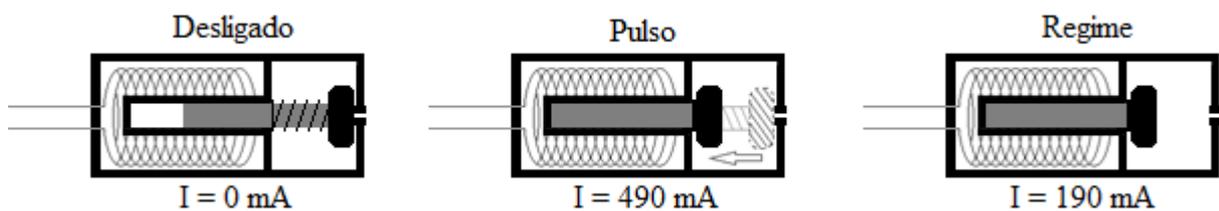


Figura 3.4: Estágios de acionamento das válvulas solenoides

A ignição da chama ocorre nos dois queimadores centrais e é propagada para os extremos do aquecedor, alternando-se, a cada novo queimador aceso, o lado em relação ao centro. Esta sequência foi definida com a intenção de ativar queimadores imediatamente próximos a outros já acesos, evitando que seja aberta uma válvula de gás sem que o respectivo queimador esteja adjacente a outro aceso, evitando vazamento de gás para a atmosfera.

Os queimadores centrais receberam o nome de ‘Piloto’ e os demais queimadores foram denominados ‘Bobina #’, onde # é um número de um a dez, que representa sua posição relativa no aquecedor. O Apêndice A contém uma tabela que ilustra a ordem de acionamento dos queimadores e suas respectivas posições no aquecedor.

3.4.2 Algoritmo de Acionamento dos Solenoides

Limitações de operação do circuito de acionamento (Seção 3.10) impedem que o sinal ‘pulso’ seja aplicado simultaneamente em mais de uma bobina. Assim, foi criada uma sub-rotina (Apêndice A) que recebe um valor para o ‘número de bobinas’ a serem ativadas e as liga em sequência, partindo do valor anterior até o desejado. Caso o novo valor seja inferior ao anterior, o *hardware* apenas desliga as bobinas excedentes.

A Figura 3.5 ilustra o funcionamento desse algoritmo. No gráfico, a curva tracejada representa o número desejado de solenóides ligados, o qual varia a cada segundo.

³ Corrente de 190 mA.

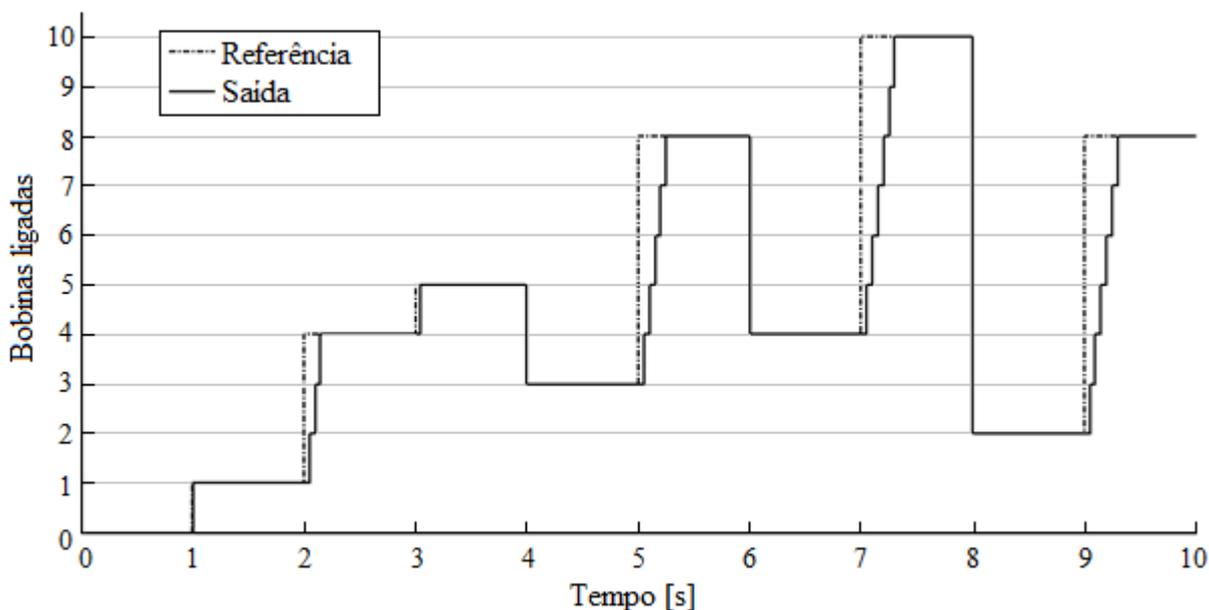


Figura 3.5: Operação do algoritmo de acionamento dos solenoides para diferentes entradas

É possível visualizar nessa figura degraus de curta duração (50 ms) que representam os estágios transientes de acionamento de cada solenoide (duração do sinal ‘pulso’). Por exemplo, no instante $t = 5$ s, a referência passa de 3 para 8 solenoides. Visualiza-se, portanto, no intervalo entre 5 e 6 segundos a existência de 5 degraus, cada um associado a um novo solenoide acionado.

3.5 Servo-válvula

A servo-válvula permite variar continuamente a vazão total de gás que abastece o aquecedor. Ela é composta por um servo-motor acoplado a uma válvula extraída de um regulador de pressão de botijão de gás residencial. O motor e a válvula estão fixas sobre uma placa, conforme apresentado no modelo da Figura 3.6. O projeto, construção e instalação desse sistema constituem uma contribuição original realizada no âmbito do presente trabalho.

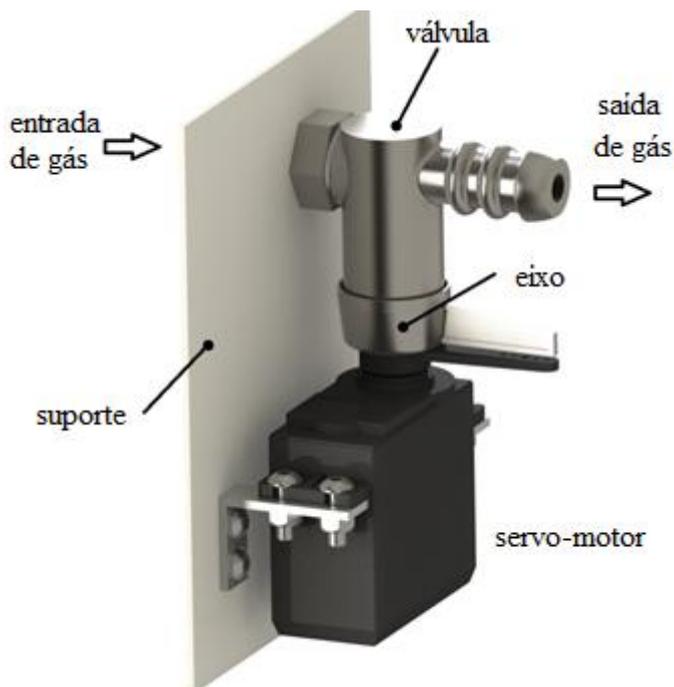


Figura 3.6: Modelo da servo-válvula construída

O acionamento da servo-válvula é feito por um sinal PWM, gerado por uma função específica do *Simulink* (Bloco: DS1104SL_DSP_PWM, para interface dSPACE1104), cuja referência é a variável “*duty-cycle*”. O *duty-cycle* representa a relação entre o tempo em que o sinal permanece em nível alto (ON) e o período da onda. O valor do *duty-cycle* foi adotado como medida de posição do servo-motor. O servo-motor utiliza uma onda com período de 20 ms. A Tabela 3.1 relaciona as posições do motor e da válvula de gás com o sinal de referência. A posição “Fechada” corresponde ao valor de *duty-cycle* igual a 0,097, mas as chamadas apagam em torno de 0,088.

Tabela 3.1: Posições limites da servo-válvula

Abertura da válvula	Aberta	Fechada
Posição do eixo do motor	90°	0°
Largura do pulso (PWM)	1,04 ms	1,94 ms
Duty cycle	0,052	0,097

O modelo de operação estática da válvula foi obtido por meio de experimentos. Para cada número determinado de queimadores ligados foi medida a diferença de temperatura entre a entrada e a saída da planta, variando a abertura da válvula. A Figura 3.7 ilustra a resposta do sistema para diferentes quantidades de queimadores.

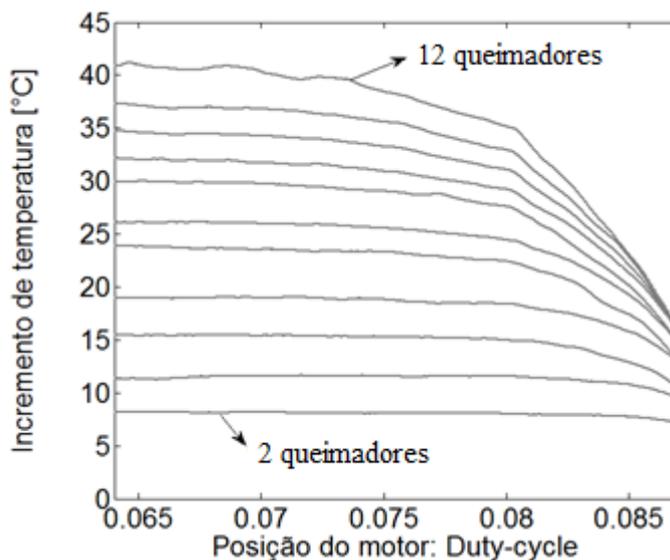


Figura 3.7: Resposta da planta frente ao fechamento da servo-válvula de gás

Verificou-se que o fechamento da válvula provoca diferentes respostas dependendo do número de bobinas ligadas. Para determinar as funções que caracterizam o comportamento do sistema em relação à abertura da válvula foram feitos ensaios para cada quantidade de queimadores.

Nos ensaios, o sistema foi ligado com um número fixo de queimadores e, após o sistema se aproximar do regime permanente, foram aplicados sucessivos incrementos de posição do servo-motor, no sentido de fechamento da válvula. Entre cada incremento aguardou-se o assentamento da saída. Nos experimentos, a válvula foi fechada gradualmente até a extinção da chama.

A Figura 3.8 mostra o ensaio para 10 queimadores acesos. Os pontos destacados no gráfico superior representam a variação de temperatura da água na saída do aquecedor para cada posição do motor (gráfico inferior).

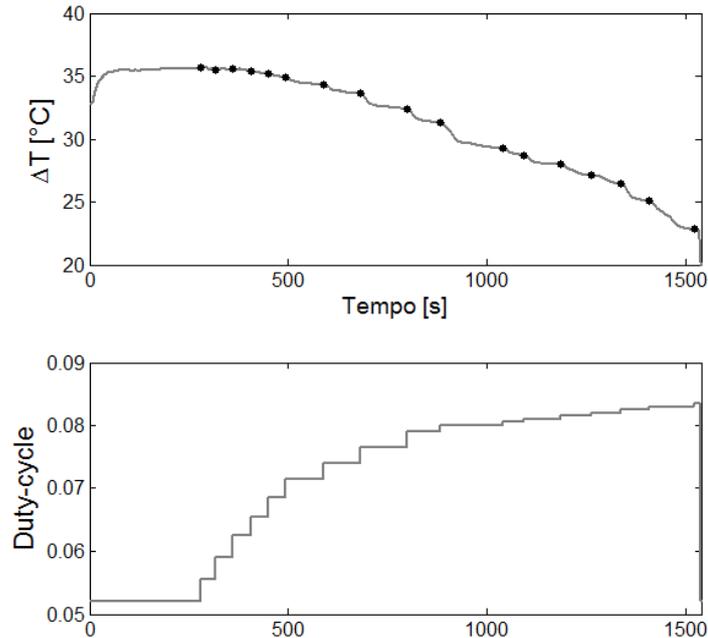


Figura 3.8: Resultados do ensaio da servo-válvula com 10 queimadores acesos

Os valores de ΔT obtidos nos ensaios foram normalizados em relação à variação máxima de temperatura proporcionada por cada número de queimadores acesos e geraram curvas que relacionam a posição do motor com a abertura da válvula, como o gráfico da Figura 3.9, onde as posições entre 0,052 e 0,070 apresentam abertura percentual igual ou próxima a 100 %. Desta forma, assumiu-se, por exemplo, um limiar de fechamento no próximo (0,072). Esse limiar indica que o sistema, para este número de bobinas ligadas, parte dessa posição quando inicia o fechamento da servo-válvula.

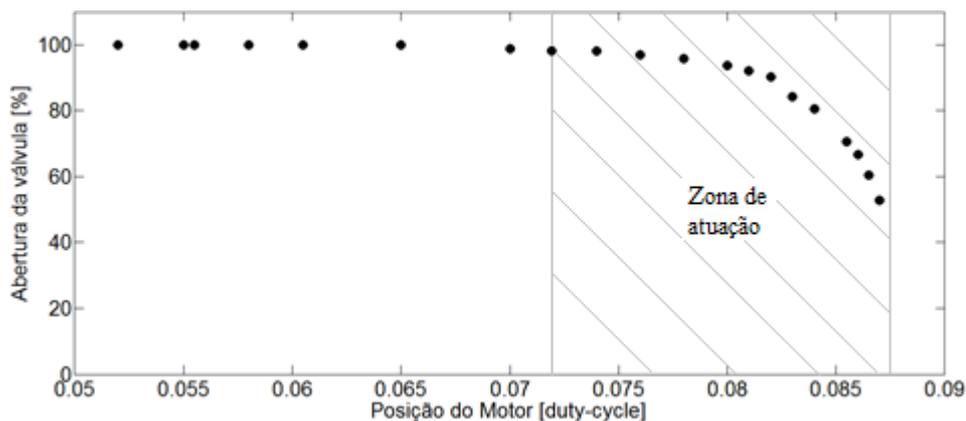


Figura 3.9: Resultados do ensaio com 5 queimadores acesos

Os pontos remanescentes (a partir de 0,072) foram aproximados por uma função polinomial de terceira ordem através da função *polyfit* do Matlab. Para implantar os algoritmos de controle descritos no Capítulo 5, também foi obtida a respectiva função inversa por meio do comando *polyfit*, substituindo as abscissas pelas ordenadas, e vice-versa.

Encontrou-se, assim, funções bijetoras no domínio das posições para que a inversa no domínio da abertura da válvula fosse calculada (por meio da troca dos eixos X e Y).

Os polinômios encontrados foram armazenados em um arquivo de dados e são apresentados no Apêndice B. A Figura 3.10 apresenta as curvas associadas a esses polinômios utilizados para representar a relação inversa da servo-válvula. Percebeu-se que a posição limiar diminui à medida que são ligados mais queimadores. Este fenômeno é explicado pelo fato de que, ao aumentar-se o número de orifícios de saída de gás, a velocidade de saída em cada queimador diminui, ocorrendo a redução da altura da chama, que é agravada com o fechamento das servo-válvula. Esta característica é destacada pela reta tracejada. Para dez bobinas, o incremento de temperatura diminui rapidamente, enquanto que, para uma ou duas bobinas, as chamas se extinguem sem provocar grandes variações de temperatura.

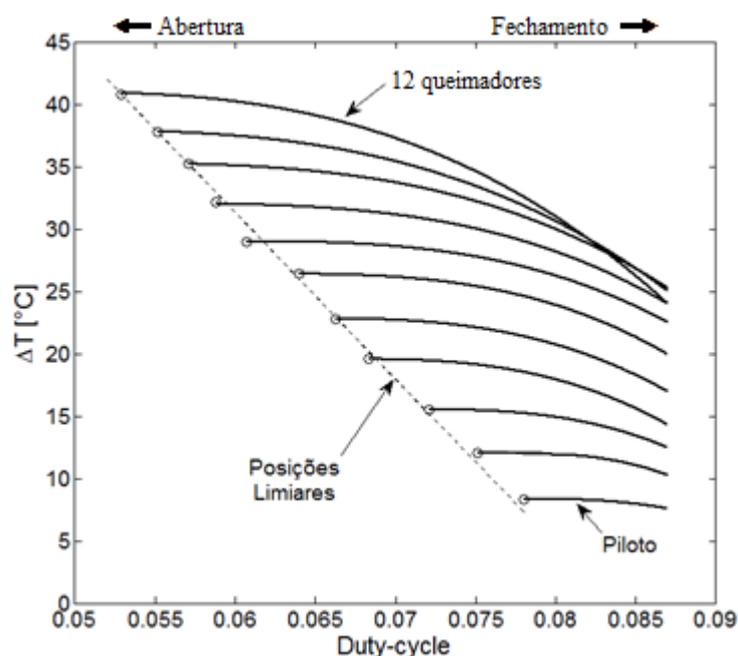


Figura 3.10: Curvas de interpolação para a servo-válvula

3.6 Centelhador

O centelhador é o dispositivo que provoca as descargas elétricas responsáveis pela ignição do gás. Ele é composto por um circuito que produz um sinal de tensão elétrica e por uma ponteira instalada sobre um queimador, onde ocorrem as descargas elétricas. A diferença de potencial gerada tem intensidade (não mensurada) suficiente para produzir arco elétrico de até 1 cm entre seus terminais, no caso a ponteira e o chassi.

Foi feita uma modificação no circuito utilizado por Gutterres, 2011 (Anexo C), de forma que um segundo transformador de saída foi colocado em série com o existente,

duplicando o número de espiras, tanto no enrolamento primário quanto no secundário. Esta mudança se deve ao fato de que havia, ocasionalmente, descargas elétricas entre as espiras do enrolamento de maior tensão do transformador. O aumento do número de espiras de ambos os enrolamentos do transformador não altera a relação entre o primário e o secundário, apenas distribui a diferença de potencial entre mais espiras, reduzindo as chances de ocorrerem descargas elétricas no enrolamento.

3.7 Sensor de Chama

Para segurança de operação do aquecedor, é importante que o controlador possa detectar a presença de chama nos queimadores. Assim, o uso de um sensor capaz de detectar se o gás está sendo queimado, não apenas ajuda na tomada de decisões do controlador, como também consiste de um item importante de segurança, pois, caso o fogo venha a apagar indevidamente, o sistema, identificando essa situação, pode executar o fechamento da passagem de gás, diminuindo riscos de vazamento.

O princípio de funcionamento do sensor de chama baseia-se no fato de que o fogo contém partículas ionizadas que conduzem eletricidade na presença de um campo elétrico. Aplicando uma diferença de potencial entre o chassi do aquecedor e um condutor instalado sobre um queimador central, o fogo se comporta como um elemento condutor e uma corrente elétrica passa a circular entre o condutor e o chassi. A Figura 3.11 ilustra o comportamento do fogo na presença de um campo elétrico.

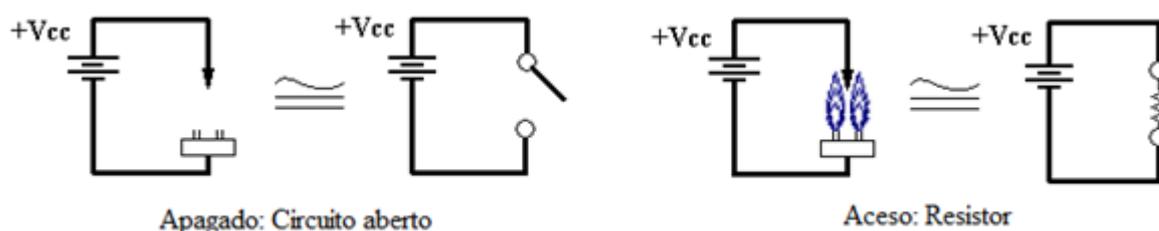


Figura 3.11: Comportamento elétrico do fogo

Na Figura 3.12 está apresentada uma fotografia que mostra o sensor de chama (ponteira à esquerda) e a ponteira do centelhador (direita). O circuito do sensor de chama é o mesmo utilizado por Gutterres, 2011, e sua descrição técnica está no Anexo C.

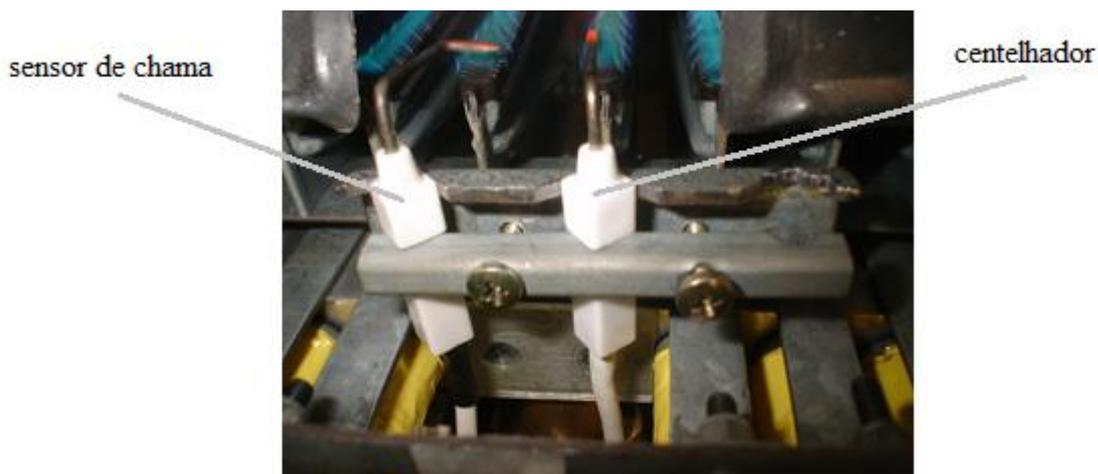


Figura 3.12: Ponteiras do centelhador e sensor de chama

3.8 Sensores de Temperatura

Para medir a temperatura da água foram utilizados dois sensores de temperatura, sendo um deles instalado junto à saída de água do aquecedor e o outro na entrada. O primeiro mede a variável controlada do sistema e poderia estar instalado mais distante do aquecedor, como em um chuveiro ou torneira, por exemplo. No presente caso, optou-se por alocar o sensor o mais próximo possível da saída do aquecedor para diminuir o atraso de transporte e seus efeitos.

O sensor colocado na entrada de água permite que o controlador detecte variações de temperatura, utilizando essa informação na execução da estratégia de controle. Neste sentido, esse sensor permite que o controlador calcule diretamente o incremento de temperatura ou potência calorífica que deve ser transmitida para a água, por meio da diferença entre a referência e a temperatura de entrada.

Os sensores de temperatura utilizados são termoresistores do tipo Pt-100 (de platina), cuja resistência elétrica é igual a 100Ω na temperatura de $0 \text{ }^\circ\text{C}$. A resistência do Pt-100 cresce linearmente com o aumento da temperatura, a uma taxa de $0,385 \Omega/^\circ\text{C}$. A norma internacional DIN-IEC 751/1985 padroniza os valores de resistência do Pt-100 em função da temperatura.

O circuito de condicionamento do sinal de temperatura é semelhante ao utilizado em Gutterres, 2011, e Henz, 2013, com uma alteração na parte de amplificação do sinal e a adição de um segundo canal para medir a temperatura da água na entrada do aquecedor. A saída do circuito está conectada ao conversor analógico-digital (AD) da placa de controle dSPACE,

hospedada no computador. No Apêndice C é apresentado o circuito completo do sensor de temperatura e outras informações técnicas.

3.9 Interface de Controle

O gerenciamento dos componentes da bancada é feito por meio de um computador de mesa, no qual foi instalada a placa de controle e processamento digital de sinais (dSPACE - DS1104). Esta placa é conectada a uma interface equipada com portas para comunicação serial, portas digitais (I/O), portas de sinal PWM e conversores analógico-digital (AD) e digital-analógico (DA).

Os algoritmos de controle foram desenvolvidos em ambiente Matlab/Simulink, que consiste em um programa largamente utilizado para simular e analisar modelos de sistemas dinâmicos. As rotinas são compiladas e enviadas para a placa de controle da dSPACE. Para ter acesso aos parâmetros e medidas do sistema de controle foi desenvolvida uma interface gráfica para o usuário no programa ControlDesk. A Figura 3.13 apresenta o aspecto visual da interface desenvolvida no ControlDesk.

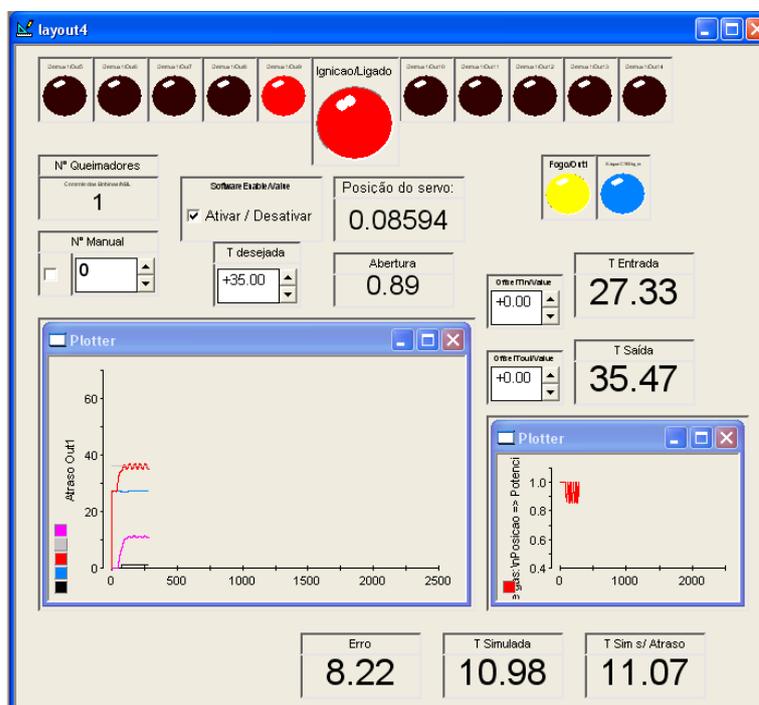


Figura 3.13: Interface gráfica ao usuário para operação do sistema de controle

3.10 Circuito de Potência

A placa de controle dSPACE não fornece a potência elétrica necessária para o funcionamento dos atuadores. Logo, foi projetada uma placa de circuito impresso que converte os sinais da interface de controle em sinais de potência para os atuadores, com o uso de transistores e opto-acopladores alimentados por uma fonte desenvolvida e descrita por Gutterres, 2011.

O circuito de acionamento dos solenoides desenvolvido em Gutterres, 2011, foi adaptado para funcionar em conjunto com a placa da dSPACE. Assim como na versão anterior, a seleção da servo-válvula a ser acionada é feita por um demultiplexador, que recebe um sinal de quatro bits e gera o sinal ‘Pulso’ em apenas um de seus pinos de saída. O uso do circuito demultiplexador impede o acionamento simultâneo de mais de um solenoide.

A Figura 3.14 apresenta uma fotografia da caixa utilizada na acomodação do circuito de potência e no interfaceamento entre a placa da dSPACE e componentes eletrônicos da bancada. Os bornes utilizados têm formatos distintos para impedir que ocorram conexões trocadas durante a instalação dos cabos de ligação.

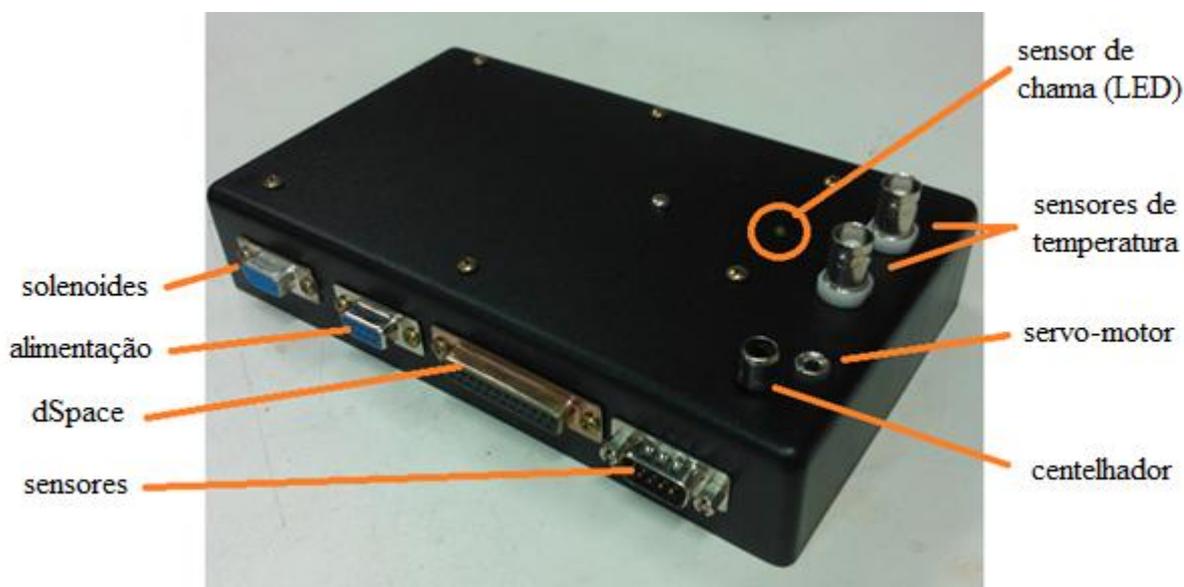


Figura 3.14: Caixa do circuito de potência e interfaceamento entre a dSPACE e a bancada

4 IDENTIFICAÇÃO DA PLANTA

A identificação consiste na determinação do modelo de um sistema dinâmico a partir de medições de sinais de entrada e saída [Landau, 2006]. Um bom modelo matemático pode permitir a implantação de sistemas de controle de alto desempenho. Para obtenção de tais modelos, em muitas situações práticas, é necessária a implantação de uma metodologia para a identificação direta desses modelos dinâmicos partindo de dados experimentais [Silva, 2008]. Os procedimentos para a identificação podem ser feitos em quatro etapas [Landau, 2006]:

1. Aquisição de dados experimentais de entrada e saída da planta;
2. Escolha da estrutura do modelo;
3. Estimação dos parâmetros do modelo;
4. Validação do modelo identificado.

A primeira etapa diz respeito à definição do tipo de sinal de entrada a ser utilizado para se obter uma saída da planta na sua faixa de operação. A segunda etapa refere-se à natureza do processo e à definição da ordem dos polinômios de sua função de transferência, no caso da proposição de um modelo linear para o processo. A terceira etapa trata do algoritmo utilizado para o cálculo dos parâmetros do modelo, enquanto que a última etapa é a que aborda a comparação entre o comportamento das respostas da planta e do modelo, frente a variações do sinal de entrada. Segundo Landau, 2006, o sinal usado na validação deve ser diferente do sinal usado na identificação.

4.1 Ensaios para a Identificação

São apresentadas nesta seção as principais características dos ensaios realizados para aquisição dos dados experimentais necessários para a identificação da planta. Uma das características do sistema é de que o sinal de entrada apresenta uma correspondência direta com o número de queimadores acesos. Assim, de acordo com a operação do aquecedor, foram definidas onze configurações de funcionamento que estão apresentadas na Tabela A.1 do Apêndice A. A variável de entrada foi chamada de ‘Nº bobinas’ e pode assumir valores de zero a dez. Quando igual a zero, apenas a chama Piloto (dois queimadores centrais) está acesa. Se o valor for dez, significa que há dez solenoides ligados, ou seja, doze queimadores acesos.

A variável de saída considerada é o incremento de temperatura proporcionado pelo aquecedor em cada configuração possível. Esse valor é calculado pela diferença entre as temperaturas medidas na entrada e na saída do aquecedor.

Em todos os ensaios, as válvulas de vazão de água e de gás foram completamente abertas. A vazão volumétrica de água quente medida na torneira foi considerada constante, com valor de aproximadamente 0,085 l/s. A vazão de gás não foi mensurada, sendo que esta varia proporcionalmente com a quantidade de solenoides acionados.

4.2 Estrutura do Modelo

Através da análise de resultados preliminares, escolheu-se uma função de transferência de ordem dois. Apesar de sistemas térmicos semelhantes apresentarem tipicamente dinâmicas de primeira ordem, o sistema em estudo mostrou respostas ao degrau características de um sistema superamortecido de segunda ordem. Em Henz, 2013, esse comportamento foi atribuído à influência da dinâmica relativamente lenta do sensor de temperatura.

4.3 Método Utilizado

A metodologia empregada para a obtenção do modelo matemático do aquecedor de passagem foi baseada no método originalmente proposto por Kosaka [Silva, 2008]. Esse método consiste, primeiramente, na aplicação de um degrau como sinal de entrada aplicado a um sistema linear, estável e invariante no tempo. A partir da resposta ao degrau, a função de transferência do sistema pode ser determinada através dos procedimentos matemáticos descritos a seguir.

Considerando $G(s)$ a função de transferência da planta, $Y_1(s)$ a saída do sistema e $U(s)$ uma função degrau unitário, o sistema pode ser descrito no domínio da frequência como:

$$Y_1(s) = G(s)U(s) , \quad (4.1)$$

onde:

$$U(s) = \frac{1}{s} \quad (4.2)$$

Supondo que $G(s)$ é uma função de transferência estável de primeira ordem definida como:

$$G(s) = \frac{b_0}{a_1 s + a_0} \quad (4.3)$$

Aplicando o teorema do valor final, tem-se:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} y(t) = y(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} sY(s) = G(0) = \frac{b_0}{a_0} \quad (4.4)$$

Para $G(s)$ ser estável, é necessário que $a_0 \neq 0$. Assim, a partir de (4.3) e (4.4), $G(s)$ pode ser representada como:

$$G(s) = \frac{\frac{b_0}{a_0}}{\frac{a_1}{a_0}s + \frac{a_0}{a_0}} = \frac{G(0)}{\frac{a_1}{a_0}s + 1} \quad (4.5)$$

Definindo $a'_1 = \frac{a_1}{a_0}$, a Equação 4.5 pode ser reescrita como:

$$G(s) = \frac{G(0)}{a'_1 s + 1} \quad (4.6)$$

O segundo passo é integrar a diferença entre os sinais $Y_1(s)$ e $y_1(\infty)/s$ ao longo do tempo, como mostrado no diagrama da Figura (4.1).

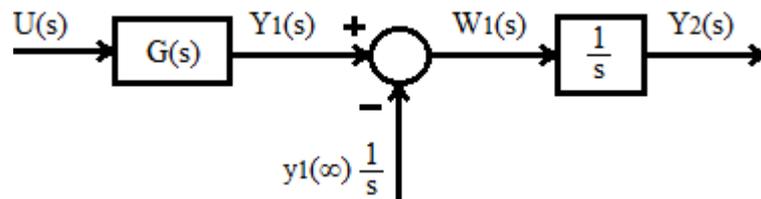


Figura 4.1: Diagrama de blocos do método de Kosaka [Silva, 2008]

O valor de a'_1 pode ser determinado através do procedimento algébrico que segue.

A partir do esquema descrito na Figura 4.1, tem-se:

$$W_1(s) = Y_1(s) - \frac{y_1(\infty)}{s} \quad (4.7)$$

Das equações (4.1), (4.2), (4.4) e (4.6), pode-se escrever $W_1(s)$ como:

$$W_1(s) = - \frac{G(0) a'_1}{a'_1 s + 1} \quad (4.8)$$

de onde pode-se obter

$$W_1(0) = - G(0) a'_1 \quad (4.9)$$

Além disso, o valor de regime para $Y_2(s)$ pode ser escrito como:

$$y_2(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s Y_2(s) = W_1(0) = -G(0) a'_1 \quad (4.10)$$

Isolando o termo a'_1 na Equação 4.10 e aplicando a igualdade $G(0) = y_1(\infty)$, obtida na Equação 4.4, tem-se:

$$a'_1 = - \frac{W_1(0)}{G(0)} = - \frac{y_2(\infty)}{y_1(\infty)} \quad (4.11)$$

Logo, $G(s)$ pode ser determinada através de:

$$G(s) = - \frac{y_1(\infty)}{\frac{y_2(\infty)}{y_1(\infty)} s + 1} \quad (4.12)$$

Em Silva, 2008, podem ser encontrados exemplos que demonstram a aplicabilidade deste método, inclusive para sistemas de ordens superiores. Por exemplo, para um sistema de ordem 2 e nenhum zero tem-se:

$$G(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{G(0)}{a'_2 s^2 + a'_1 s + 1} \quad (4.13)$$

A determinação da nova variável (a'_2) requer mais uma equação, a qual pode ser obtida da integração de um sinal $W_2(s)$, conforme representado no diagrama de blocos da Figura 4.2.

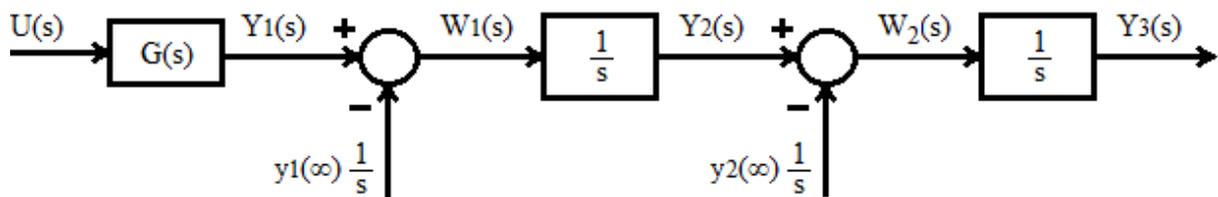


Figura 4.2: Diagrama de blocos para um sistema com dois polos e nenhum zero

A partir do diagrama da Figura 4.2 e do Teorema do Valor Final, são obtidas as equações 4.14, a 4.16. As duas primeiras são idênticas às equações 4.4 e 4.10, enquanto a Equação 16 é obtida de maneira análoga.

$$y_1(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s Y_1(s) = \frac{b_0}{a_0} = G(0) \quad (4.14)$$

$$y_2(\infty) = W_1(0) = -G(0) a'_1 \quad (4.15)$$

$$y_3(\infty) = W_2(0) = -G(0) a'_2 - W_1(0) a'_1 \quad (4.16)$$

A partir das equações 14 a 16, pode ser construído um sistema de equações lineares na forma matricial:

$$\begin{bmatrix} -G(0) & 0 \\ -W_1(0) & -G(0) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a'_1 \\ a'_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1(0) \\ W_2(0) \end{bmatrix}, \quad (4.17)$$

cujas soluções são os parâmetros a'_1 e a'_2 . A função de transferência $G(s)$ é encontrada pela substituição de $G(0)$ medida e dos parâmetros calculados a'_1 e a'_2 na Equação 4.13.

4.4 Resultados dos Ensaio

A Tabela 4.1 apresenta os resultados da identificação realizada por meio do método apresentado na Seção 4.3. Esses resultados foram utilizados para a obtenção do modelo matemático usado na síntese dos controladores e suas simulações.

Tabela 4.1: Resultados da Identificação de 2 a 12 queimadores acesos

Nº de queimadores acesos	Função de transferência	Incremento de Temperatura em regime [°C]
2 (Piloto)	$\frac{8,3 e^{-3s}}{46 s^2 + 14,5 s + 1}$	8,3
3 (Piloto+1 bobina)	$\frac{12 e^{-3s}}{47 s^2 + 14,5 s + 1}$	12,0
4 (Piloto+2 bobinas)	$\frac{15,5 e^{-3s}}{51 s^2 + 14,4 s + 1}$	15,5
5 (Piloto+3 bobinas)	$\frac{19,6 e^{-3s}}{53 s^2 + 14,8 s + 1}$	19,6
6 (Piloto+4 bobinas)	$\frac{22,8 e^{-3s}}{55 s^2 + 15 s + 1}$	22,8
7 (Piloto+5 bobinas)	$\frac{26,4 e^{-3s}}{49 s^2 + 16,7 s + 1}$	26,4
8 (Piloto+6 bobinas)	$\frac{29 e^{-3s}}{42 s^2 + 16 s + 1}$	29,0
9 (Piloto+7 bobinas)	$\frac{32,1 e^{-3s}}{45 s^2 + 14,1 s + 1}$	32,1
10 (Piloto+8 bobinas)	$\frac{35,2 e^{-3s}}{46 s^2 + 15,9 s + 1}$	35,2
11 (Piloto+9 bobinas)	$\frac{37,8 e^{-3s}}{44 s^2 + 17,4 s + 1}$	37,8
12 (Piloto+10 bobinas)	$\frac{40,8 e^{-3s}}{49 s^2 + 14,5 s + 1}$	40,8

Foram realizados onze ensaios, variando de zero até dez solenoides ligados. A primeira coluna apresenta o número de queimadores acesos, enquanto que a segunda mostra a função de transferência para cada número de queimadores, no formato da Equação 4.13. A variável de entrada para as funções de transferência apresentadas na tabela é um degrau unitário, considerou-se o valor 0 para o intervalo em que todos os queimadores estão inativos e 1, a partir do momento em que os ‘n’ queimadores são acionados. A variável de saída é o incremento de temperatura da água.

A fim de obter uma equação representativa do comportamento médio da planta com relação ao número de queimadores acesos, foi elaborado um script para Matlab que permite automaticamente:

- 1) Calcular uma curva normalizada para cada um dos onze ensaios utilizados na identificação, por meio da divisão dos valores medidos pelo máximo incremento de temperatura respectivo a cada ensaio.
- 2) Gerar uma função de transferência de ganho estático unitário para simulação, $G_{sim}(s)$, a partir da atribuição de valores a seus polos, dentro do domínio dos valores das funções da Tabela 4.1;
- 3) Simular a resposta ao degrau desta $G_{sim}(s)$;
- 4) Calcular a diferença entre a curva de resposta ao degrau gerada no do passo 3 e as curvas normalizadas calculadas no passo 1, gerando uma matriz de vetores de erro;
- 5) Calcular a variância de cada vetor de erro gerado no passo 4;
- 6) Calcular a média das variâncias calculadas no passo 5, armazenando os parâmetros utilizados no passo 2, caso a média encontrada tenha sido a menor calculada neste passo;
- 7) Voltar ao passo 2 até que seja verificado todo o domínio.

A função de transferência encontrada para o aquecedor de passagem é a mostrada na Equação 4.18. Esta função está normalizada e seu ganho estático é alterado conforme a condição de operação (número de queimadores acesos). Seus valores estão apresentados na terceira coluna da Tabela 4.1.

$$G(s) = \frac{1}{48,6 s^2 + 15,5 s + 1} e^{-3s} \quad (4.18)$$

4.5 Validação

A Figura 4.4 apresenta as respostas de temperatura de saída ao longo do tempo que permitem a comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e por simulação. A

curva contínua representa os valores medidos na saída do aquecedor, enquanto que a curva tracejada (escura) representa a simulação da resposta da função de transferência da Equação 4.18 em relação o sinal de entrada, dado pela curva tracejada referente ao número de bobinas acesas. O aquecedor é ligado no instante $t = 0$ s e permanece com apenas a chama Piloto em operação até o instante $t = 66$ s, quando um novo queimador é acionado. No decorrer do ensaio, outros queimadores são ligados e desligados conforme a curva enumerada disposta na parte inferior do gráfico.

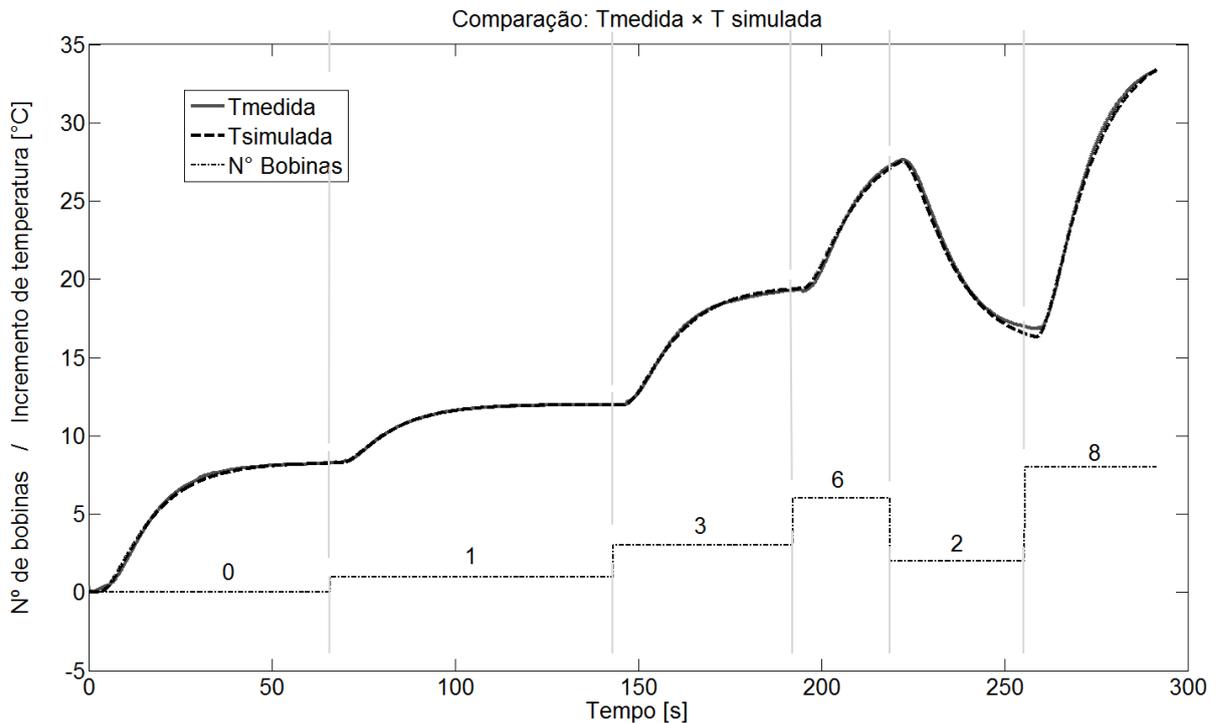


Figura 4.3: Validação do sistema identificado

4.6 Outros Parâmetros

Durante a identificação, verificou-se a existência de um atraso de transporte da planta de aproximadamente 3 segundos. Outro dado obtido foi o incremento de temperatura relativa a um dado número de queimadores acesos. Esse valor varia inversamente com a vazão de água que circula pelo aquecedor, sendo os valores apresentados na Tabela 4.1 obtidos para uma vazão de água de 85 ml/s.

A relação entre o calor transmitido em regime permanente para água e as temperaturas na entrada e na saída do aquecedor pode ser expressa através de:

$$\dot{q}_a = \dot{m}_e c_p (T_s - T_e) , \quad (4.19)$$

onde:

\dot{q}_a é a potência transferida para a água, pela combustão do gás [W];

\dot{m}_e é a vazão mássica de água que passa pelo aquecedor [kg/s];

c_p é o calor específico da água (4181 [J/kg °C]);

T_e e T_s são as temperaturas da água na entrada e na saída [°C].

Utilizando os valores da Tabela 4.1 e a Equação 4.19, foi definida a potência calorífica transmitida para a água relativamente a cada número de queimadores acesos. Por exemplo, para dois queimadores acesos, o ganho estático do processo que representa o incremento de temperatura da água em regime é:

$$G(0) = 8,3 = (T_s - T_e) = \Delta T \quad (4.20)$$

A vazão de água utilizada foi de 0,085 l/s. Substituindo estes valores na Equação (4.19) resulta:

$$\dot{q}_a = 0,085 \times 4181 \times 8,3 = 2950 \text{ [W]} \quad (4.21)$$

A Equação 4.21 fornece a potência calorífica transmitida do aquecedor para a água para as condições descritas acima. Neste caso, a chama piloto fornece 2950 W para a água. Analogamente, foram calculadas as potências para as demais quantidades de queimadores, cujos valores estão apresentados na Tabela 4.2.

Tabela 4.2: Relação entre o número de queimadores e a potência

Nº de queimadores	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Potência [W]	2950	4265	5508	6966	8103	9382	10306	11408	12510	13434	14500

4.7 Modelo do Processo

A Figura 4.5 mostra o diagrama de blocos do modelo do aquecedor. As variáveis de entrada são a vazão de água e a potência térmica. A saída é o incremento de temperatura da água.

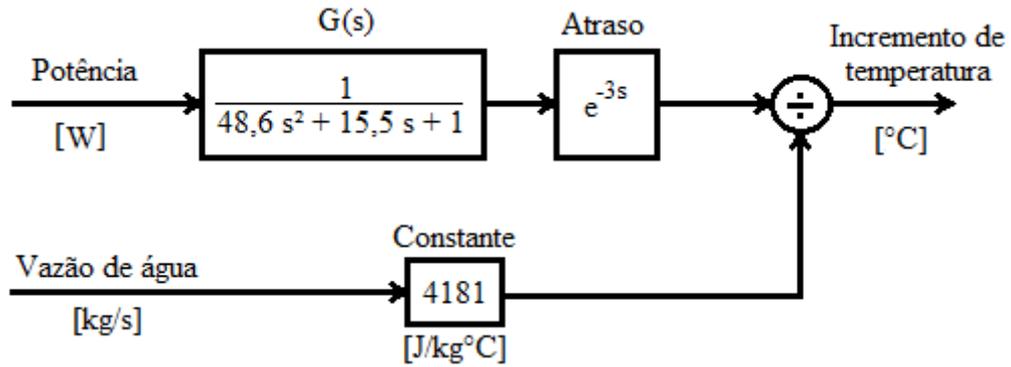


Figura 4.4: Modelo do aquecedor em diagrama de blocos

No presente trabalho, a vazão mássica da água será considerada constante e igual a 0,085 l/s. Assim, o modelo do processo pode ser simplificado através da divisão de $G(s)$, da Equação 4.18, pela vazão e pelo calor específico da água. Deste modo, o modelo do processo pode ser representado conforme o diagrama da Figura 4.5.

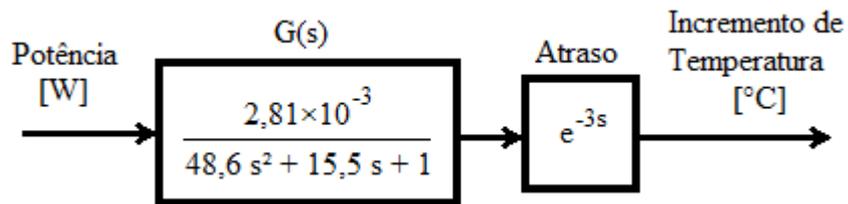


Figura 4.5: Modelo do aquecedor para vazão constante de 0,085 l/s

5 PROJETO DO CONTROLADOR

Um dos principais objetivos do projeto Controlgás é manter a altura da chama em seu nível mais alto possível. Assim, o conjunto de solenoides foi considerado como o atuador principal, utilizado para provocar variações de temperatura mais significativas, abrangendo toda a faixa de operação do aquecedor, enquanto que a servo-válvula foi utilizada para realizar um ajuste fino, de modo a permitir que sejam atingidas temperatura intermediárias às obtidas com a combinação discreta de queimadores acesos.

A estratégia de controle deste trabalho consiste, primeiramente, na variação da temperatura da água que circula pelo aquecedor, por meio do acionamento das válvulas solenoides mantendo-se a abertura da servo-válvula. Quando a temperatura medida na saída ultrapassa a temperatura desejada, mantém-se o número de queimadores acionados neste instante e inicia-se o fechamento da servo-válvula, reduzindo-se a temperatura até a temperatura desejada, com mínima redução da altura da chama. A Figura 5.1 ilustra o desempenho esperado para o sistema de controle (os gráficos obtidos por simulação).

Visando a simplificar em uma primeira abordagem o projeto do controlador optou-se por desenvolver uma estratégia em que a servo-válvula e o manifold com solenoides pudessem ser acionados de forma independente. Desta forma, propôs-se a segmentação do sistema de controle de temperatura em dois controladores que entram em ação alternadamente. O primeiro deles controla a temperatura variando o número de queimadores acesos e opera durante o período transiente. O segundo controlador opera quando a temperatura está em uma faixa próxima da referência e é responsável pela variação da posição do obturador da servo-válvula de gás, diminuindo a sua vazão até que a temperatura da água de saída atinja o valor de referência. Assim, o sistema completo será denominado no presente trabalho como ‘controlador combinado’, irá operar com dois controladores não simultaneamente.

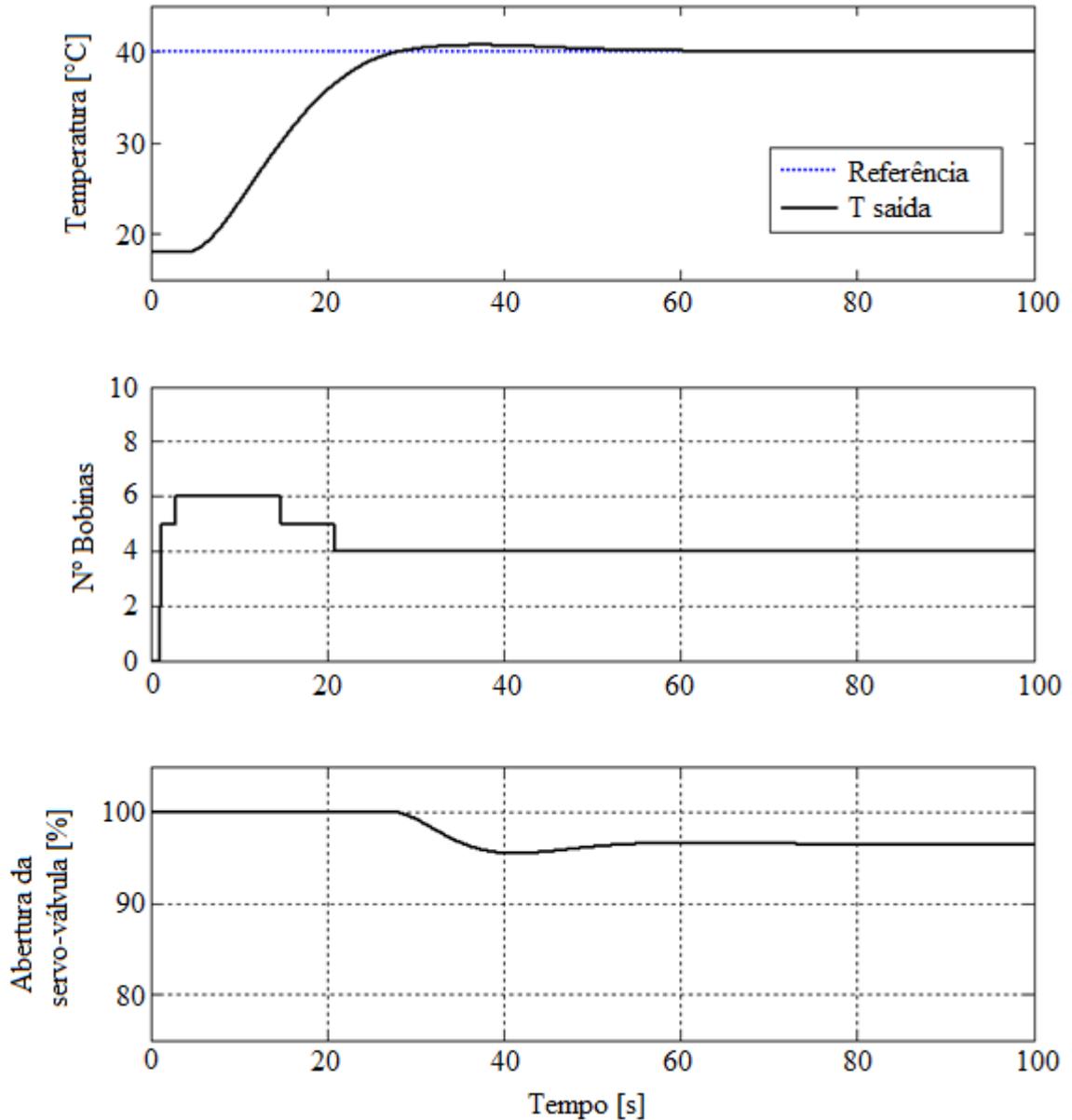


Figura 5.1: Desempenho esperado para o sistema de controle proposto

Primeiramente, um controlador (PI) irá calcular a partir da potência calorífica necessária, qual o número de queimadores que devem ser ligados para que a temperatura de saída convirja para um valor próximo da temperatura desejada. Esta fase do controle é denominada “transiente” e corresponde à situação em que a temperatura de água de saída varia do valor inicial (igual ao da temperatura de entrada) até um valor de regime. Para tanto, como a ação de controle é executada por atuadores (queimadores) discretos, o número de queimadores calculados é sempre o necessário para levar a temperatura de saída da água para um valor próximo e superior ao da temperatura desejada. Nesta fase, a servo-válvula mantém-se sempre com abertura máxima. Na segunda fase, quando a temperatura de saída da água está estabilizada (em um valor acima da referência), o segundo controlador PI (o de “regime

permanente”) realiza o fechamento da área de passagem do gás, de forma que a vazão forneça a potência calorífica necessária para que a resposta convirja para o valor de referência. A cada nova temperatura de referência, o sistema automaticamente reinicializa o processo de controle, operando novamente o controlador de regime transiente para depois passar para o comando do controlador de regime permanente.

5.1 Controle da Temperatura em Regime Transiente

Nesta seção, é apresentado o projeto do controlador da temperatura em regime transiente, neste caso, a ação de controle é realizada por meio do cálculo da quantidade necessária de queimadores que devem ser acesos para que a temperatura da água atinja o valor desejado. Para esta etapa, foram feitas as seguintes considerações:

- a) A vazão da água que circula pelo aquecedor é constante;
- b) A pressão de alimentação do gás é constante (aproximadamente 70 kPa);
- c) São conhecidos os valores de potência para cada número de queimadores acesos;
- d) O comportamento da planta pode ser aproximado por meio de um modelo de segunda ordem;
- e) Os atuadores são os 10 queimadores independentes mais os 2 queimadores centrais que permanecem acesos durante todo o funcionamento do sistema.

Resultados de trabalhos anteriores [Perondi, 2008b; Gutterres, 2011 e Henz, 2013] mostram que um controlador do tipo Proporcional-Integral (PI) pode ser usado no controle de temperatura de saída do sistema. Porém, devido a um atraso de transporte, a saída pode apresentar um comportamento oscilatório que pode ou não ser considerado aceitável, dependendo da aplicação.

Henz, 2013, propôs um controlador PI, atuando juntamente com um preditor de Smith (SP) para eliminar este comportamento oscilatório causado pelo atraso de transporte. A Figura 5.2 mostra a diferença entre os resultados de simulações do sistema controlado por um PI e por um PI com compensador de atraso. Em ambos os casos, pode ser observada na situação de regime permanente a ocorrência de chaveamento do último solenoide.

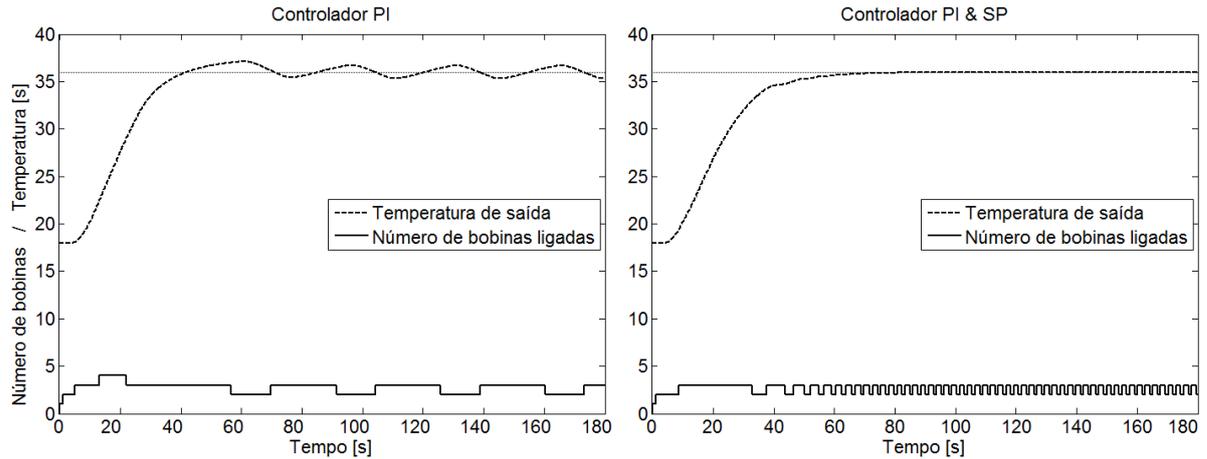


Figura 5.2: Influência do compensador de atraso SP

O projeto do controlador que calcula o número de queimadores desejado é baseado em Henz, 2013. Nas subseções 5.1.1 e 5.1.2 são apresentados, respectivamente, os projetos do controlador PI e do compensador de atraso, destacando as alterações realizadas nos mesmos com relação ao trabalho de Henz, 2013.

5.1.1 Projeto do Controlador PI

Inicialmente, foi considerada uma planta de segunda ordem $G(s)$ sem atraso e um controlador $C(s)$ do tipo PI, de acordo com as equações 5.1 e 5.2, respectivamente. O diagrama de blocos da Figura 5.3 representa o sistema em malha fechada.

$$G(s) = \frac{b_0}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0} = \frac{G(0)}{A s^2 + B s + 1} = \frac{2,81 \times 10^{-3}}{48,6 s^2 + 15,5 s + 1} \quad (5.1)$$

$$C(s) = K_p \left(1 + \frac{K_i}{s} \right) = \frac{K_p (s + K_i)}{s} \quad (5.2)$$

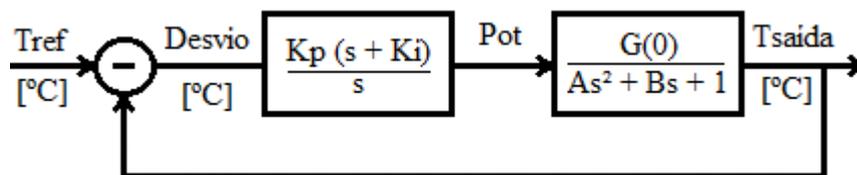


Figura 5.3: Diagrama de blocos do modelo do sistema com controlador PI

Os parâmetros K_p e K_i foram ajustados pelo método do lugar das raízes. Para aplicar o método, fixa-se um dos parâmetros (K_p ou K_i) e analisa-se a influência do outro sobre o desempenho do sistema. Segundo Bazanella, 2005, a análise pode ser simplificada quando se

aloca o zero do controlador (K_i) na mesma posição do polo dominante do processo (nesse caso os polos de $G(s)$ são: $p_1 = -0,2291$; $p_2 = -0,0898$). Assim, definiu-se o valor de K_i , sendo igual a 0,0898.

O valor de K_p foi calculado com o auxílio da ferramenta gráfica ‘*sisotool*’ do Matlab. Para utilização dessa ferramenta, foram inseridos os parâmetros da $G(s)$, o tipo de controlador desejado (no caso um PI) e o valor do zero do controlador (K_i). A partir dessas informações, o programa apresenta o lugar das raízes da função de transferência do sistema em malha fechada (Figura 5.4). Essa ferramenta permite que o usuário posicione, no lugar das raízes, os polos da função de transferência em malha fechada, calculando o ganho (K_p) para cada posição. O programa ainda apresenta curvas de desempenho, como, por exemplo, a resposta ao degrau, para que o usuário verifique se o comportamento do sistema é satisfatório.

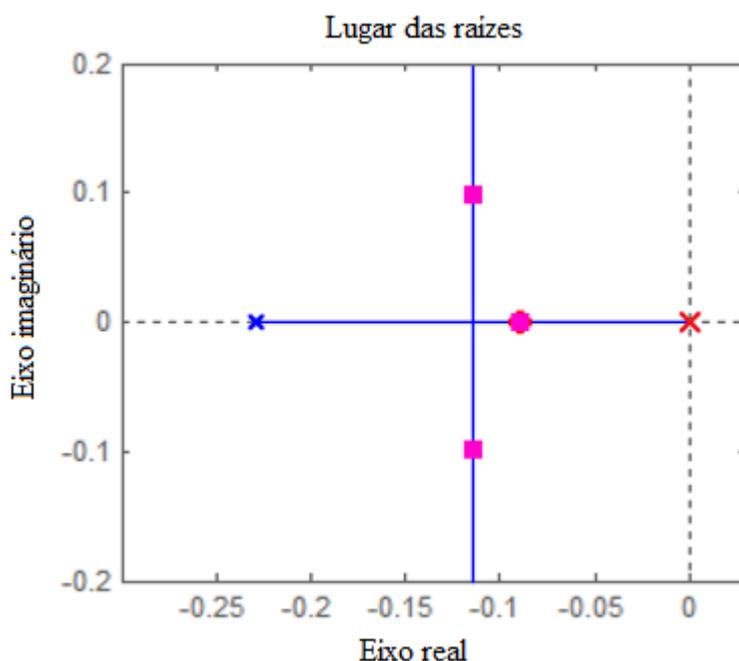


Figura 5.4: Lugar das raízes para o cálculo dos parâmetros do controlador PI

O máximo sobrepasso escolhido para que a saída não ultrapasse a referência em $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ foi de 2,6 %. Esse valor foi calculado por meio de regra de três simples sobre os valores do incremento de temperatura de cada queimador da Tabela 4.1. Assim, por meio da Equação 5.3, calculou-se o valor percentual correspondente ao incremento de um grau Celsius para cada número de queimadores. Por exemplo, para 2 queimadores, o incremento de temperatura é de $8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. Logo, a temperatura máxima que deve ser atingida é de $9,3\text{ }^{\circ}\text{C}$, que equivale a um valor 12 % acima de $8,3\text{ }^{\circ}\text{C}$. A Tabela 5.1 apresenta os valores percentuais correspondentes a $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ acima dos valores de incremento de temperatura da Tabela 4.1.

$$Mo_{\%}(nq) = \frac{100(\Delta T(nq) + 1)}{\Delta T(nq)} - 100, \quad (5.3)$$

onde $Mo_{\%}(nq)$ é o sobrepasso percentual e $\Delta T(nq)$ é o incremento de temperatura em função do número de queimadores.

Tabela 5.1: Valores do sobrepasso percentual correspondentes a 1 °C

nq	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
$Mo_{\%}$ [%]	12,0	8,3	6,5	5,1	4,4	3,8	3,4	3,1	2,8	2,6	2,5

Dentre os resultados da Tabela 5.1, escolheu-se o segundo menor valor, pois o menor, com 12 queimadores é apenas teórico, uma vez que o incremento de temperatura satura em 40,8 °C e não ocorre sobrepasso. Assim, com a definição deste parâmetro, foi determinado o ganho K_p do controlador observando-se o gráfico da resposta ao degrau do sistema em malha fechada, apresentado pelo *sisotool* (Figura 5.5). O valor calculado de K_p foi 394,8 e o tempo de assentamento calculado foi de 22,4 s para uma tolerância de $\pm 2,6\%$ do valor final.

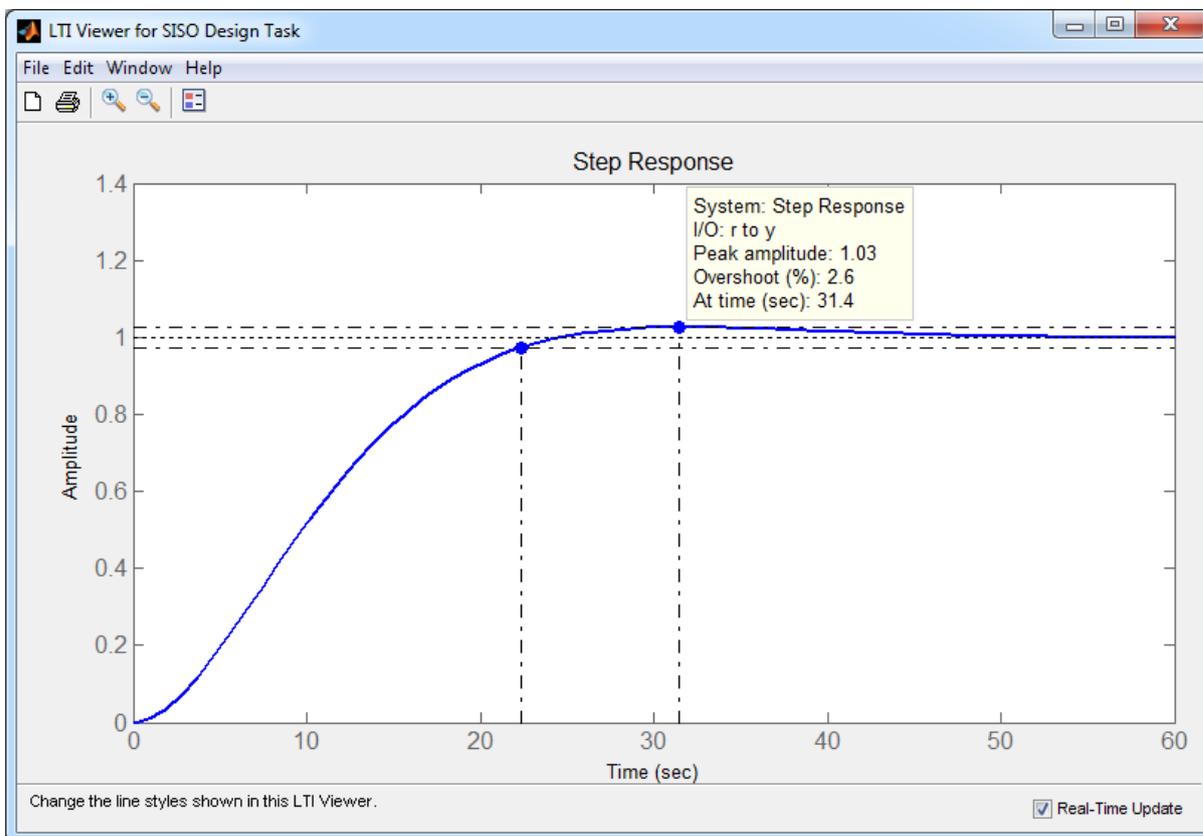


Figura 5.5: Resposta ao degrau com o controlador PI

O controlador PI verifica o desvio de temperatura entre a saída e a referência e calcula a potência calorífica que deve ser fornecida à planta. A natureza discreta do atuador (queimadores independentes) não permite a obtenção de valores intermediários de potência sem que haja uma variação constante (liga-desliga) no número de bobinas ligadas.

Para converter a potência calculada pelo controlador em número de queimadores, recorreu-se à Tabela 4.2. Estabeleceram-se os pontos médios entre as potências da Tabela 4.2 como limiares para calcular quantas bobinas serão ligadas. Esses valores são mostrados na Tabela 5.2. Assim, se, por exemplo, se a saída do controlador PI for igual a 9000 W, devem ser acionados sete queimadores.

Tabela 5.2: Relação entre a potência calculada e o número de queimadores a acender

Potência Calculada [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

A Figura 5.6 mostra o diagrama de blocos do controlador PI desta seção, cuja variável de entrada é o desvio de temperatura (diferença entre a referência e a medida na saída) e a saída é o número de solenóides que devem ser ligados.

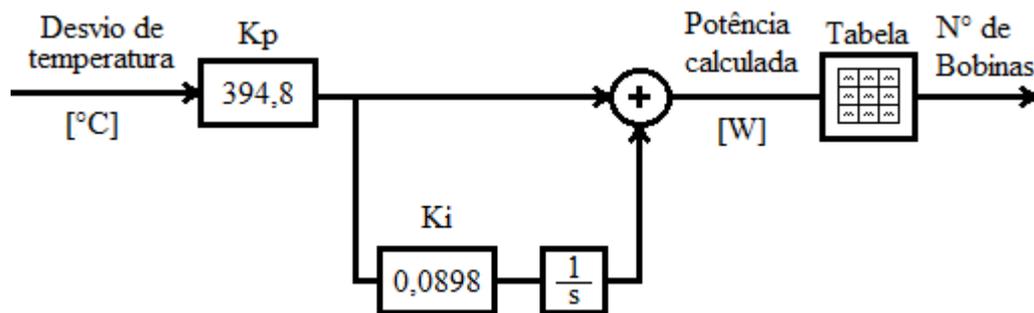


Figura 5.6: Controlador PI do número de bobinas

5.1.2 Controlador PI com Preditor de Smith

Com o controlador PI (Seção 5.1), o algoritmo de acionamento de solenóides (Seção 3.4.2) e a estrutura do preditor de Smith (Seção 2.2.2), foi desenvolvido o sistema de controle de temperatura responsável pelo cálculo e acionamento do número de queimadores necessários para aquecer a água até a temperatura desejada. A Figura 5.7 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle resultante.

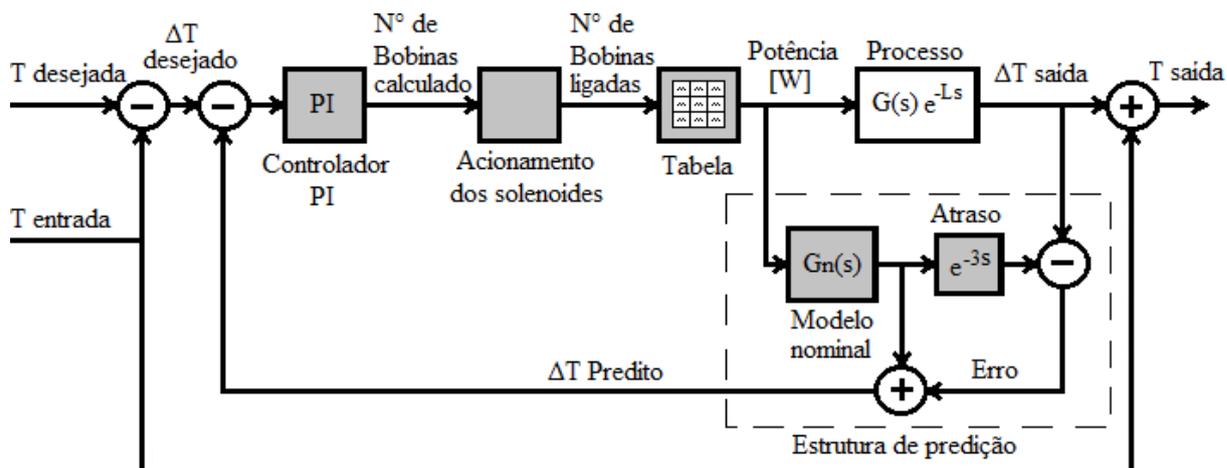


Figura 5.7: Diagrama de blocos do controlador PI com preditor de Smith

De acordo com este esquema, o controlador PI recebe o valor do acréscimo de temperatura desejado (diferença entre o valor definido pelo usuário e a temperatura medida pelo sensor localizado na entrada do aquecedor) e calcula o número de bobinas que devem ser ligadas para que o aquecedor forneça potência tal que a temperatura da água convirja para o valor desejado. Uma vez definido o número de bobinas, este valor é processado no bloco “Acionamento dos solenoides”, que gera os sinais elétricos necessários para que o circuito de potência acione as válvulas solenoides.

O bloco “Tabela” refere-se à Tabela 4.2, que define a potência calorífica transferida para água, de acordo com o número de queimadores acesos. Nas simulações, esse bloco está conectado tanto ao processo como ao modelo nominal da planta, conforme mostrado na Figura 5.7. Nos experimentos ele é conectado apenas ao bloco “Modelo nominal”, pois faz parte das características físicas do processo, servindo para fornecer valores “virtuais” de potência para a estrutura de predição, enquanto que a potência que entra na planta está relacionada com o número de queimadores acionados.

O acréscimo de temperatura na saída do aquecedor é comparado com o incremento calculado pelo preditor de Smith. Esse desvio, somado à saída do modelo sem atraso, realimenta o controlador PI.

O controlador apresentado nesta seção possui estrutura semelhante ao de Henz, 2013, porém com parâmetros calculados para um atraso de transporte de três segundos, em vez de quarenta e cinco. É possível elevar e manter a temperatura na saída do aquecedor próximo ao valor desejado apenas com este controlador, porém, os experimentos e simulações mostraram que irá geralmente ocorrer um cheaveamento (liga-desliga) do último solenoide acionado, conforme mostrado nos gráficos da Figura 5.2.

5.2 Controlador da Servo-válvula

Para eliminar esse chaveamento, foi introduzida uma servo-válvula capaz de regular a vazão total de gás que alimenta os queimadores. Assim, é possível prover valores intermediários de potência em relação àqueles fornecidos por uma combinação discreta do número de queimadores.

O objetivo é manter aceso o número de queimadores necessários para igualar ou superar a temperatura desejada, para, após, reduzir a vazão de gás, diminuindo assim a potência fornecida até que o desvio de temperatura tenda a zero. Desta maneira, evita-se diminuir a altura das chamas em demasia, mantendo uma melhor eficiência térmica no trocador de calor, de acordo com os resultados do trabalho apresentado em Perondi et al., 2008a.

O segundo controlador é dedicado ao controle da servo-válvula e entra em ação quando a temperatura da água atinge valores próximos ao valor de referência. A transição do controlador PI apresentado na Seção 5.1 para o controlador da servo-válvula ocorre quando a temperatura medida na saída se encontra dentro de uma faixa de tolerância de ± 1 °C em relação à referência.

5.2.1 Estrutura do Controlador da Servo-válvula

A Figura 5.8 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle de temperatura utilizando a servo-válvula como atuador. Durante seu funcionamento, o número de queimadores é considerado fixo e igual à quantidade de bicos acesos no momento em que este controlador entra em ação. Assume-se, ainda, que estão acesos queimadores em quantidade suficiente para elevar a temperatura da água a uma temperatura superior à de referência. Outra condição estabelecida pelo sistema de controle é o manutenção da abertura máxima da servo-válvula durante todo o período transiente da resposta. Assim, no início do controle do regime permanente, a mesma estará sempre nessa condição.

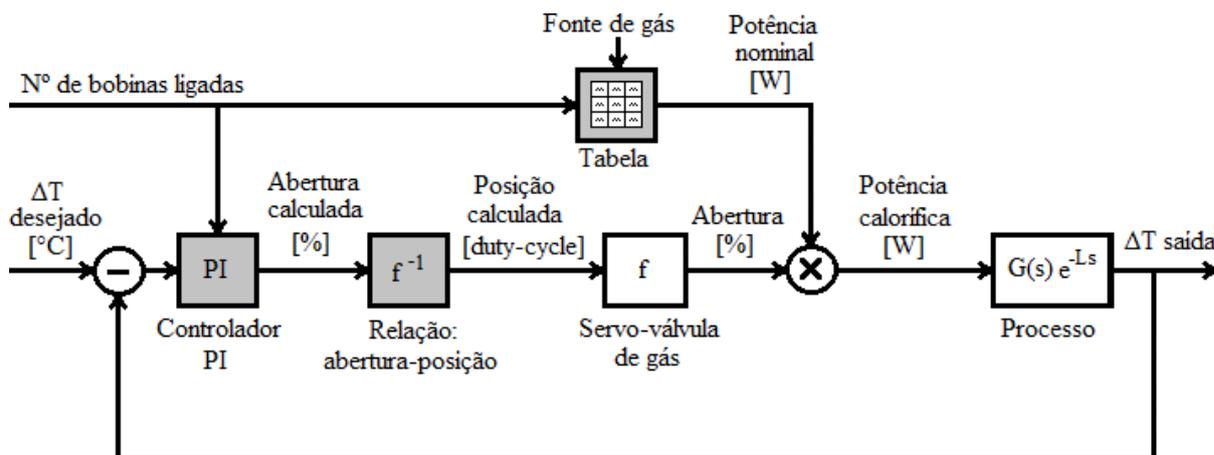


Figura 5.8: Sistema de controle de temperatura da servo-válvula

Ao ultrapassar a temperatura de referência na saída do aquecedor, o controlador de regime permanente inicia o fechamento da servo-válvula, comparando a temperatura medida na saída com a referência e calculando a potência que deve ser fornecida para a água para que a diferença tenda a zero. O resultado calculado será sempre relativo a uma potência inferior à potência máxima que aquele número de queimadores pode fornecer (Tabela 4.2), pois, conforme já comentado, o valor da temperatura de saída deve encontrar-se ao final da ação de controle do regime transitório com valor superior ao da referência.

Conforme foi visto na Seção 3.5, o modelo da válvula foi definido como um conjunto de funções polinomiais, apresentadas no Apêndice B, que dependem do número de queimadores e da posição do eixo do servo-motor. Essas funções fornecem valores normalizados (denominados ‘abertura’) que relacionam a potência transmitida para a água em uma dada posição do motor e a potência máxima relativa à situação em que a servo-válvula está toda aberta. A potência transmitida para a água pode ser calculada por meio da Equação 5.3:

$$\text{Pot}(nq, \text{pos}) = P_{\text{máx}}(nq) f(nq, \text{pos}), \quad (5.3)$$

onde Pot é a potência transmitida para água; nq é o número de queimadores acesos; pos é a posição do motor (*duty-cycle*); $P_{\text{máx}}$ é uma função cujos valores são dados pela Tabela 4.2 e f é uma função polinomial expressa pela segunda coluna da Tabela B.1.

Para converter a potência calculada pelo controlador PI em um valor correspondente à ‘abertura’ da válvula, basta dividi-la pela potência nominal (Tabela 4.2). Essa divisão é feita no bloco do controlador PI da Figura 5.8. A saída do controlador PI é convertida para um valor de posição do motor através de uma função inversa associada ao bloco representado por ‘ f^{-1} ’. Essas funções estão apresentadas na terceira coluna da Tabela B.1. O sinal

correspondente à posição desejada é levado ao sistema de controle do servo-motor que compõe a servo-válvula. O controle da válvula permite a passagem da vazão necessária para que a temperatura da água reduza até atingir o valor de referência.

Para compensar os efeitos do atraso, analogamente ao que foi feito no sistema de controle apresentado na Seção 5.1, a estrutura de controle da Figura 5.8 foi modificada, incorporando o preditor de Smith.

5.2.2 Cálculo dos Parâmetros do Controlador da Servo-válvula

Devido à sua simplicidade de implantação e por ser capaz de eliminar o erro de regime permanente, foi também escolhido um controlador PI para o controle da servo-válvula. A Figura 5.9 ilustra a estrutura preliminar do controlador da servo-válvula.

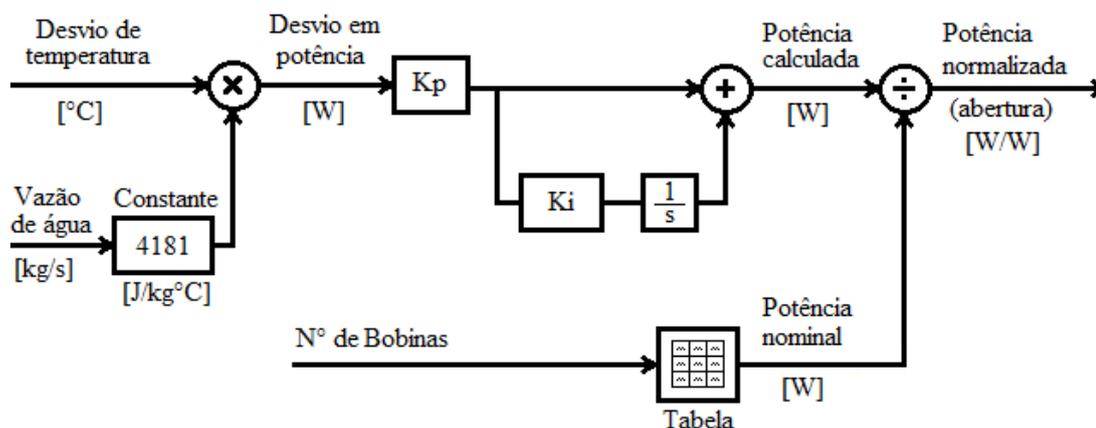


Figura 5.9: Estrutura preliminar do controlador PI da servo-válvula

Visando a desacoplar os controladores (do número de bobinas e da servo-válvula), conforme já comentado na Seção 5.2.1, o valor de potência calculado pelo PI é dividido pela potência máxima fornecida pelos queimadores quando a servo-válvula está totalmente aberta (Tabela 4.2). Para a entrada em funcionamento do controlador da servo-válvula e retirada de operação do controlador do número de bobinas, é necessária a introdução de critérios que definam a necessidade de operação de um dos dois controladores. Assim, enquanto a temperatura de saída estiver na faixa de $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ em torno da referência, o número de queimadores é mantido constante e suficiente para igualar ou superar a temperatura desejada. Logo, o que se espera com o fechamento da válvula de gás é uma fração da potência máxima transmitida para a água pelos queimadores que se encontram acesos.

Os ganhos desse controlador foram calculados por meio dos mesmos procedimentos que o PI do número de queimadores. A função de transferência da planta foi considerada a

mesma, as não linearidades da servo-válvula são canceladas por funções inversas, assim, o sistema realimentado é simplificado, com a forma apresentada na Figura 5.3. O Valor de sobrepasso escolhido foi ligeiramente inferior ao do outro controlador, sendo igual a 1,66 %. A partir desse valor, com a ferramenta *sisotool* foi calculado o ganho K_p com valor de 1,012 e o ganho integral se manteve o mesmo, igual ao valor do posição do polo dominante, ou seja, K_i igual a 0,0898. A soma dos termos PI é dividida pela potência máxima obtida com o número de queimadores a fim de se obter um sinal que varie entre zero e um, referentes, respectivamente, às posições em que a válvula se encontra totalmente fechada e totalmente aberta. Esse recebeu a denominação de ‘abertura’

Para simplificar a representação, o ganho proporcional foi multiplicado pela vazão (0,085 l/s) e pelo calor específico da água (4181 J/kg°C), formando um único bloco de ganho que incorpora estes parâmetros. Para melhor desempenho frente a variações paramétricas conhecidas, utilizou-se uma estratégia de controle por *gain-scheduling*. Assim, o ganho proporcional foi parametrizado em relação aos valores da Tabela 4.2 na forma de uma função do número de queimadores $K_p(nq)$. Assim, o ganho proporcional parametrizado pode ser calculado conforme a Equação 5.4, sendo seus valores apresentados na Tabela 5.3. A Figura 5.10 apresenta o diagrama referente ao controlador PI da servo-válvula.

$$K_p(nq) = \frac{0,085 \times 4181}{P_{\text{máx}}(nq)} \quad (5.4)$$

Tabela 5.3: *Gain-scheduling* do controlador PI da servo-válvula

Nº de queimadores	Ganho Proporcional (K_p)
2	$120,5 \times 10^{-3}$
3	$83,3 \times 10^{-3}$
4	$64,5 \times 10^{-3}$
5	$51,0 \times 10^{-3}$
6	$43,9 \times 10^{-3}$
7	$37,9 \times 10^{-3}$
8	$34,5 \times 10^{-3}$
9	$31,2 \times 10^{-3}$
10	$28,4 \times 10^{-3}$
11	$26,5 \times 10^{-3}$
12	$24,5 \times 10^{-3}$

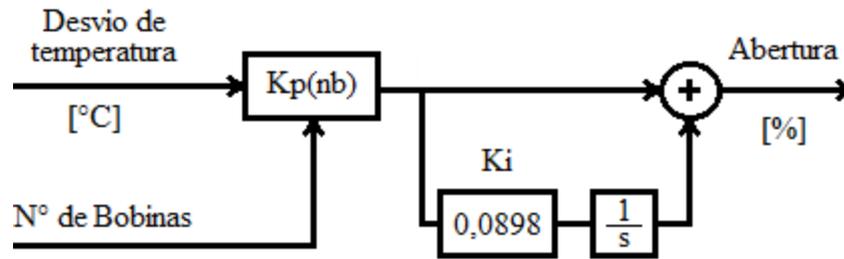


Figura 5.10: Controlador PI com *gain-scheduling* da servo-válvula

5.3 Sistema de Controle de Temperatura Combinado

A Figura 5.11 apresenta o diagrama de blocos do sistema de controle Combinado, com os dois controladores principais. O bloco “Tabela” é novamente uma referência à Tabela 4.2. O sistema de controle inicia a operação com a leitura dos sensores de temperatura na entrada e na saída e com a verificação da temperatura desejada. Os valores são convertidos em acréscimo de temperatura e o desvio entre a saída e a referência são enviados aos controladores PI de ambos os atuadores.

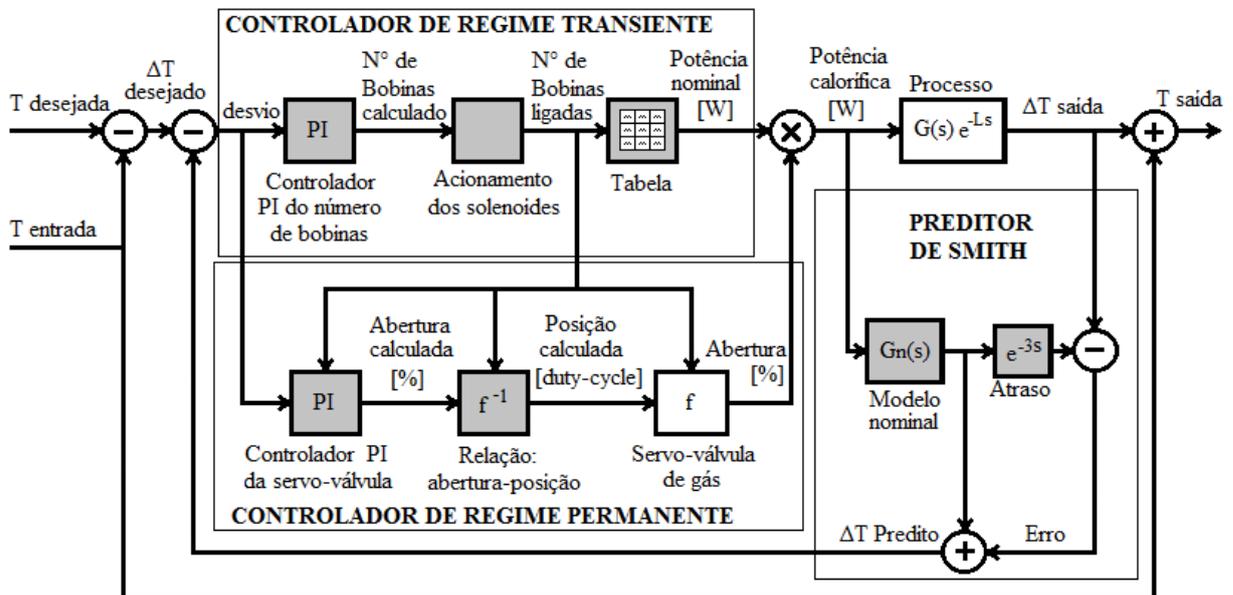


Figura 5.11: Sistema de controle combinado

Se a temperatura medida na saída estiver abaixo da referência, a servo-válvula é mantida 100 % aberta, por meio do uso blocos de comparação, conectados ao bloco gerador do sinal PWM do Simulink. Enquanto isso, o controlador do número de solenoides calcula a potência que deve ser transferida para a água e abre a quantidade necessária de saídas de gás para liberar tal potência.

Quando a saída se aproxima da referência, o número de bobinas ligadas passa a ser um valor constante e igual ao número que estava ativo no momento em que a temperatura entra na zona de regime, de ± 1 °C em torno da referência. Se o número de queimadores acesos for suficiente para provocar um sobrepasso, a servo-válvula começa a fechar de acordo com a amplitude deste sobrepasso. O termo integrador do segundo controlador permite que seja eliminado o erro de regime permanente, aproximando o valor da saída ao da referência.

O sistema combinado inclui um preditor de Smith comum aos dois controladores. O preditor de Smith requer que o algoritmo de controle contenha os modelos dos atuadores e da planta para gerar os sinais de predição.

Nas seções 5.1 e 5.2 assumiu-se que a quantidade de queimadores ligados até o instante da transição entre os controladores do número de queimadores e da servo-válvula seria suficiente para que a temperatura ultrapassasse a referência. Caso isto não ocorra, estabeleceu-se uma condição no algoritmo de controle para que o número de solenoides seja incrementado em uma unidade. Desta maneira, o sistema garante automaticamente a ocorrência de sobrepasso.

Para isso, foram estabelecidos limites de saturação do integrador do PI da servo-válvula, cujos valores foram obtidos iterativamente por meio de simulações, sendo iguais a $\pm 0,225$. Esses limites são utilizados para a rotina de tomada de decisão de incrementar ou decrementar o número de queimadores quando a temperatura de saída se encontra na faixa de tolerância de ± 1 °C, porém, com um número insuficiente de queimadores para atingir a temperatura de referência. O incremento, ou decremento, em um queimador ocorre quando a saturação do integrador no controlador da servo-válvula se mantém por cinquenta segundos.

Outra situação que deve ser levada em conta ocorre quando há alteração da temperatura de referência para um valor inferior ao original, determinando uma circunstância em que a temperatura se encontra inicialmente acima do novo valor. Para esta condição, foi definido que toda a vez que houver alteração na referência, a válvula se desloca para a posição 100 % aberta.

6 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados dos ensaios realizados na bancada para diferentes referências. Os resultados dos ensaios realizados são apresentados em três gráficos: o primeiro mostra as curvas de temperatura da água medidas na entrada e na saída do aquecedor; o segundo mostra o número de bobinas (ou queimadores de acionamento individual) que são ligadas durante a operação do aquecedor enquanto que o terceiro gráfico mostra o sinal “abertura” correspondente à posição da servo-válvula, onde 100 % significa que a válvula se encontra totalmente aberta.

Nos resultados do ensaio mostrado na Figura 6.1, o máximo sobrepasso medido foi 2,4 °C aos 109 segundos e o desvio não ultrapassa 0,1 °C em regime.

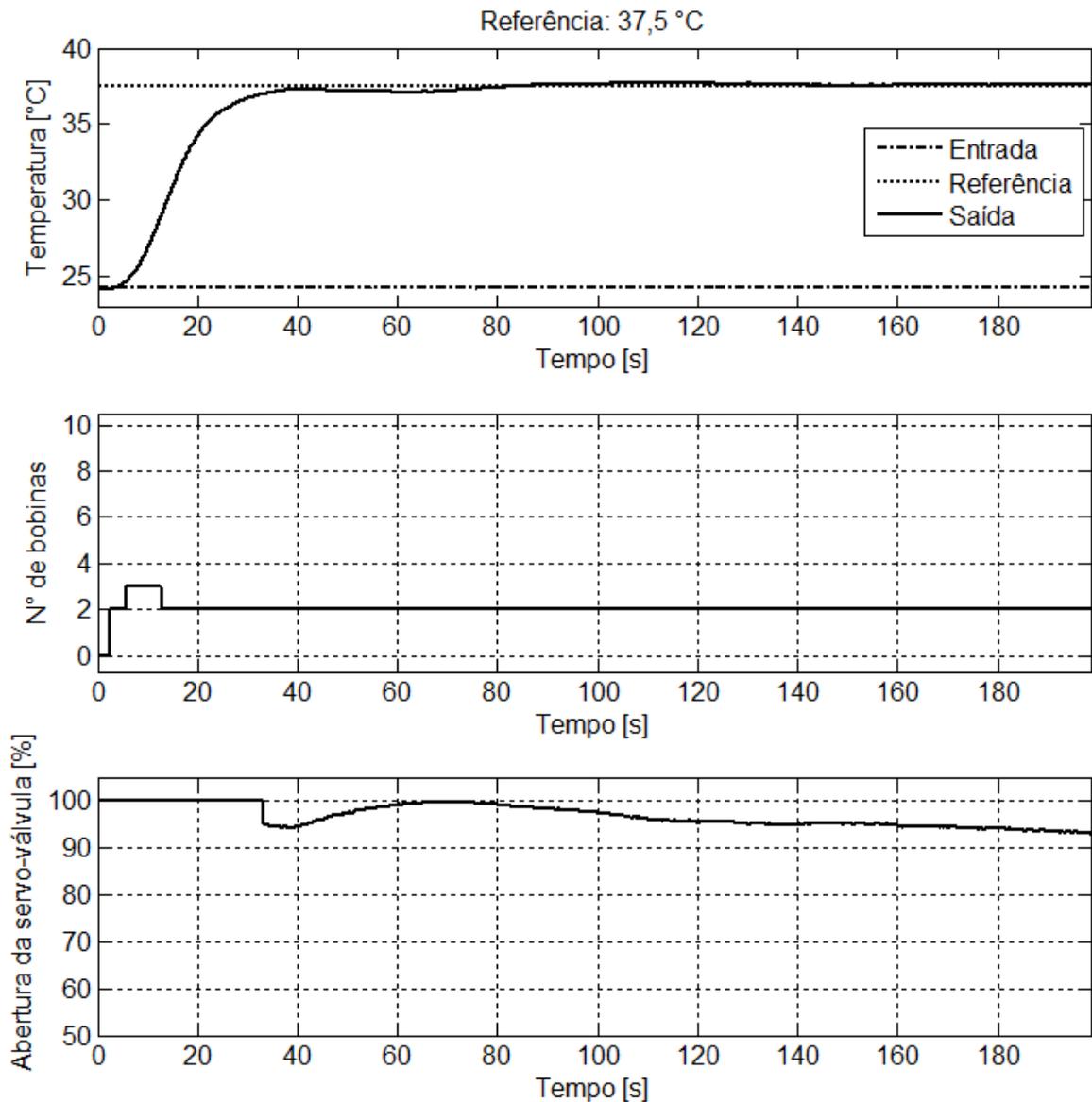


Figura 6.1: Ensaio realizado para temperatura desejada de 37,5 °C

Na Figura 6.2 é apresentada a resposta do sistema para uma temperatura de referência de 38 °C. Nesse ensaio, o incremento de temperatura fornecido pela abertura de duas bobinas é suficiente para elevar a temperatura da água até um valor ligeiramente acima da referência. Verifica-se que a ação de controle de regime permanente varia ao longo do tempo para conseguir manter a temperatura de saída aproximadamente constante. Isto se deve, provavelmente, a perturbações, como alteração na vazão de água, efeitos da turbulência da mistura de gás e ar, ação de vento sobre o ar quente. O máximo sobrepasso medido foi de 0,46 °C e a amplitude de oscilação em regime permanente é inferior à 0,2 °C.

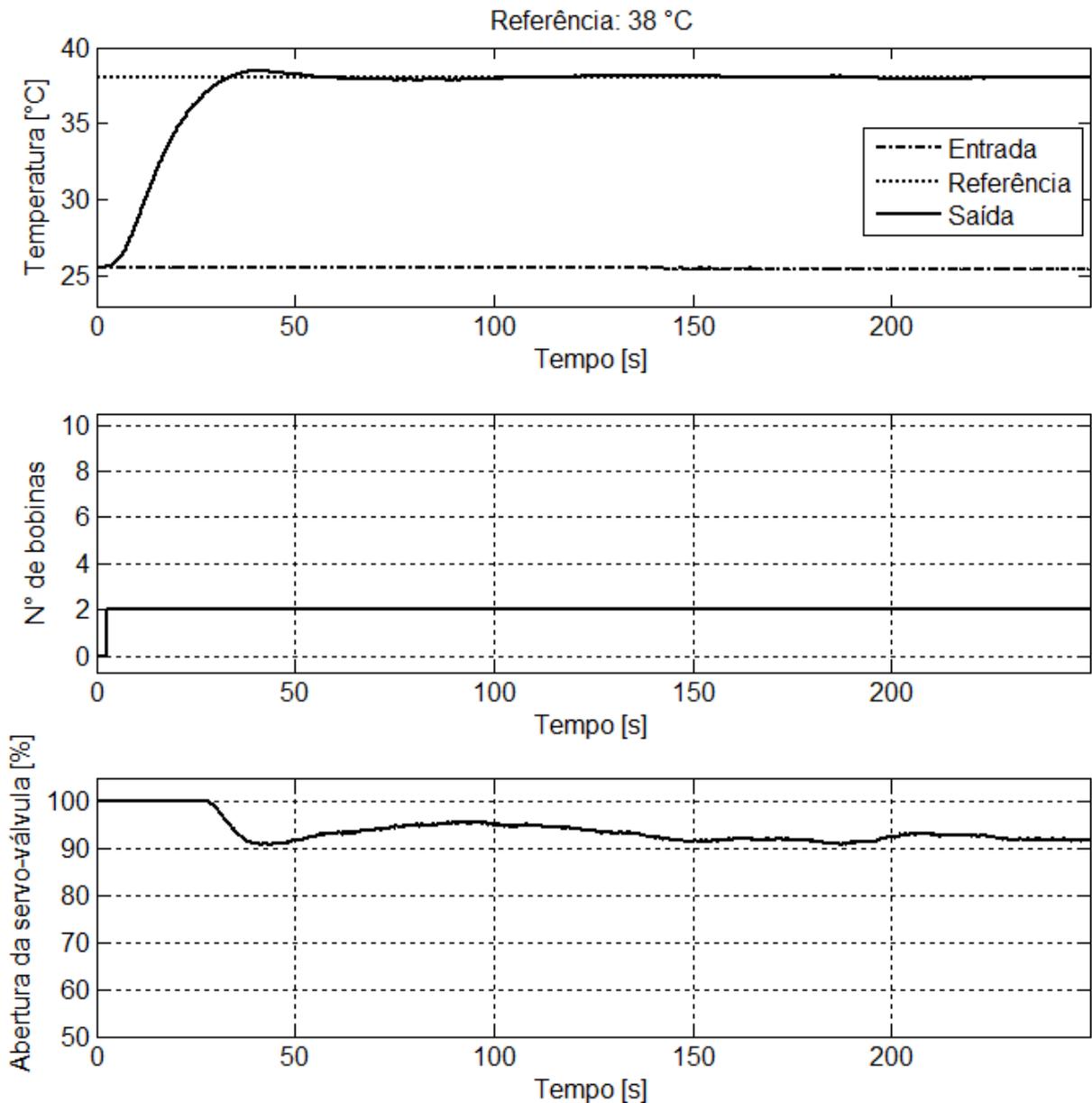


Figura 6.2: Ensaio realizado para temperatura de referência de 38 °C

Na Figura 6.3 é apresentada uma situação em que o controlador de regime transiente entra na faixa de temperatura em que ocorre a transição para o controlador de regime permanente, porém, com apenas uma bobina ligada o sistema não ultrapassa a temperatura de referência. Assim, com a saturação do integrador no controlador de regime permanente, o sistema incrementa em uma unidade o número de bobinas ligadas e reinicia o processo de controle. O máximo sobrepasso medido foi de $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ e a amplitude das flutuações em regime permanente não ultrapassa $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$.

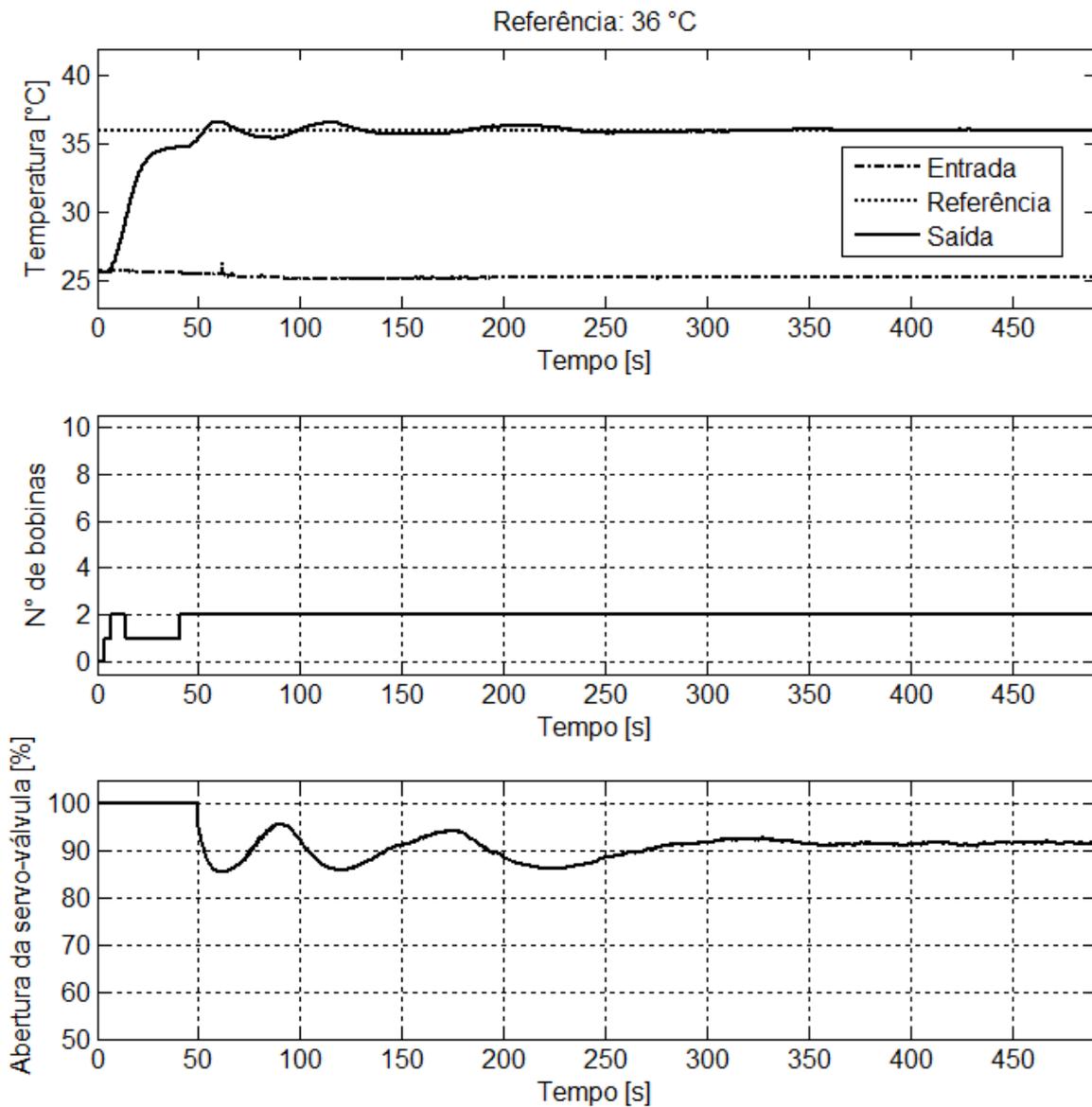


Figura 6.3: Ensaio com saturação do integrador do controlador da servo-válvula

Na Figura 6.4 é apresentado outro ensaio para a referência de 36 °C, porém neste caso, a temperatura de entrada é de aproximadamente 0,8 °C maior do que a do caso apresentado na Figura 6.3. Esta diferença reduz a potência necessária para aquecer a água até a temperatura de referência. Assim, o acionamento de apenas uma bobina é suficiente para superar a temperatura de referência, não sendo, portanto, necessário acender mais um queimador, diferentemente do que ocorreu no ensaio correspondente à Figura 6.2.

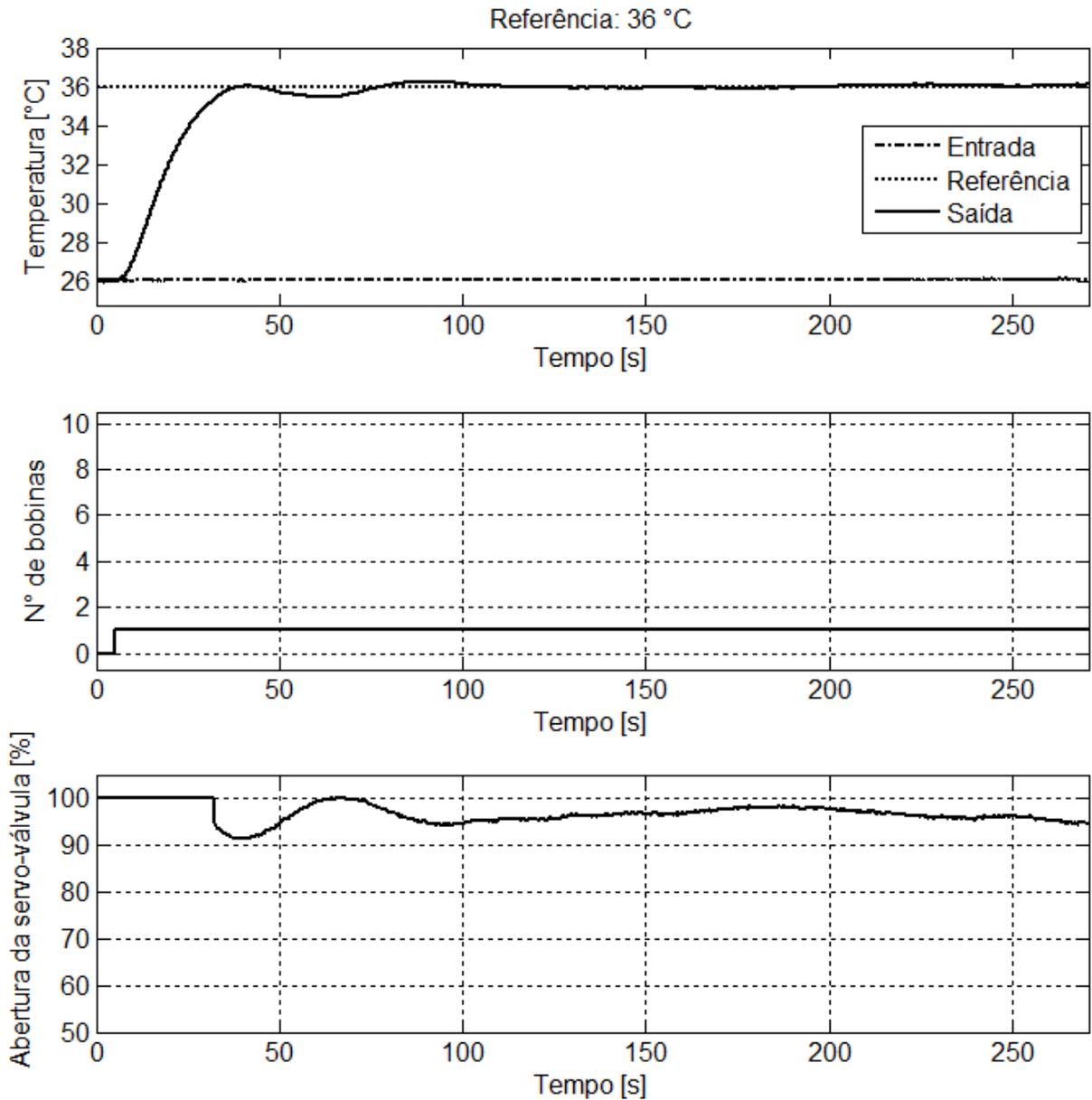


Figura 6.4: Ensaio realizado para referência de 36 °C, sem saturação do integrador

Na Figura 6.5 é apresentada a resposta do sistema para variações da referência, cujos valores estão destacados no gráfico. Verifica-se que nas transições, a resposta apresenta oscilações de amplitude decrescente e que, apesar da ocorrência destas, a temperatura de saída converge para próximo do valor de referência. Este fenômeno deverá ser motivo de investigações em trabalhos futuros. O máximo sobrepasso medido foi $0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ para os valores de referência de 37 e $45\text{ }^{\circ}\text{C}$. A maior flutuação da temperatura medida na saída ocorre no seguimento da referência de $37\text{ }^{\circ}\text{C}$, nas demais, elas não ultrapassaram $0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$, exceto quando ocorre uma perturbação próxima ao instante 940 s , onde a temperatura divergiu em $0,6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

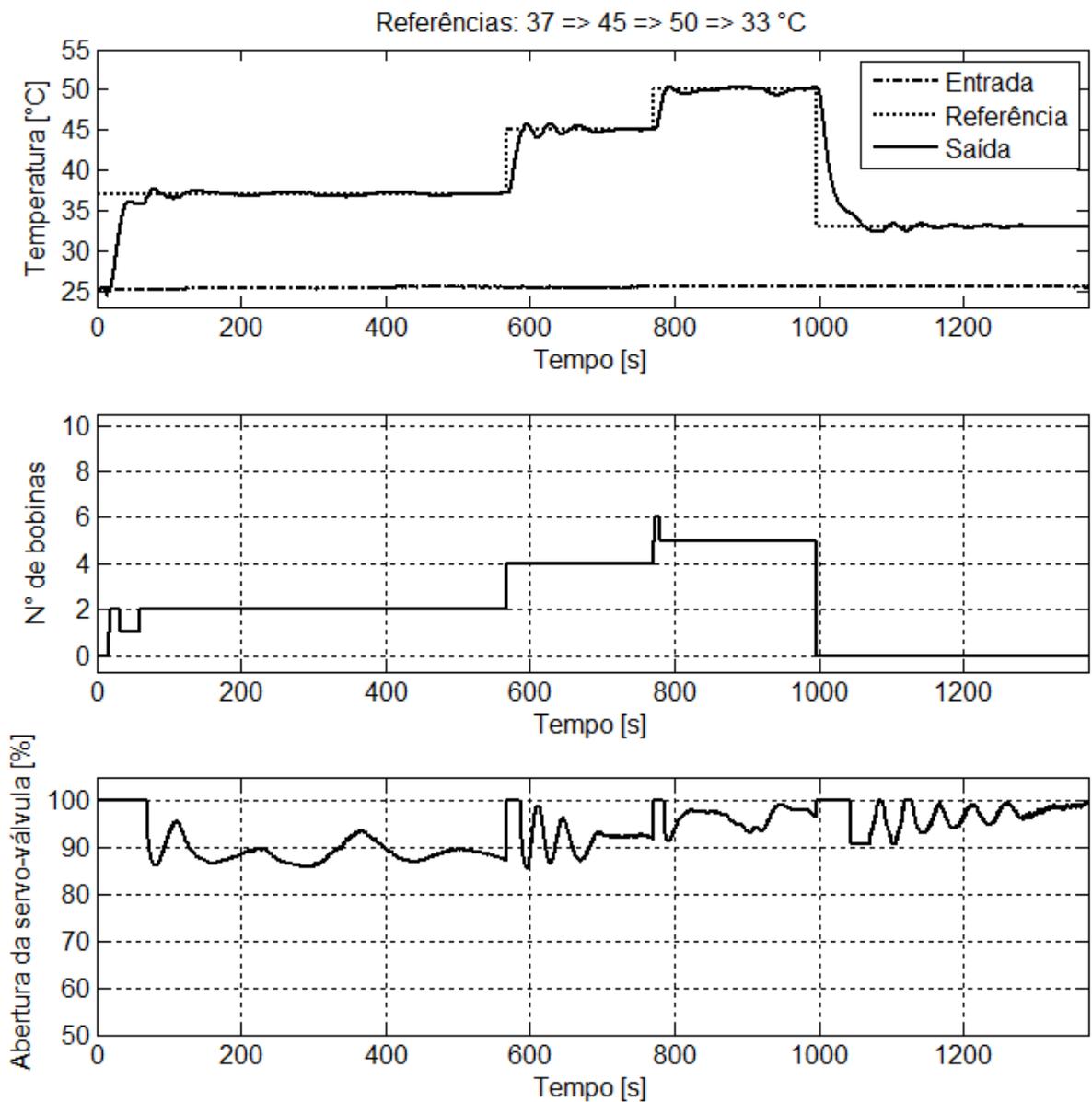


Figura 6.5: Ensaio realizado com variação na temperatura de referência

Na Figura 6.6 é apresentada a situação na qual a pressão de suprimento de gás diminui devido ao esgotamento da carga do botijão. Percebe-se que, ao diminuir a vazão de gás, o controlador procura compensar a queda de temperatura por meio da abertura de mais queimadores. É interessante destacar que, até o instante $t \approx 1100$ s, a pressão fornecida pelo do botijão permanece estável, devido às características do GLP (enquanto há GLP no estado líquido dentro do botijão, a pressão permanece próxima de 70 kPa).

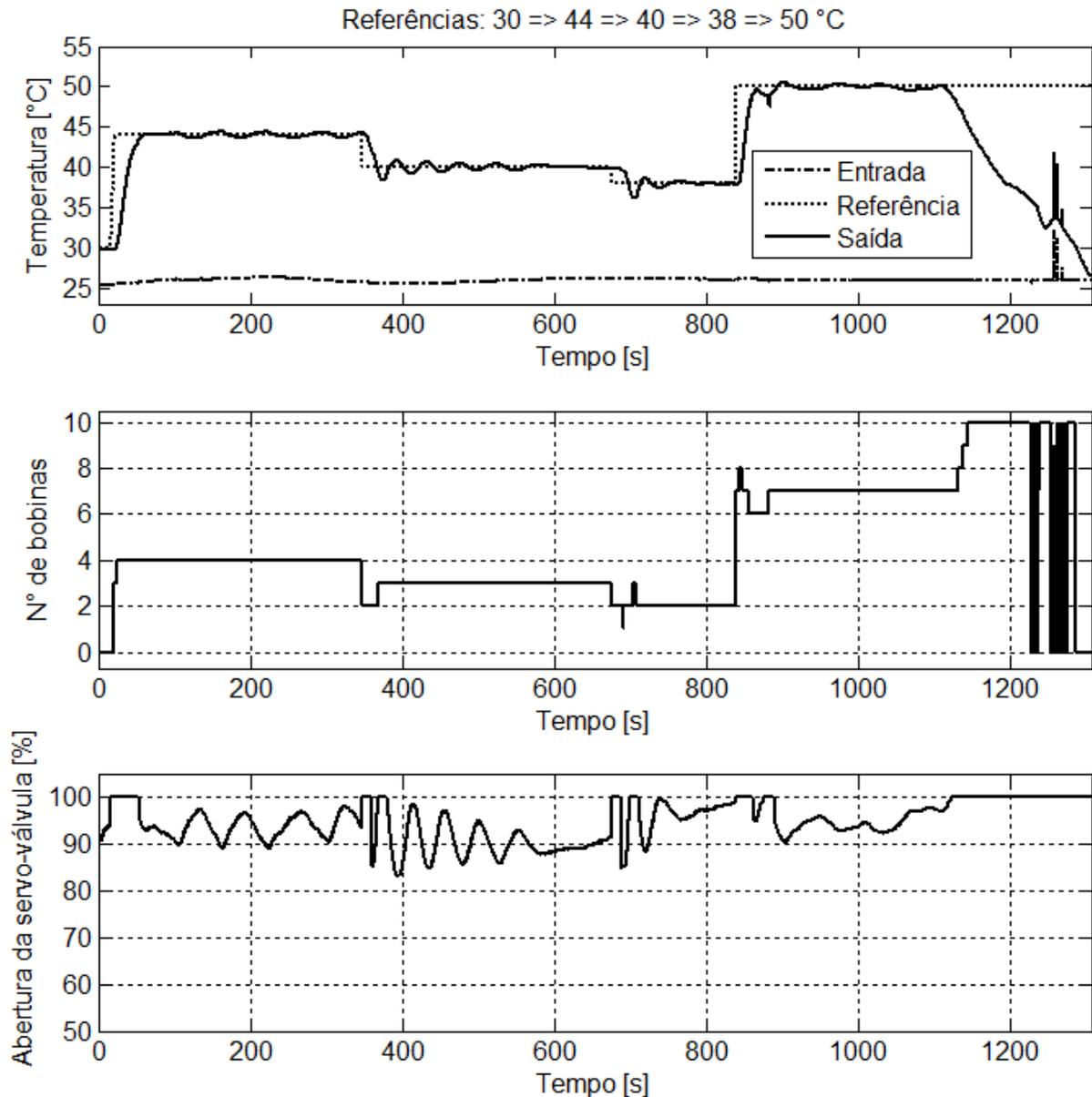


Figura 6.6: Ensaio realizado para diferentes referências e falta de gás

Ao final do ensaio, ocorre um chaveamento do número de bobinas, decorrente de uma situação anômala, onde as chamas, quase extintas, fazem com que o sensor de detecção de chamas opere em seu limite, gerando sinais que variam rapidamente entre os estados ‘aceso’ e ‘apagado’. Esta situação foi interpretada como um processo de ignição da chama, o qual deve

partir de 2 queimadores (ou 0 bobinas) e rapidamente, pelos cálculos do controlador, foram acionados todos os queimadores na tentativa de se elevar a temperatura a fim de seguir a referência.

Na Figura 6.7 é apresentada a resposta para uma temperatura desejada de 43 °C. Neste caso o incremento de temperatura fornecido por meio do acendimento de três bobinas foi muito próximo ao necessário para regular adequadamente a temperatura. Assim, a ação de controle de regime permanente é praticamente nula.

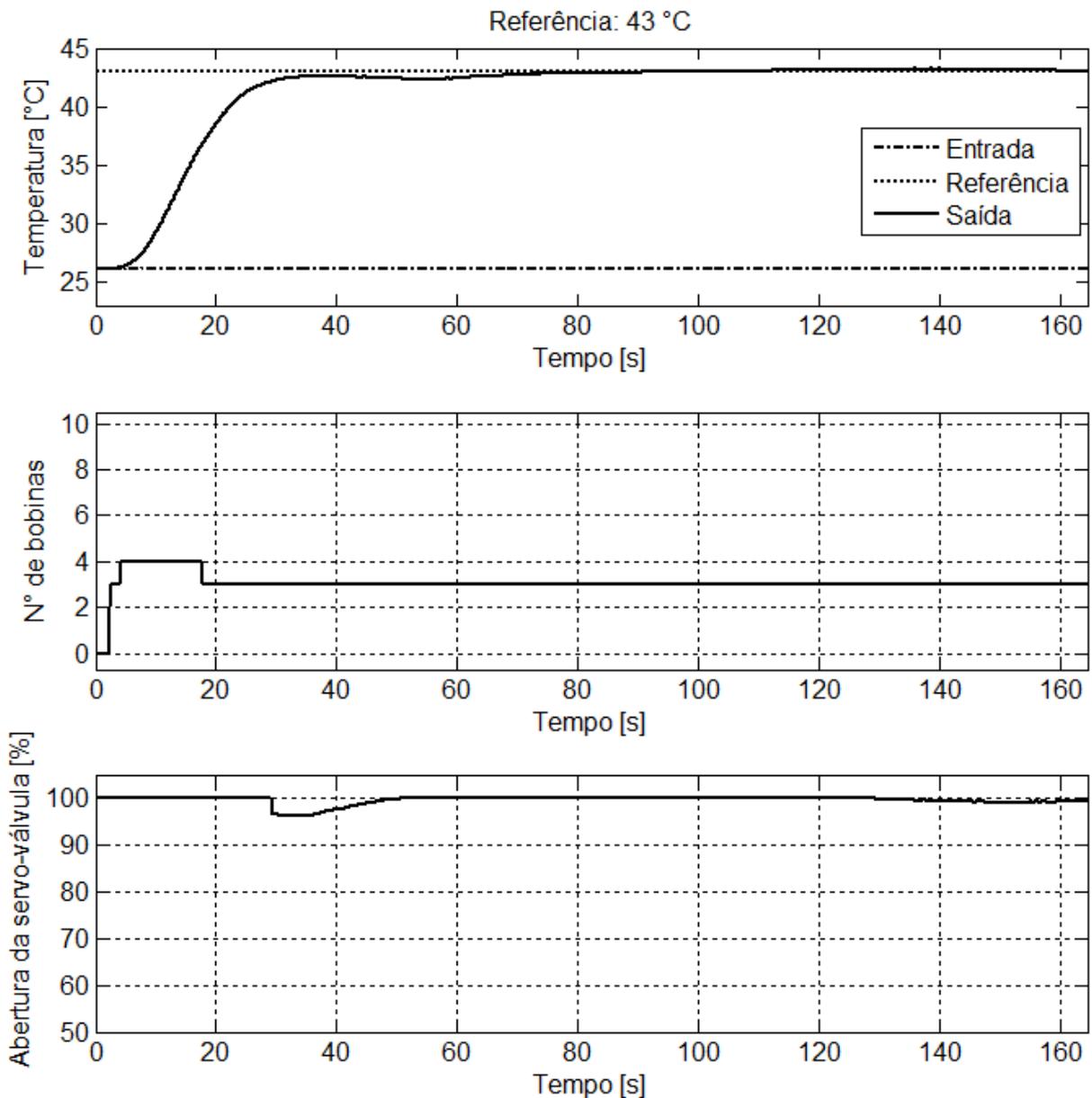


Figura 6.7: Ensaio realizado para temperatura de referência de 43 °C

Na Figura 6.8 é apresentado um caso onde ocorre, ao longo da operação, uma queda na temperatura de entrada (de 0,5 °C). No instante $t = 27$ s o controlador de regime permanente passa a atuar, porém a quantidade de queimadores calculada pelo controlador de regime transiente é insuficiente para atingir a referência, ocorrendo o incremento automático de um queimador no instante $t = 44$ s e o controle é reinicializado. Posteriormente, com um queimador aceso a mais, o controle de regime permanente regula a temperatura de saída, fazendo com que a mesma convirja para o valor de referência.

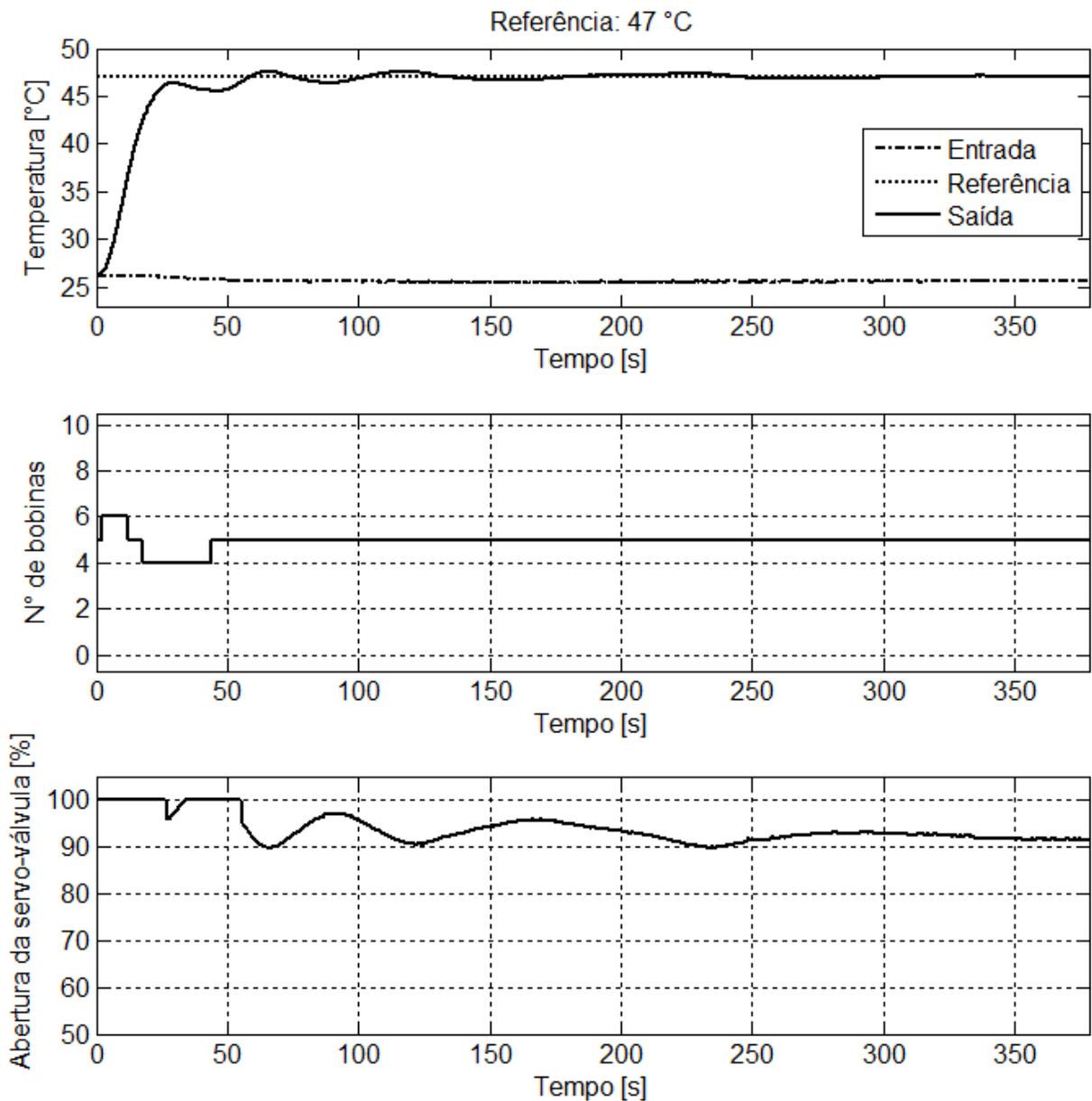


Figura 6.8: Ensaio realizado para temperatura de referência de 47 °C

Na Figura 6.9 são apresentados os resultados do ensaio realizado para uma temperatura de referência de 55 °C. A temperatura de saída oscilou com amplitude de até 0,1 °C em regime permanente.

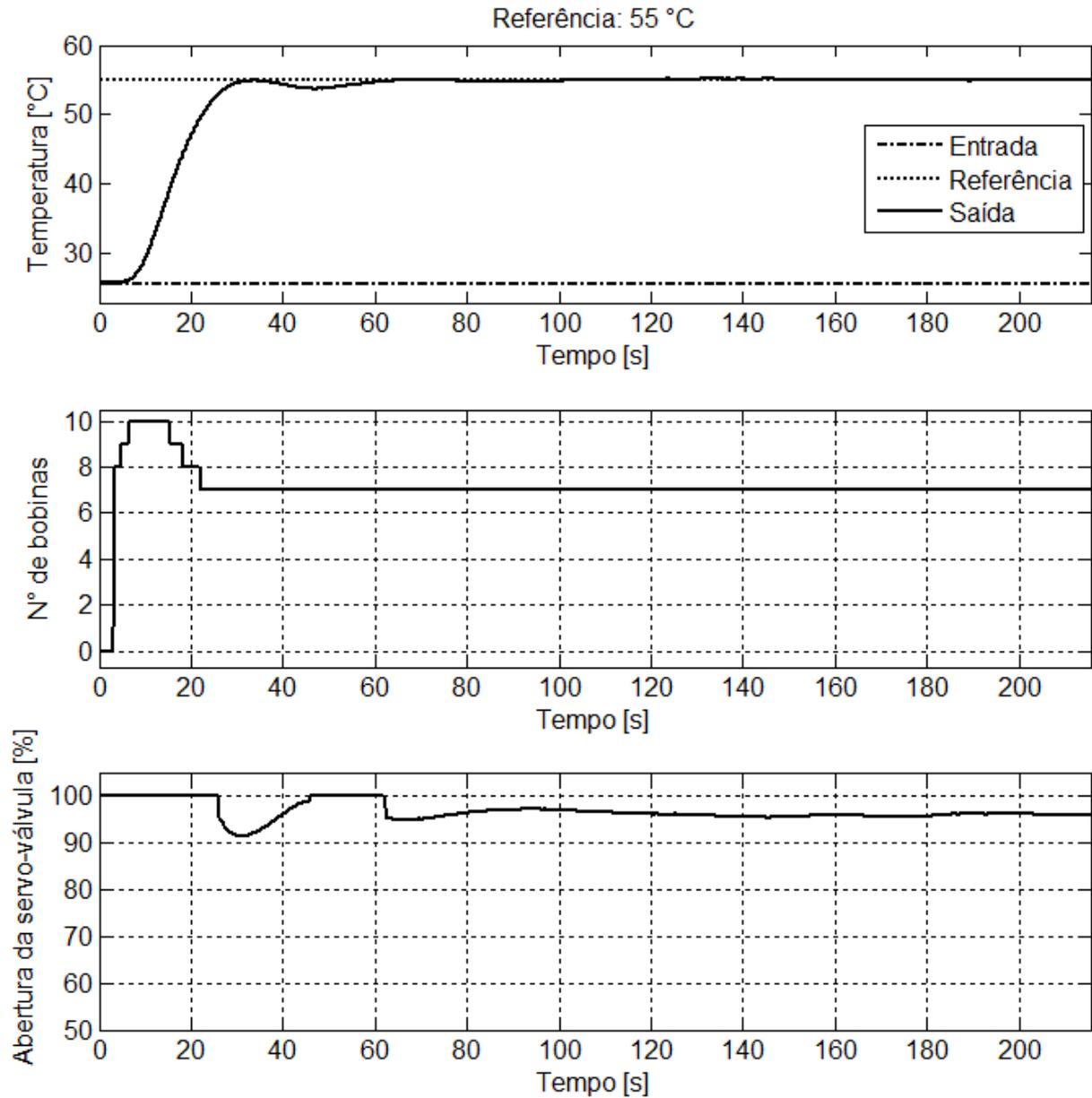


Figura 6.9: Ensaio realizado para uma temperatura de referência de 55 °C

A Figura 6.10 apresenta uma comparação entre os resultados de ensaios realizados com o controlador combinado e o controlador de regime transiente atuando individualmente durante todo o processo, com a servo-válvula na situação totalmente aberta. Verifica-se que a temperatura de saída oscila em até $0,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ para o controlador proposto e o dobro, $0,2\text{ }^{\circ}\text{C}$, utilizando apenas o controlador de regime transiente (sem ação da servo-válvula).

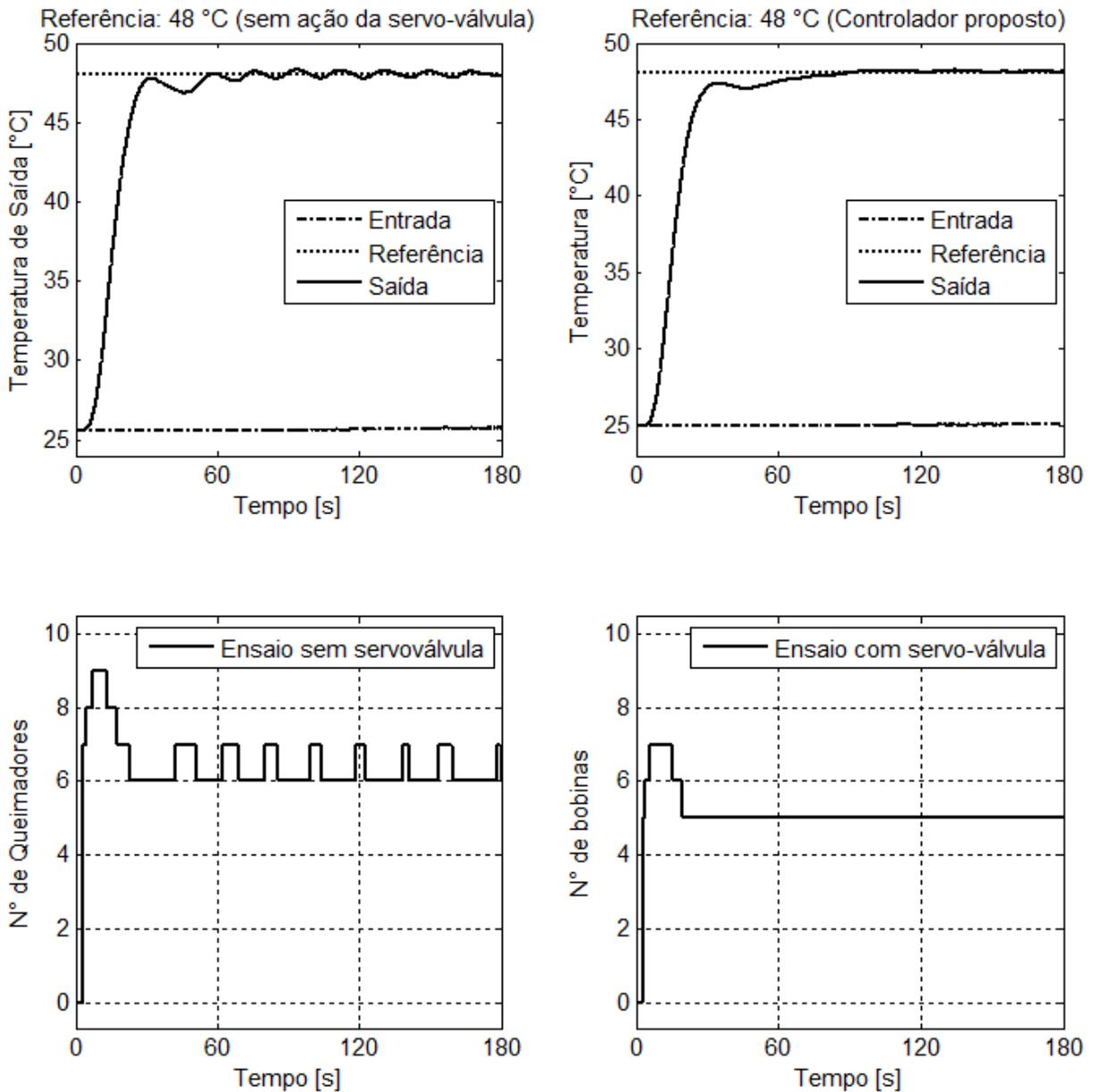


Figura 6.10: Comparação dos resultados entre o controlador proposto e um PI ($T_{ref} = 48\text{ }^{\circ}\text{C}$)

7 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados obtidos no decorrer do presente trabalho permitem afirmar que os objetivos propostos no Capítulo 1 foram cumpridos a contento. O aquecedor da bancada foi capaz de elevar a temperatura de saída da água, fazendo-a convergir para uma temperatura de referência, apresentando, na maioria dos casos, um comportamento em regime estável e com oscilações de temperatura, cujas amplitudes não ultrapassaram 0,2 °C. Foram comparados os resultados do controlador combinado (PI de regime transitório, associado ao controle da chama modulante + PI de regime permanente, associado ao controle da servo-válvula de vazão de gás) com os fornecidos pelo controlador PI de regime transitório (sem, portanto, o controle de regime permanente). Ambos os controladores apresentaram bons resultados, com erro de regime permanente relativamente pequenos (até 0,5 °C). O uso da servo-válvula no controle da temperatura do aquecedor resultou em melhores respostas em regime permanente e eliminou a ocorrência do chaveamento das válvulas de controle da chama modulante. A implantação do controlador proposto é relativamente simples, pois consiste na combinação de dois controladores do tipo PI, uma das estratégias mais utilizadas em sistemas de controle, onde foram estabelecidas algumas regras e condições para que operem alternadamente.

O modelo utilizado para representar o aquecedor de passagem é relativamente simples, desconsiderando a influência da variação da vazão de água, relacionada com o atraso de transporte. Também não foi considerada a influência da variação das temperaturas da água na entrada do aquecedor e ambiente, que alteram a resposta dinâmica do trocador de calor. No caso deste trabalho, os ensaios para determinar o incremento de temperatura, ou a potência transmitida para a água, correspondente ao número queimadores, foram realizados durante o inverno, em que a temperatura de entrada da água apresentava uma temperatura média de 15 °C, enquanto os resultados apresentados no Capítulo 6 foram obtidos no verão, com temperaturas de entrada variando em torno de 26 °C. Como consequência, o cálculo da potência transmitida para a água resultou em valores superiores (até 10 °C) aos medidos no sensor de temperatura na saída, fazendo com que o sinal de predição, que realimenta o sistema, ativasse o controlador de regime permanente precocemente.

O uso da placa de controle da dSPACE e do programa Simulink facilitou o processo de desenvolvimento e implantação dos algoritmos, uma vez que o Simulink é uma ferramenta própria para desenvolvimento, modelagem e simulação de sistemas dinâmicos enquanto a placa da dSPACE possui uma interface com recursos suficientes para cobrir as necessidades na questão da transmissão de sinais entre a bancada e o computador. Apesar do sistema de

controle ter sido desenvolvido com esses recursos, ele pode ser facilmente adaptado para uma placa de circuito impresso mais simples, dotada de um microcontrolador.

Com relação a aspectos econômicos, o sistema de controle proposto pode ser considerado um pouco mais dispendioso, uma vez que é necessária a utilização de um dispositivo a mais, no caso a servo-válvula. Também é necessário que o microcontrolador (ou um circuito externo) seja capaz de gerar um sinal PWM, necessário para o acionamento do servo-motor que compõe a servo-válvula. Por outro lado, a eliminação do chaveamento das válvulas de controle em regime permanente deverá aumentar a vida útil destes componentes, diminuindo os custos de reparos e manutenção, aumentando também a disponibilidade do produto. Evidentemente, este efeito benéfico, pode diminuir, em parte, se o servo-motor da servo-válvula (ou ela própria), apresentar problemas ao longo da vida útil do sistema. Outro aspecto envolvido refere-se à eficiência energética do sistema. Como as chamas, no caso do controle combinado, diminuem com relação ao caso em que a vazão é máxima, espera-se uma diminuição da eficiência por conta dos efeitos geométricos, conforme discutido em Perondi et al., 2008a. Por outro lado, como, com o uso do controlador combinado não ocorre chaveamento das válvulas da chama modulante em regime permanente e espera-se que, por conta deste efeito, a eficiência energética aumente, pois ocorre menor perda de gás não utilizado na combustão para a atmosfera. Assim, um estudo específico sobre a eficiência dessa nova técnica de controle deverá ser realizada futuramente. Quanto às emissões, sabe-se que a geração de hidrocarbonetos (HC) pode ser praticamente eliminada se o sistema de queima operar continuamente, sem o processo de ligar e desligar que ocorre com o uso do controlador transiente [Leston, 2007]. Além disso, também Leston, 2007, mostra que a geração de CO, com o uso de um sistema de queima contínua, diminui cerca de 60 % com relação ao sistema que opera ligando e desligando para executar a ação de controle. Assim, para averiguar o impacto ambiental favorável do uso do controlador combinado, será também foco de trabalhos futuros a avaliação do impacto desse controlador nas emissões de gases poluentes.

7.1 Sugestões para Trabalhos Futuros

- Realizar estudos que avaliem a eficiência no trocador de calor para diferentes combinações de distribuição dos queimadores acesos;
- Realizar estudos comparativos de emissão de poluentes e eficiência do aquecedor, para os sistemas, com e sem, a servo-válvula;

- Realizar estudos sobre a influência das temperaturas ambiente e da água na entrada do aquecedor, aprimorando a modelagem matemática do processo;
- Implantar um sistema de exaustão forçada para aumentar a eficiência de combustão dos gases;
- Instalar um sensor para medir a vazão de água e estudar os efeitos de sua variação, bem como desenvolver e implantar estratégias de controle para compensá-los;
- Adaptar o sistema de controle para atender instalações hidráulicas com mais de um ponto de adução de água, por exemplo, torneira e chuveiro;
- Desenvolver um circuito microcontrolado para substituir a placa da dSPACE no controle da bancada;
- Realizar estudos detalhados sobre parâmetros do controlador proposto e dos componentes da bancada, a fim de aprimorar seu desempenho;
- Utilizar controladores adaptativos, com lógica difusa ou com redes neurais, comparando com o controlador proposto;
- Estudar a viabilidade e eficiência energética da instalação de servo-válvulas em cada queimador, ou instalar a servo-válvula em somente um ou poucos queimadores.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astrom, K. J.; Wittenmark, B. **Adaptive Control**, 2 ed. , [S. l.], Addison Wesley Longman, 1995. ISBN: 0-201-55866-1.
- Balbinot, A.; Brusamarello, V. J. **Instrumentação e Fundamentos de Medidas Vol. 1**. 2.ed., [S. l.] LTC 2010, ISBN 8521617542
- Bazanella, A. S.; Silva Jr, J. M. G. **Sistemas de Controle - princípios e métodos de projeto**. 1.ed. Porto Alegre, Editora da UFRGS, 2005. ISBN: 8570258496.
- Burch, J. et al. **Preliminary Modeling, Testing and Analysis of a Gas Tankless Water Heater** In: SOLAR, San Diego, Califórnia, mai, 2008. Disponível em <<http://www.nrel.gov/docs/fy08osti/42917.pdf>>. Acesso em 2013.
- Claquin, S.; Carriere, A.; Rocaries, F. **Modelling and Application of Adaptive Control to a Gas Heater**. Laboratoire d'Automatique et de Productique, In:Third IEEE International Conference on Control and Applications, [S. l.], v. 2, p. 927-932, ago. 1994. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=381185>>. Acesso em 2013.
- Gutterres, L. M. **Controlador de Aquecedor de Passagem com Chama Discreta**. Porto Alegre, 2011.
- Henz, M. E. **Controle de Temperatura com Compensação de Tempo Morto em Aquecedores de Água Baseados em Chama Modulante**. Porto Alegre, 2013
- Leith, D. J. Leith; Leithead, W. E. **Survey of Gain-Scheduling Analysis and Design**. International Journal of Control, vol. 73, n. 11, p. 1001–1025, 2000. Disponível em: <http://eprints.nuim.ie/1834/1/1001965764_link_19992.pdf>. Acesso em 2013.
- Leston, L. A. **Diminuição das Emissões de Poluentes Através do Controle de Combustão em Malha Fechada de Fornos A Gás**, Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- Marques, M. N. **Aquecedores de Água Tipos, Características e Projeto Básico**. Vitória, 2006.
- 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, mai. 1983. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4180110>>. Acesso em 2013.
- Neto, J. M. **Controle Simultâneo de Temperatura e Estequiometria Aplicado em um Secador Vertical de Revestimentos Cerâmicos Alimentado com Gás Natural**. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

Oliveira, E. F. **Estágio Supervisionado III - Sistema de Controle Automático para Aquecedores de Passagem a Gás Natural**. Porto Alegre, 2007.

Perondi, E.A. et al. **Análise de Desempenho de um Novo Sistema de Controle de Temperatura de Aquecedores de Passagem Baseado em Chama Modulante**. In: V Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, Bahia, ago. 2008a, Salvador.

Perondi, E.A. et al. **Desenvolvimento de um Novo Sistema de Controle de Temperatura de Aquecedores de Passagem Baseado em Chama Modulante**. In: V Congresso Nacional De Engenharia Mecânica, Bahia, ago. 2008b, Salvador.

Perondi, E.A. **Introdução ao Controle de Sistemas Mecânicos**. 3.ed., Porto Alegre, 2010.

Perondi, E.A. **Projeto Controlgas Relatório Técnico Final Finep/RBT/FAURGS/UFRGS/Geralcoop**. 2008c, Porto Alegre.

Roehe, M. R. **Desenvolvimento de um Sistema Digital de Controle de Temperatura para Aparelho de Banho-Maria Laboratorial**. Porto Alegre, 2011.

Silva, D. S. **Identificação de Funções de Transferência Utilizando como Entrada um Degrau**. Dissertação (Mestrado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, São Paulo, 2008.

Smith, O. J. M. **Closed Control of Loops with Dead-time**. Chemical Engineering Progress, 53, 217-219, 1957.

Torrico, B. C. **Contribuições ao Controle Preditivo Robusto de Sistemas com Atraso**. Tese (Doutorado em engenharia) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2007.

Vieira, J.; Mota, A. **Passing from a Gas to an Electric Water Heater System: Adaptive PID Versus Smith Predictive Control**. In: 11th International Conference on Intelligent Engineering Systems, Budapeste, p. 201-206, jul. 2007. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=4283698>>. Acesso em 2013.

Vieira, J.; Mota, A. **Smith Predictor Based Neural Fuzzy Controller Applied in a Water Gas Heater that Presents a Large Time-Delay and Load Disturbances**. In: IEEE Conference on Control Applications, [S. l.], v. 1, p. 362-367, jun. 2003. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1223412>>. Acesso em 2013.

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.], nov. 2005. Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=1587736>>. Acesso em 2013.

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, abr. 2011, Disponível em: <<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=5778171>>. Acesso em 2013.

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.

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, out. 1997. Disponível em:

<<http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=672803>>. Acesso em 2013.

APÊNDICE A – Características do conjunto de solenoides

As figuras abaixo ilustram o aspecto construtivo do conjunto de solenoides usado para controlar o acendimento individual de cada queimador. A Figura A.1 mostra a vista em corte do manifold com os solenoides instalados. A Figura A.2 mostra o protótipo dos componentes instalados na bancada.

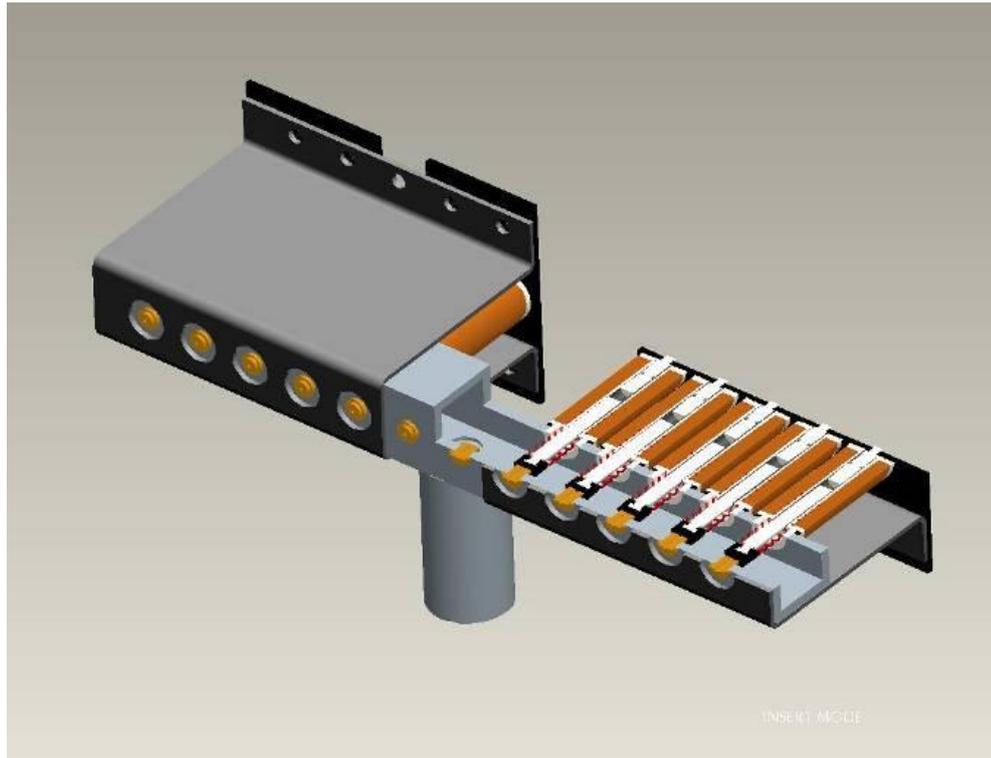


Figura A.1: Vista em corte do conjunto de solenoides instalados no manifold



Figura A.2: Protótipo: Manifold e solenoide

O fluxograma da Figura A.3 mostra a sub-rotina da Seção 3.1, onde ‘Nº desejado’ e ‘Nº Atual’ são as variáveis de entrada e de saída, respectivamente.

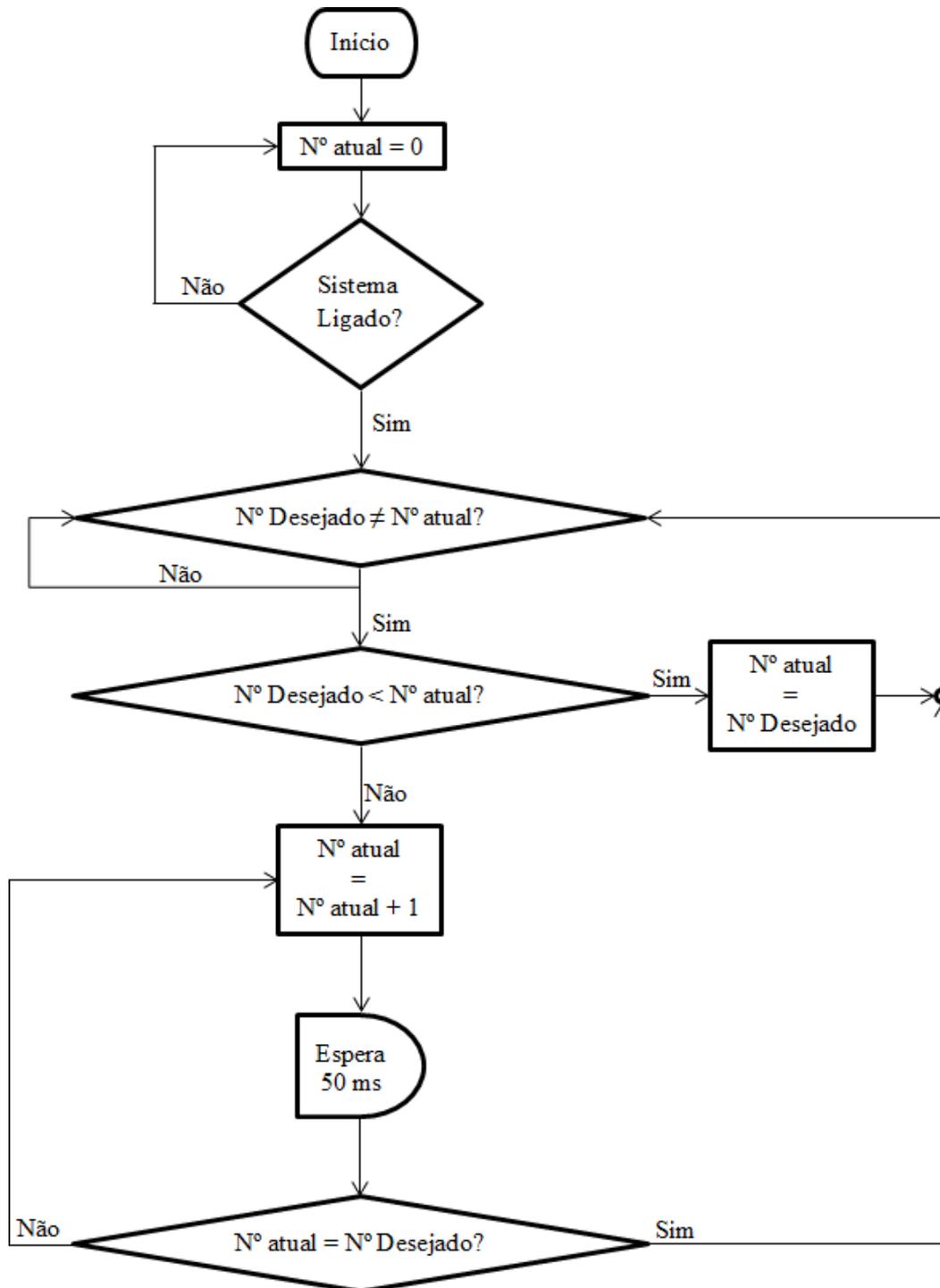


Figura A.3: Fluxograma: algoritmo para acionamento das válvulas solenoides

APÊNDICE B – Modelo da servo-válvula

Modelo da Servo-válvula:

A primeira coluna da tabela abaixo representa o número de queimadores acionados. A segunda coluna contém uma função polinomial que aproxima as curvas de comportamento da servo-válvula de acordo com o número de queimadores acesos. O valor de x é a posição em “*duty-cycle*” do motor e a soma de todos os termos do polinômio resulta na abertura da válvula. O resultado cujo valor é “1” significa que a válvula está totalmente aberta (maior vazão de gás) e o valor “0,75” significa que a potência calorífica transmitida para a água é de 75 % da potência que seria transmitida com a válvula totalmente aberta. Na terceira coluna, x é a abertura da válvula e a soma dos termos resulta na posição do motor em *duty-cycle*.

Tabela B.1: Funções polinomiais que representam as respostas da servo-válvula

Nº Queimadores	Polinômio direto: Posição → Abertura	Polinômio inverso: Abertura → Posição
2	$-93867x^3 + 21633x^2 - 1661x + 44$	$-16,97x^3 + 47,5x^2 - 44,36x + 13,9$
3	$-99214x^3 + 22397x^2 - 1684x + 43$	$-4,06x^3 + 10,9x^2 - 9,79x + 3,02$
4	$-38792x^3 + 8085x^2 - 561x + 14$	$-2,52x^3 + 6,34x^2 - 5,32x + 1,58$
5	$-22964x^3 + 4365x^2 - 275x + 7$	$-1,88x^3 + 4,48x^2 - 3,55x + 1,03$
6	$-16767x^3 + 3095x^2 - 190x + 5$	$-3,89x^3 + 9,51x^2 - 7,74x + 2,18$
7	$-13838x^3 + 2524x^2 - 153x + 4$	$-2,96x^3 + 7,31x^2 - 6,02x + 1,74$
8	$-9768x^3 + 1714x^2 - 100x + 3$	$-4,91x^3 + 12,38x^2 - 10,42x + 3,01$
9	$-8078x^3 + 1365x^2 - 78x + 3$	$-4,27x^3 + 10,55x^2 - 8,70x + 2,48$
10	$-6196x^3 + 964x^2 - 50x + 2$	$-0,26x^3 + 0,53x^2 - 0,40x + 0,2$
11	$-5072x^3 + 702x^2 - 32x + 2$	$-0,15x^3 + 0,26x^2 - 0,20x + 0,14$
12	$-4606x^3 + 558x^2 - 21x + 1$	$-0,08x^3 + 0,12x^2 - 0,09x + 0,12$

APÊNDICE C – Descrição do centelhador e dos sensores de chama e de temperatura

Centelhador:

Quando um sinal de tensão polariza o transistor NPN, uma onda é produzida no auto-oscilador, formado pelos transistores e o transformador pequeno. O sinal oscilante carrega o capacitor na saída em um semiciclo e, no outro, dispara o tiristor, que o descarrega no transformador da saída. Este transformador é revestido com resina para evitar descargas na própria placa, o enrolamento secundário está conectado à ponteira de descarga que está instalada sobre um dos queimadores.

A foto abaixo mostra a placa do centelhador utilizado no projeto Controlgás. O diagrama do circuito elétrico está mostrado na Figura C.2.

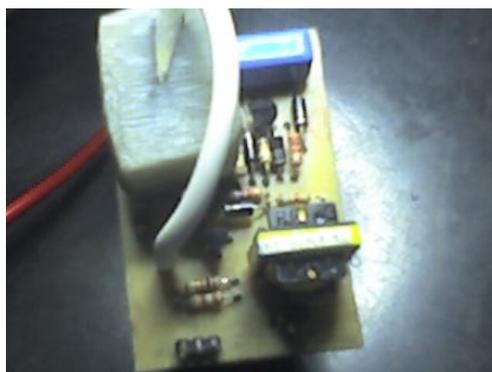


Figura C.1: Fotografia do centelhador

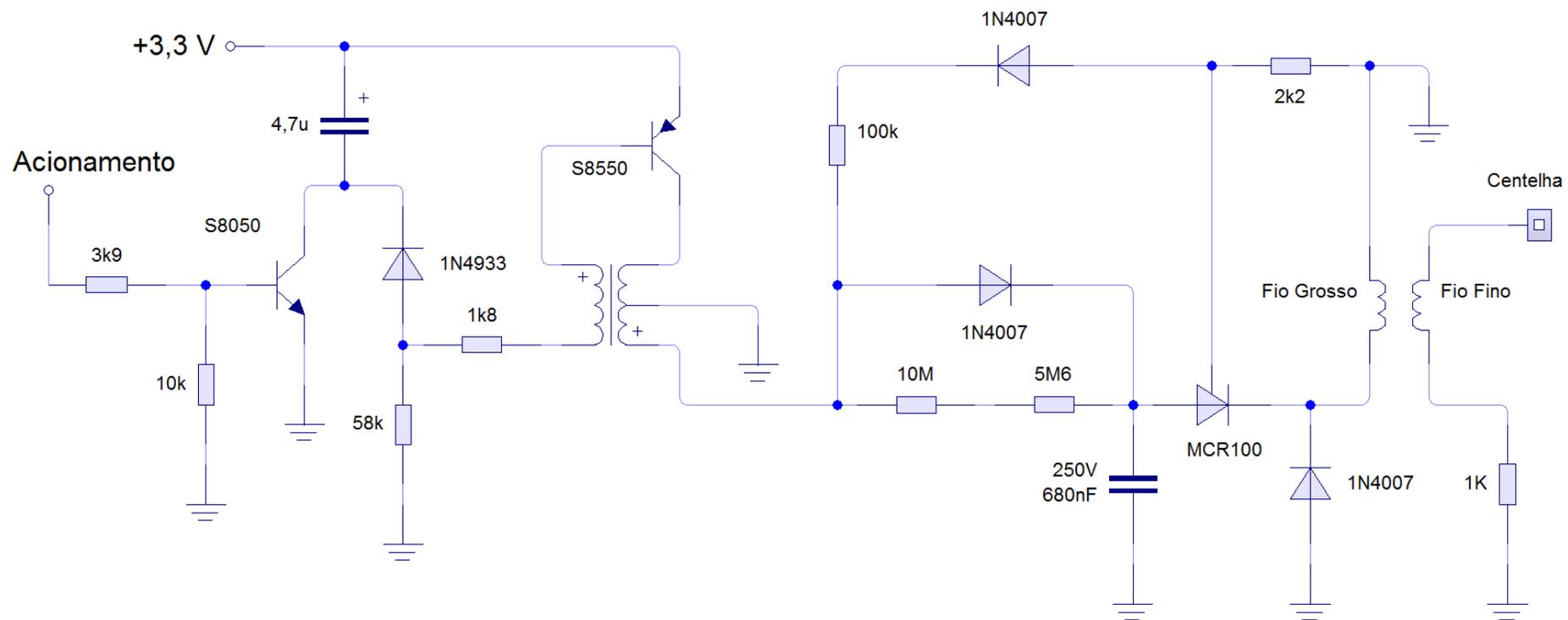


Figura C.2: Circuito elétrico do Centelhador

Sensor de chama:

O sensor que detecta a presença de chama possui uma ponteira energizada instalada sobre um queimador. Quando o fogo é aceso ele passa a conduzir corrente para o chassi, comportando-se como um resistor. A tensão na ponteira, anteriormente de 5 V, assume um valor próximo a zero devido ao elevado valor do resistor $R1 = 8,2 \text{ M}\Omega$, que age como um divisor de tensão

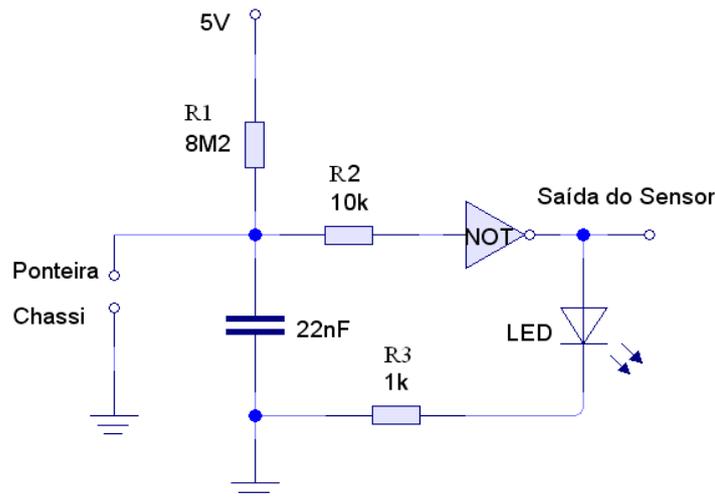


Figura C.3: Diagrama esquemático do circuito do sensor de chama

O inversor lógico do circuito (modelo 74LS04) não apenas faz com que o sinal de saída tenha nível alto, mas também fixa valores em 0 V ou 5 V em sua saída, que não se pode garantir apenas com o uso dos resistores, pois o fogo apresenta resistência oscilante. O inversor fornece níveis de tensão adequados para a leitura do sinal em microprocessadores e os desacopla a parte analógica.

Sensor de temperatura:

O diagrama esquemático do sensor de temperatura está mostrado abaixo:

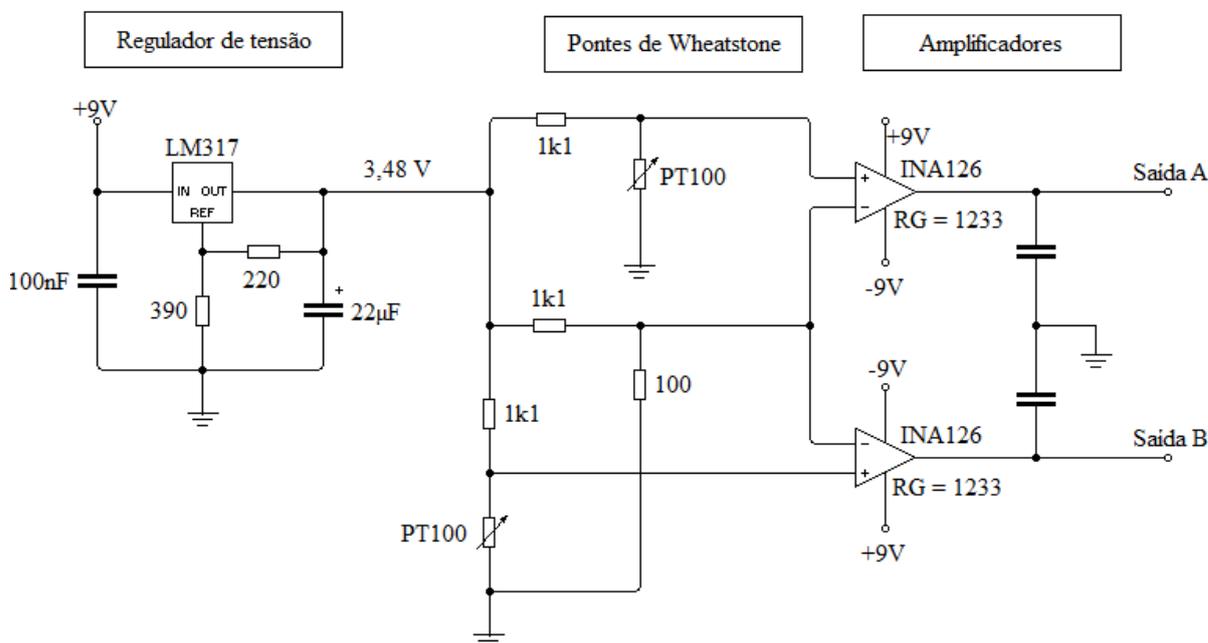


Figura C.4: Circuito elétrico do sensor de temperatura

O regulador de tensão fornece uma diferença de potencial elétrico fixa que serve como referência para as pontes de Wheatstone. A tensão de referência é de 3,48 V, medida no canal AD da dSPACE. As pontes de Wheatstone são circuitos comumente usados em instrumentação [Balbinot, 2010] quando se quer medir pequenas variações de resistência elétrica de componentes, tais como sensores resistivos.

A potência máxima recomendada pela norma DIN-IEC 751/85 para evitar o auto aquecimento do Pt-100 é de 1 mW, que para um resistor de 100 Ω resulta em uma corrente máxima de 3 mA. Portanto, a escolha do valor dos resistores de 1,1 k Ω foi feita para seguir esta recomendação, baseando-se na diferença de potencial que alimenta os ramos da ponte de Wheatstone, de 3,48 V.

Os amplificadores operacionais INA126 são amplificadores de diferença cujos ganhos dependem do valor do resistor RG, conectados a dois de seus terminais dedicados (Pinos 1 e 8 para a versão com encapsulamento DIP). Os componentes eletrônicos, na maioria das vezes apresentam valores distintos, porém próximos ao nominal.

Levando em consideração esta variação de parâmetros entre componentes, os circuitos de amplificação foram testados com a aplicação de um sinal tipo rampa de tensão, simulando a variação do Pt-100 dentro da faixa de operação. Os sinais de teste foram gerados pelo conversor digital-analógico (DA) e medidos no conversor analógico-digital (AD), ambos da

dSPACE. Assim, foram determinados os ganhos dos canais A e B iguais a $G_A = 68,28$ e $G_B = 70,65$.

Utilizando um termômetro de mercúrio foram levantadas as curvas de resposta de ambos os sensores imersos em água, cuja temperatura variou lentamente. As equações encontradas com aproximação por mínimos quadrados foram as seguintes:

Canal A (Temperatura na saída do aquecedor):

$$T_{saída} = 145,86 V_{AD} - 3,80 \quad (C.1)$$

Canal B (Temperatura na entrada do aquecedor):

$$T_{entrada} = 138,96 V_{AD} - 2,22 \quad (C.2)$$