**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Desenvolvimento de trocador de calor de contato direto equipado com
sistema microcontrolado para tratamento térmico de mosto na indústria
sucroenergética**

Douglas Lucas dos Reis

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre
em Ciências. Área de concentração: Engenharia de
Sistemas Agrícolas

**Piracicaba
2018**

Douglas Lucas dos Reis
Engenheiro de Controle e Automação

Desenvolvimento de trocador de calor de contato direto equipado com sistema microcontrolado para tratamento térmico de mosto na indústria sucroenergética
versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ ANTÔNIO FRIZZONE**

Dissertação apresentada para obtenção do título de Mestre em Ciências. Área de concentração: Engenharia de Sistemas Agrícolas

Piracicaba
2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA – DIBD/ESALQ/USP

Reis, Douglas Lucas dos

Desenvolvimento de trocador de calor de contato direto equipado com sistema microcontrolado para tratamento térmico de mosto na indústria sucroenergética / Douglas Lucas dos Reis. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011. - - Piracicaba, 2018.

77 p.

Dissertação (Mestrado) - - USP / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz".

1. Controle de processos 2. Instrumentação 3. Câmara de mistura I.
Título

Dedico à minha esposa, Francielly A. Felipetti, pelo apoio, compreensão e incentivo durante os desafios. Dedico também aos “Antonios” que foram responsáveis por abrirem as portas para a vida acadêmica: Antonio P. de Camargo e Antonio S. Baptista.

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” e aos Programas de Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas e Ciência e Tecnologia de Alimentos, pela oportunidade e estrutura disponibilizada para realização do mestrado.

À minha esposa, Francielly Andressa Felipetti, tenho muito a agradecer. Obrigado pelo apoio, compreensão e motivação nos momentos difíceis; à parceria nos momentos de estudo, às infinitas correções de português e, principalmente, agradeço por fazer parte da minha vida e da “nossa” história.

Ao Prof. Dr. Antonio Pires de Camargo, primeiramente, pelo exemplo de humildade, compaixão e força de vontade. Agradeço a todos os ensinamentos, não só os acadêmicos, mas também os da vida. Agradeço por ensinar que nenhum título de doutor te exime de sujar as mãos no trabalho. Agradeço por ter tido compaixão nos meus momentos de dificuldade e também por ser exemplo de força de vontade e dedicação.

Ao Prof. José Antonio Frizzzone, pela oportunidade que me concedeu ao aprovar-me no processo seletivo do mestrado.

À minha amiga Camila Moreira Costa, pela amizade verdadeira e por entender a ausência do Antonio enquanto me ajudava.

Ao meu amigo Eric Alberto da Silva, pela ajuda do início ao fim deste mestrado. Obrigado pelo auxílio em todas as etapas e de todas as formas, seja ela durante as montagens práticas do sistema, explicações teóricas, correções e sugestões. Obrigado também pela hospitalidade em oferecer um teto para dormir e descansar.

Aos meus pais, Inês e Geraldo, agradeço pela vida. Agradeço também pelo esforço em me dar educação e me mostrar os princípios de uma família, que incluem o carinho, amor, compreensão, perdão e gentileza.

Aos meus irmãos, Evandro e Junior, pela parceria em crescermos juntos, pelos desafios superados como irmãos.

À secretaria administrativa de Pós-graduação do Departamento de Engenharia de Biossistemas, especialmente à Davilmar A. D. Colevatti, pela paciência em responder todas as dúvidas referentes ao processo da vida acadêmica e à ajuda no preenchimento dos formulários, relatórios e matrículas.

Ao IFSC – Instituto Federal de Santa Catarina, pelo excelente emprego concedido, do qual tenho orgulho em falar que sou professor.

Ao Prof. Antonio Sampaio Baptista, por abrir as portas. Obrigado por aceitar tomar um café quando nem me conhecia. Pequenas atitudes mudam vidas, você mudou a minha para melhor.

Ao Dante, futuro colega engenheiro. Espero que nossa parceria tenha te rendido muito aprendizado, pois aprendi muito contigo, Sr. Entalpia. Agradeço toda a ajuda no desenvolvimento do trabalho.

Ao Geancarlo Takanori Katsurayama e à Jennifer Oliveira, pela acolhida e pela amizade verdadeira.

Ao Ezequiel Saretta, pela amizade, pelo exemplo de caráter e pelos ensinamentos de eletrônica, mecânica, solda, estatística, irrigação, culinária, etc.

Aos meus colegas da Pós-Graduação em Engenharia de Sistemas Agrícolas (Rogério Lavanholi, Acacio Perboni, Hermes Rocha, Fabricio de Oliveira, Wagner Avila e Luiz Sobenko), por compartilharem seus conhecimentos e um bom tererê.

SUMÁRIO

RESUMO	8
ABSTRACT	9
LISTA DE FIGURAS	10
LISTA DE TABELAS	12
LISTA DE SÍMBOLOS	13
1 INTRODUÇÃO	17
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	19
2.1 Campo de aplicação: Indústria sucroenergética	19
2.2 Esterilização utilizando vapor saturado	21
2.3 Trocadores de calor de contato direto	21
2.4 Fundamentos de termodinâmica	22
2.4.1 Sistemas e volume de controle	23
2.4.2 Princípio da conservação de energia	23
2.4.3 Análises de massa e energia de sistemas abertos	24
2.4.4 Trabalho de escoamento e a energia de um fluido em escoamento	25
2.4.5 Balanço de energia em câmaras de mistura	26
2.4.6 Misturas de líquidos em diferentes temperaturas	27
2.5 Sistemas de controle	27
2.5.1 Sistemas de controle em malha aberta e malha fechada	28
2.5.2 Fundamentos de identificação de sistemas	30
2.5.3 O processo de um projeto de controle	32
2.5.4 Controle PID – Proporcional, Integral e Derivativo	33
3 METODOLOGIA	35
3.1 Generalidades	35
3.2 Etapas do desenvolvimento das bancadas de avaliação	35
3.2.1 Projeto mecânico do sistema de mistura	36
3.2.2 Sistema eletrônico	37
3.2.3 Aferição dos sensores	39
3.3 Etapa 1 – Mistura de líquidos em diferentes temperaturas	40
3.3.1 Estrutura de ensaios	40
3.3.2 Comparação de dados experimentais com estimativas baseadas em termodinâmica	42

3.4	Etapa 2 – Mistura de líquido frio e vapor	43
3.4.1	Estrutura de ensaios	43
3.4.2	Comparação de dados experimentais com estimativas baseadas em termodinâmica	45
3.4.3	Identificação do sistema e sintonização do controlador	46
3.4.4	Experimentos para avaliação do desempenho do controlador.....	48
3.4.5	Índices de desempenho do controlador	49
3.4.6	Simulações do sistema utilizando o pacote Simulink do Matlab	50
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Aferição dos sensores	53
4.2	Etapa 1 – Mistura de líquidos	54
4.2.1	Dados coletados nos ensaios misturando água em diferentes temperaturas.....	54
4.3	Etapa 2 – Mistura de líquido e vapor	57
4.3.1	Comparação de valores estimados e medidos de temperatura na câmara de mistura	57
4.3.2	Identificação da função de transferência	58
4.3.3	Sintonização do controlador	60
4.3.4	Desempenho do controlador e comparação de valores medidos e simulados	62
4.3.5	Limites de operação do sistema.....	70
5	CONCLUSÕES	73
	REFERÊNCIAS	75

RESUMO

Desenvolvimento de trocador de calor de contato direto equipado com sistema microcontrolado para tratamento térmico de mosto na indústria sucroenergética

No Brasil, a fermentação alcoólica é o processo predominante para produção de etanol a partir de cana-de-açúcar. A utilização de mosto esterilizado associada ao uso de linhagens de leveduras selecionadas apresenta-se como uma das estratégias com potencial para proporcionar melhorias no processo de fermentação alcoólica para produção de etanol e para aumentar a produtividade da indústria sucroenergética. Embora existam diversos métodos aplicáveis na esterilização de compostos líquidos, o tratamento térmico baseado no uso de vapor superaquecido ou saturado é interessante na indústria sucroenergética devido a disponibilidade de redes de distribuição de vapor. Essa pesquisa teve como objetivo desenvolver um trocador de calor de contato direto equipado com sistema eletrônico microcontrolado para controle dinâmico da temperatura de misturas de fluidos a diferentes temperaturas. A tecnologia poderá ser aplicada ao tratamento térmico do mosto utilizado em processos de fermentação alcoólica na indústria sucroenergética. O sistema de mistura utilizado foi o aparato montado para misturar dois fluidos distintos. O aparato era composto por um trocador de calor de contato direto, uma válvula proporcional, um sensor de temperatura e duas válvulas de retenção. O trocador de calor foi montado em forma de um “tê” como dispositivo para mistura de fluidos. Foram realizados experimentos em laboratório; A partir dos dados gerados foi determinado a função de transferência característica do sistema seguida pela sintonização de um controlador Proporcional-Integral. O controlador foi sintonizado com a finalidade de obter temperatura alvo na câmara de mistura do sistema, através de ajustes na seção de escoamento da tubulação de vapor. O desempenho do equipamento foi avaliado com base no tempo de subida, sobressinal, tempo de acomodação, IAE e ITAE, evidenciando-se adequado desempenho para a aplicação em questão. As atividades foram limitadas ao desenvolvimento do equipamento, havendo maior enfoque em aspectos relacionados a controle. Não foram realizadas avaliações da eficácia do tratamento térmico em aplicações industriais ou laboratoriais. Trabalhos futuros poderão utilizar a tecnologia desenvolvida nesta pesquisa para estudos da eficácia do tratamento térmico conduzido sob diferentes temperaturas na redução de microrganismos ou esterilização do mosto.

Palavras-chave: Controle de processos; Instrumentação; Câmara de mistura

ABSTRACT

Development of direct contact heat exchange equipped with microcontrolled system for heat treatment of much in the sugarcane industry

In Brazil, alcoholic fermentation is the predominant process for the production of ethanol from sugarcane. The use of sterilized must associated with the use of selected yeast strains is one of the strategies with potential to provide improvements in the alcoholic fermentation process for ethanol production and to increase the productivity of the sugarcane industry. Although there are several methods applicable to the sterilization of liquid compounds, heat treatment based on the use of superheated or saturated steam is interesting in the sugarcane industry due to the availability of steam distribution networks. This research aimed to develop a direct contact heat exchanger equipped with a microcontrolled electronic system for dynamic temperature control of fluid mixtures at different temperatures. The technology can be applied to the heat treatment of must used in alcoholic fermentation processes in the sugar-energy industry. The mixing system was the apparatus which was assembled to mix two distinct fluids. The apparatus consisted of a direct contact heat exchanger, a proportional valve, a temperature sensor and two check valves. The heat exchanger was assembled in the form of a “t” as a fluid mixing device. Experiments were performed in the laboratory; the characteristic transfer function of the system was determined followed by the tuning of a Proportional-Integral controller. The controller was tuned for the purpose of obtaining target temperature in the system mixing chamber by adjusting the flow section of the steam pipe. The performance of the equipment was evaluated based on rise time, settling time, percent overshoot, IAE e ITAE, showing adequate performance for the application in question. The activities were limited to the development of technology, with a greater focus on aspects related to control. No evaluation of the effectiveness of heat treatment in industrial or laboratory applications has been made. Future works may use the technology developed in this research to study the efficacy of heat treatment conducted at different temperatures in the reduction of microorganisms or sterilization of the must.

Keywords: Process control; Instrumentation; Mixture chamber

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Tipos de trocador de calor de contato direto utilizados para aquecimento de líquidos utilizando vapor (Fonte: HYDROTHERMAL, 2012)	22
Figura 2 - Sistema de controle em malha aberta	29
Figura 3 - Sistema de controle em malha fechada	29
Figura 4 - Topologia de construção de um modelo matemático. Fonte: Adaptado de Coelho 2015)	30
Figura 5 - Diagrama de blocos de controlador PID	32
Figura 6 – Representação dos componentes do sistema de mistura (TT: Transmissor de temperatura)	37
Figura 7 - Diagrama de blocos do circuito: (A) Aquisição de dados; (B) Processamento e comunicação; (C) controle de atuadores	38
Figura 8 - Placa eletrônica de controle e aquisição de dados.....	38
Figura 9 – Tela do aplicativo supervisão.....	39
Figura 10 - Fluxograma de instrumentação da bancada montada para ensaios com mistura de líquidos a diferentes temperaturas (TT = Transmissor de temperatura, FT = Transmissor de vazão)	41
Figura 11 – Sistema de mistura e transmissores utilizados na bancada para ensaios com líquidos a diferentes temperaturas.....	42
Figura 12 – Esquema da estrutura de ensaios utilizada para os experimentos na Etapa 2.....	44
Figura 13 – Identificação dos componentes da Bancada II: (a) Medidor eletromagnético de vazão; (b) Termoresistência PT100 da linha quente; (c) Válvula proporcional; (d) Termoresistência PT100 da linha de mistura; (e) Placa eletrônica; (f) Medidor de vazão do tipo placa de orifício; (g) Medidor de pressão diferencial	45
Figura 14 - Diagrama de blocos que representa as simulações realizadas utilizando o pacote Simulink do Matlab.....	50
Figura 15 - Aferição de sensores utilizados na Etapa 2 da pesquisa: (A) comparação entre indicações dos medidores eletromagnéticos de vazão; (B) curva característica de vazão em função de pressão diferencial da placa de orifício; (C) equação de calibração do sensor de temperatura instalado na linha de mistura; (D) equação de calibração do sensor de temperatura instalado na linha de vapor.....	54

Figura 16 - Comparação de valores observados e estimados da temperatura resultante da mistura de águas fria e quente e curva de frequência acumulada de erros nas estimativas de temperatura da mistura	56
Figura 17 - Valores medidos e estimados de temperatura da água na câmara de mistura (A); frequência acumulada de erros relativos nas estimativas de temperatura da água na câmara de mistura (B).....	58
Figura 18 - Conjunto de dados coletados para identificação e validação da função de transferência característica do sistema	59
Figura 19 – Diagrama temporal para comparação entre valores observados (conjunto de dados reservado para validação) e valores estimados pela função de transferência com 2 polos e 2 zeros (tf2).....	60
Figura 20 - Resposta unitária do sistema: (a) tempo de subida; (b) valor e instante do sobressinal máximo; (c) tempo de acomodação; (d) faixa em torno do valor de regime.....	62
Figura 21 - Resultados experimentais e de simulação da temperatura na câmara de mistura sob as vazões de referência de 200, 400, 600 e 800 L h ⁻¹	64
Figura 22 – Curvas de valor alvo da temperatura na câmara de mistura, sinal correspondente a seção de escoamento na linha quente (entrada do sistema) e sinal correspondente a temperatura medida na câmara de mistura (saída do sistema)	67
Figura 23 - Indicadores de desempenho do controlador: (A) tempo de subida; (B) sobressinal; (C) tempo de acomodação - Colunas hachuradas ultrapassaram o limite de tempo de acomodação de 250 s, que corresponde ao intervalo de tempo entre mudanças de <i>setpoint</i> ; (D) integral do erro absoluto - IAE; (E) integral do erro absoluto ponderado pelo tempo - ITAE	70
Figura 24 - Limites de operação da Bancada II.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Dados coletados para validação de equacionamento termodinâmico – mistura de líquidos.....	55
Tabela 2 - Parâmetros utilizados no levantamento da função de transferência	59

LISTA DE SÍMBOLOS

ρ : Massa específica (kg m^{-3})

m : Massa (kg)

$\mathcal{V}$: Volume (m^3)

v : Volume específico ($\text{m}^3 \text{kg}^{-1}$)

$\rho_{H_2O}(T)$: Massa específica da água em função da temperatura T (kg m^{-3})

T : Temperatura ($^{\circ}\text{C}$)

$a_0, a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6$: coeficientes da equação proposta por Kell (1975) para cálculo da massa específica da água

$\Delta E_{\text{sistema}}$: Variação da energia total de um sistema (kJ)

E_e : Energia total que entra no sistema (kJ)

E_s : Energia total que sai do sistema (kJ)

Q_e : Quantidade de calor que entra no sistema (kJ)

Q_s : Quantidade de calor que sai do sistema (kJ)

W_e : Energia na forma de trabalho fornecida para o sistema (kJ)

W_s : Energia na forma de trabalho retirada do sistema (kJ)

E_{massa_e} : Energia fornecida para o sistema devido a entrada de massa (kJ)

E_{massa_s} : Energia retirada do sistema devido a saída de massa (kJ)

$\dot{m}_e$: Vazão mássica ou fluxo de massa entrando no sistema (kg s^{-1})

$\dot{m}_s$: Vazão mássica ou fluxo de massa saindo do sistema (kg s^{-1})

q : Vazão volumétrica ($\text{m}^3 \text{s}^{-1}$)

t : tempo (s)

V : Velocidade (m s^{-1})

V_{med} : Velocidade média de escoamento (m s^{-1})

A : Área da seção transversal de escoamento (m^2)

P : Pressão (kPa)

W_{fluxo} : Trabalho ou energia de escoamento (kJ)

w_{fluxo} : Trabalho ou energia de escoamento por unidade de massa (kJ kg^{-1})

e : Energia total por unidade de massa (kJ kg^{-1})

U : Energia interna (kJ)

H : Entalpia total (kJ)

h : Entalpia específica (kJ/kg)

u : Energia interna específica (kJ kg⁻¹)

g : aceleração da gravidade (m s⁻²)

z : distância vertical em relação a um plano de referência (m)

c_v : Calor específico à volume constante (kJ kg⁻¹ K⁻¹)

c_p : Calor específico à pressão constante (kJ kg⁻¹ K⁻¹)

c : Calor específico para substâncias incompressíveis (kJ kg⁻¹ K⁻¹)

Δu : Variação da energia interna específica (kJ kg⁻¹)

$\dot{E}$: Energia por unidade de tempo (kW)

$\Delta \dot{m}$: Variação da massa (kg)

m_e : Massa que entra no sistema (kg)

m_s : Massa que sai do sistema (kg)

Σ : Somatório

$\dot{m}$: Vazão mássica ou fluxo de massa (kg s⁻¹)

e_c : Energia interna cinética (kJ)

e_p : Energia interna potencial (kJ)

E : Energia total (kJ)

$\dot{Q}_e$: Quantidade de calor que entra no sistema por unidade de tempo (kW)

$\dot{Q}_s$: Quantidade de calor que sai do sistema por unidade de tempo (kW)

$\dot{W}_e$: Energia na forma de trabalho fornecida para o sistema por unidade de tempo (kW)

$\dot{W}_s$: Energia na forma de trabalho retirada do sistema por unidade de tempo (kW)

ΔQ : Variação de calor (kJ)

ΔW : Variação de trabalho (kJ)

ΔE_c : Variação da energia cinética (kJ)

ΔE_p : Variação da energia potencial (kJ)

h_e : Entalpia específica do fluxo de massa que entra no sistema (kJ/kg)

h_s : Entalpia específica do fluxo de massa que sai do sistema (kJ/kg)

$\bar{c}$: Valor médio do calor específico para substâncias incompressíveis (kJ kg⁻¹ K⁻¹)

Δh : Variação da entalpia (kJ/kg)

ΔP : Variação da pressão (kPa)

ΔT : Variação da temperatura (°C)

$\int$: Integral

$u(t)$: Resposta do sistema em relação ao tempo

k_p : Ganho proporcional

k_i : Fator integrativo

k_d : Fator derivativo

$e(t)$: Erro do sistema em relação ao tempo

τ_i : Constante de tempo integral

τ_d : Constante de tempo derivativa

1 INTRODUÇÃO

Diversos tipos de trabalhos requerem a utilização de materiais e equipamentos limpos e livres de microrganismos durante a execução das atividades. Instrumentos médicos e odontológicos, máquinas industriais alimentícias e farmacêuticas são alguns exemplos de materiais e equipamentos que precisam estar livres de quaisquer formas de microrganismos, sejam eles, fungos, vírus, protozoários ou bactérias. No setor agrário, em especial nas usinas alcooleiras, esses cuidados também são necessários pois a contaminação microbiana interfere nos processos fermentativos. O controle das bactérias e leveduras contaminantes do processo é importante não somente para obter um bom rendimento alcoólico no processo fermentativo, mas também para garantir um produto de qualidade (NAVES et al., 2010).

Uma forma de controle da contaminação microbiana é através da esterilização. Esse processo visa promover a eliminação de microrganismos presentes em um dado meio, sendo influenciada por variáveis como a quantidade e o tipo de microrganismos, presença de matéria orgânica e tipo de método utilizado para a esterilização (NOLASCO, 2010).

Os métodos de esterilização podem ser classificados como químicos, físico-químicos ou físicos (BARRIENTOS, 2012), sendo que a escolha do método depende do tipo de material a ser esterilizado (COUTO, 2011) e do processo industrial em questão. Os métodos químicos são aqueles que usam agentes químicos como formaldeído, glutaraldeído, ácido peracético, entre outras substâncias. As técnicas físico-químicas dizem respeito aos processos que utilizam principalmente óxido de etileno e peróxido de hidrogênio, sendo essas as técnicas mais empregadas. Os métodos físicos, por sua vez, são aqueles que incluem o calor (seco ou úmido), a filtração e a radiação. Dentre os métodos físicos, destaca-se nessa pesquisa a aplicação de vapor aquecido na forma de vapor saturado sob pressão.

A aplicação de vapor saturado atua na eliminação de microrganismos pela desnaturação de proteínas, enzimas e membrana plasmática (PELCZAR et al., 1996), sendo que a temperatura e o tempo de exposição do material ao tratamento térmico são variáveis importantes no processo e definidas com base em diversos fatores que não pertencem ao escopo dessa pesquisa. Esse método físico é considerado também o meio mais econômico, rápido e sem efeitos adversos, por não deixar resíduos do agente esterilizante. Em muitas aplicações, o processo costuma ser realizado numa câmara que é denominada autoclave, ou através da injeção de vapor, direta ou indiretamente, através de válvulas de controle (ASSUMPÇÃO, 1973). O princípio básico de operação da autoclave é a substituição do ar da câmara por vapor saturado. Essa operação tem a vantagem de produzir uma elevação da

temperatura de forma rápida e em curtos tempos de esterilização (BARRIENTOS, 2012). Porém, a desvantagem na utilização de autoclaves é que o processo não ocorre de forma dinâmica. As válvulas de vapor, por sua vez, permitem a esterilização contínua do líquido que escoar em uma tubulação. A esterilização contínua é útil para os processos em que o meio é adicionado ao reator durante a esterilização, pois evita recontaminação durante o processo. Acerca disso, um dos métodos utilizados é através do processo asséptico denominado “HTST” (*high temperature short time*), onde se realiza o emprego de vapor saturado no líquido ou alimento a ser tratado, visando reduzir a população de microorganismos (FERRÃO, 2012).

Tendo em vista a relevância dos sistemas de esterilização e seus diferentes métodos, o presente trabalho propõe o desenvolvimento de uma tecnologia microcontrolada para injeção de vapor em sistemas de fluxo contínuo a fim de efetuar o tratamento térmico de líquidos. O protótipo de válvula de vapor desenvolvido terá como principal aplicação, a redução da população de microorganismos ou a esterilização de líquidos relacionados ao processamento de cana-de-açúcar em usinas. Devido a disponibilidade de linhas de vapor em usinas, o uso de vapor para tais fins apresenta potencial de aplicação em larga escala.

Embora existam diversos métodos aplicáveis a esterilização de compostos líquidos, o tratamento térmico baseado no uso de vapor superaquecido ou saturado é interessante na indústria sucroenergética devido a disponibilidade de redes de distribuição de vapor.

A hipótese desta pesquisa é que, utilizando tecnologias nacionais e de custo relativamente baixo, é possível desenvolver um trocador de calor de contato direto baseado no uso de vapor para tratamento térmico de mosto utilizado na fermentação alcoólica para a produção de biocombustíveis. Supõe-se também que o controle Proporcional-Integral-Derivativo (PID) atende aos requisitos desse tipo de aplicação, permitindo o ajuste dinâmico da temperatura de misturas de líquido e vapor.

A pesquisa teve como objetivo desenvolver um trocador de calor de contato direto equipado com sistema eletrônico microcontrolado para controle dinâmico da temperatura de misturas de fluidos a diferentes temperaturas. A tecnologia aplica-se ao tratamento térmico de mosto utilizado em processos de fermentação alcoólica na indústria sucroenergética. É importante ressaltar que as atividades foram limitadas ao desenvolvimento da tecnologia, sendo que não foram realizados testes para identificar configurações de operação apropriadas para uso em pequena, média ou larga escala. A pesquisa propõe apenas a tecnologia para controle dinâmico da temperatura de misturas, não havendo avaliação da eficácia do tratamento térmico em aplicações industriais ou laboratoriais.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Campo de aplicação: Indústria sucroenergética

No Ano-Safra 2016/2017, a área cultivada com cana-de-açúcar no Brasil foi de 9,049 milhões de hectares, com produtividade média de 72,6 t/ha e produção total de 657,2 milhões de toneladas, permitindo ao país manter a posição de maior produtor mundial desse produto (MAPA, 2017). Em termos de produção de álcool para combustíveis a partir de cana-de-açúcar, na safra 2017/2018 a produção brasileira de álcool hidratado e álcool anidro foi de aproximadamente 28 milhões de m³ (MAPA, 2018a). Adicionalmente, em 2017, o volume de etanol exportado foi de 1,380 milhões de m³ sob valor de 807 milhões de dólares (MAPA, 2018b), fato que evidencia a importância da indústria sucroenergética na economia brasileira.

De modo resumido, o processo de produção de álcool a partir de cana-de-açúcar para uso em combustíveis pode ser dividido nas seguintes etapas: limpeza da cana, preparo e extração do caldo, clarificação do caldo, fermentação, destilação, desidratação e armazenamento (NOVACANA, 2016). Após a colheita, a cana-de-açúcar é transportada para a usina, onde partículas grosseiras (poeira, solo, etc.) são removidas por lavagem e materiais metálicos eventualmente presentes na matéria prima são removidos por um eletroímã. Na sequência, a cana-de-açúcar é picada e submetida à moagem, resultando em dois materiais, um com parte líquida (caldo de cana) e outro a parte sólida (bagaço). A parte sólida (bagaço) costuma ser utilizada como biomassa para geração de energia na usina, enquanto que a parte líquida (caldo de cana) pode ser utilizada no processo de fabricação de álcool. O composto líquido obtido após a moagem é submetido a processos de filtração, decantação, tratamento químico a fim de eliminar ou reduzir resíduos, impurezas e micro-organismos. O líquido resultante passa por ajustes de temperatura e teor de açúcares, sendo denominado como mosto após este processo, em seguida o mosto é transferido para tanques (dornas) aos quais adiciona-se leveduras que, ao se alimentar de açúcares, quebram moléculas de glicose em etanol e gás carbônico, sendo esse processo denominado fermentação. Após a fermentação obtém-se o mosto fermentado, também denominado como cerveja ou vinho, que é um material líquido contendo em torno de 10% de etanol. Na sequência, o mosto fermentado é submetido ao processo de destilação a fim de separar álcool e água, sendo que o álcool extraído desse processo é denominado álcool hidratado ou etanol e possui teor alcoólico de aproximadamente 96%. Se desejável, o álcool hidratado ainda pode passar por um processo de desidratação a fim de remover a quantidade remanescente de água, resultando no álcool

anidro, cujo teor alcóolico é superior a 99,3%. O álcool anidro pode ser misturado à gasolina e utilizado como combustível. Por fim, o álcool hidratado (etanol) e o álcool anidro são armazenados em grandes tanques e transportados até as distribuidoras.

Embora existam diversos métodos para produção de etanol a partir de cana-de-açúcar, no Brasil a fermentação alcoólica é o método predominante. A fermentação alcoólica consiste na ação enzimática de leveduras para transformação dos açúcares presentes no mosto em álcool, gás carbônico e energia (CAMARGO et al., 1990), porém a eficiência das leveduras em transformar o açúcar em álcool depende da qualidade do mosto a ser fermentado. Quando o mosto não é esterilizado ou é rico em contaminantes microbianos, proporciona-se um ambiente de competição entre microrganismos que resulta em interferências negativas no processo de fermentação alcoólica (NOLASCO JUNIOR, 2005; MENEGHIN et al., 2008). Estima-se que 30 a 60% das perdas no setor de fermentação da indústria de açúcar e álcool estão associadas a contaminantes microbiológicos, sendo que além dessas perdas há também custos adicionais para controle dos referidos contaminantes (NOLASCO JUNIOR, 2005). Sendo assim, a utilização de mosto esterilizado associada ao uso de linhagens de leveduras selecionadas pode ser uma estratégia com potencial para proporcionar melhorias no processo de fermentação alcoólica para produção de etanol e para aumentar a produtividade da indústria sucroenergética.

Embora existam diversos processos aplicáveis a esterilização de compostos líquidos, o tratamento térmico baseado no uso de vapor superaquecido ou saturado é interessante na indústria sucroenergética devido a disponibilidade de redes de distribuição de vapor. O material sólido (bagaço) obtido na etapa de moagem é empregado como combustível em caldeiras responsáveis pela produção de vapor. O vapor produzido pelas caldeiras é comumente denominado “vapor vivo” e apresenta elevada pressão e temperatura (aproximadamente 2200 kPa e 300 °C). O vapor vivo é utilizado em turbinas que acionam equipamentos mecânicos da usina e geradores de energia elétrica. Após atravessar a turbina, o vapor é denominado vapor de escape e apresenta pressão bem mais baixa (aproximadamente 250 kPa). O vapor de escape é então distribuído através de tubulações para uso como fonte de energia térmica nos processos de produção de açúcar e álcool (NOVACANA, 2016). Dentre os referidos processos, o vapor de escape apresenta potencial para ser utilizado no tratamento térmico do mosto visando sua esterilização.

2.2 Esterilização utilizando vapor saturado

De modo geral, o tratamento térmico de produtos ou meios tem como objetivos a inativação enzimática, diminuição da carga microbiana e destruição de bactérias patogênicas (BARUFFALDI; OLIVEIRA, 1998). A aplicação de vapor saturado atua na eliminação de microrganismos pela desnaturação de proteínas, enzimas e membrana plasmática (PELCZAR et al., 1996), sendo que a temperatura e o tempo de exposição do material ao tratamento térmico são variáveis importantes no processo e definidas com base em diversos fatores que não pertencem ao escopo dessa pesquisa.

O contato direto entre vapor saturado e o fluido a ser tratado permite rápido aumento da temperatura do material de interesse, sendo que em temperaturas de até 150°C observou-se a inativação de esporos bacterianos após apenas 1 a 5 segundos de exposição (BROWN, 1994). Uma vez que os contaminantes microbianos do mosto que geralmente apresentam maior resistência térmica são os esporos, evidencia-se que o processo de tratamento térmico utilizando vapor de escape apresenta potencial para melhoria da qualidade do mosto e do processo de fermentação alcoólica.

2.3 Trocadores de calor de contato direto

Os equipamentos empregados nos processos de troca de calor entre dois fluidos que estão em temperaturas diferentes são denominados trocadores de calor. Conforme o processo de transferência de calor, esses equipamentos podem ser classificados como trocadores de calor de contato indireto ou direto. Em trocadores de contato indireto, os fluidos permanecem separados por uma parede de material termicamente condutora e, portanto, não há a mistura dos fluidos. A troca de calor ocorre continuamente através da parede, sendo que tais trocadores são indicados para aplicações nas quais não pode haver a mistura dos fluidos. Já os trocadores de calor de contato direto, também chamados de câmaras de mistura, podem ser utilizados somente em aplicações que permitem a mistura dos fluidos. Nesses trocadores há o contato direto entre os fluidos e, portanto, ocorrem tanto processos de transferência de calor quanto de massa. Trocadores de contato direto apresentam construção geralmente mais simples do que aqueles de contato indireto e apresentam elevadas taxas de transferência de calor. Trocadores de calor de contato direto operam injetando vapor diretamente no líquido a ser aquecido, sendo que esse processo resulta em rápida transferência de calor sendo mais eficiente no uso de energia se comparado a trocadores de calor por contato indireto.

Na Figura 1 são ilustrados alguns modelos de trocadores de calor de contato direto. A Figura 1A mostra um trocador que contém uma válvula para controle do fluxo de vapor, sendo que o vapor é injetado na tubulação contendo líquido através de um dispositivo perfurado. A Figura 1B ilustra um mecanismo de controle do fluxo de vapor utilizando um bocal cuja seção de escoamento é ajustável. A Figura 1C ilustra um conceito bastante simples que emprega um “tê” como dispositivo para mistura de líquido e vapor, sendo que naturalmente atuadores são necessários para controlar o fluxo de líquido e vapor. Por fim, a Figura 1D ilustra um conceito similar ao da Figura 1B, entretanto um único bocal com seção variável controle o fluxo de líquido e de vapor, havendo um atuador que controle a seção do referido bocal.

Figura 1 – Tipos de trocador de calor de contato direto utilizados para aquecimento de líquidos utilizando vapor (Fonte: HYDROTHERMAL, 2012)

2.4 Fundamentos de termodinâmica

Praticamente todo o conteúdo de termodinâmica apresentado a seguir é baseado no livro de Termodinâmica escrito por Yunus A. Çengel e Michael A. Boles (ÇENGEL; BOLES, 2006). A fim de evitar repetidas referências aos referidos autores, optou-se por não incluir referências nos tópicos a seguir.

2.4.1 Sistemas e volume de controle

Um sistema é definido como uma quantidade de matéria ou região no espaço selecionada para estudo, havendo sistemas abertos e fechados. Em sistemas fechados não há transferências de massa, sendo que a energia pode ser transferida na forma de calor ou de trabalho. Já em sistemas abertos, variações de energia também podem ser causadas por fluxo de massa através da fronteira do sistema. Nesses sistemas é conveniente arbitrar uma região finita de espaço denominada volume de controle, dentro da qual se deseja analisar o comportamento de um material ou processo. Muitos problemas da mecânica de fluidos e termodinâmica são abordados a partir da análise do comportamento de um material contido em um volume de controle.

2.4.2 Princípio da conservação de energia

A energia pode existir em diversas formas, tais como térmica, mecânica, cinética, potencial, elétrica, magnética, química e nuclear, sendo que a soma delas representa a energia total em um sistema. Existem ainda formas de energia relacionadas à estrutura e ao grau de atividade molecular, sendo que a soma dessas energias é denominada energia interna, a qual é parte da energia total de um sistema.

A Primeira Lei da Termodinâmica, também conhecida como princípio de conservação da energia, enuncia que a energia não pode ser criada nem destruída durante um processo, podendo apenas mudar de forma. Esse princípio oferece fundamentos para o estudo das relações entre as diversas formas de energia.

Realizando-se balanço de energia e obedecendo ao princípio de conservação da energia, evidencia-se que a variação da energia total de um sistema durante um processo é igual à diferença entre a energia total que entra (E_e) e a energia total que sai (E_s) do sistema durante esse processo. Além disso, a energia pode entrar ou deixar um sistema por mecanismos de transferência de calor (Q), realização de trabalho (W) e por fluxo de massa (E_{massa}). Desse modo, observa-se que a variação de energia de um sistema ($\Delta E_{sistema}$) pode ser expressa pela eq. 1.

$$\Delta E_{sistema} = E_e - E_s = (Q_e - Q_s) + (W_e - W_s) + (E_{massa_e} - E_{massa_s}) \quad (1)$$

2.4.3 Análises de massa e energia de sistemas abertos

Condições de regime permanente são aquelas nas quais não há alterações nas variáveis de interesse num dado intervalo de tempo. Por exemplo, um processo durante o qual um fluido escoar através de um volume de controle sem modificações temporais é denominado processo em regime permanente. Condições de regime permanente podem ser aproximadas de forma bastante satisfatória em dispositivos de operação contínua como turbinas, bombas, trocadores de calor e sistemas de refrigeração (ÇENGEL; BOLES, 2006).

Conforme o princípio de conservação da massa aplicado a um volume de controle, a variação da massa dentro do volume de controle (Δm) durante um intervalo de tempo é igual a diferença entre a massa que entra e a que deixa o sistema (eq. 2).

$$\Delta m = m_e - m_s \quad (2)$$

É comum, que a eq. 2 seja expressa na forma de taxa de variação onde enfatiza-se que podem haver diversos fluxos de massa de entrada e de saída em um volume de controle (eq. 3).

$$\frac{dm}{dt} = \sum \dot{m}_e - \sum \dot{m}_s \quad (3)$$

Para processos em regime permanente, a quantidade de massa contida dentro do volume de controle não varia com o tempo, e portanto, a soma dos fluxos de massa de entrada ($\dot{m}_e$) é igual à soma dos fluxos de massa de saída ($\dot{m}_s$) (eq. 4).

$$\sum \dot{m}_e = \sum \dot{m}_s \quad (4)$$

A vazão mássica ou fluxo de massa ($\dot{m}$) apresentado nas equações acima pode ser obtida pelo produto da massa específica do fluido (ρ) e a vazão volumétrica (q) (eq. 5).

$$\dot{m} = \rho q \quad (5)$$

Por sua vez, a vazão volumétrica (q) provém da razão do volume ($\mathcal{V}$) escoado em um dado intervalo de tempo (t), ou ainda, do produto da velocidade média de escoamento (V_{med}) e da área da seção de escoamento (A) (eq. 6).

$$q = \frac{\mathcal{V}}{t} = A V_{med} \quad (6)$$

A massa específica de uma substância (ρ) resulta da razão entre massa (m) e volume ($\mathcal{V}$). Em geral, a massa específica de uma substância depende da temperatura e da pressão. Os líquidos e sólidos muitas vezes são assumidos como substâncias incompressíveis e, portanto, é comum que a massa específica dessas substâncias seja considerada como dependente

somente da temperatura. Eventualmente o termo volume específico (v) é adotado, sendo esse o inverso da massa específica (eq. 7).

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$v = \frac{V}{m} \quad (7)$$

A massa específica da água em função da temperatura, $\rho_{H_2O}(T)$, pode ser estimada pela equação proposta por Kell (1975) (eq. 8), válida para temperaturas entre 0 e 150°C e para a pressão de 101,325 kPa.

$$\rho_{H_2O}(T) = \frac{a_0 + a_1 T + a_2 T^2 + a_3 T^3 + a_4 T^4 + a_5 T^5}{1 + a_6 T} \quad (8)$$

Em que, os valores dos coeficientes são: $a_0 = 0,9998676$; $a_1 = 17,801161 \times 10^{-3}$; $a_2 = -7,942501 \times 10^{-6}$; $a_3 = -52,56328 \times 10^{-9}$; $a_4 = 137,689100 \times 10^{-12}$; $a_5 = -364,4647 \times 10^{-15}$; $a_6 = 17,735441 \times 10^{-3}$.

2.4.4 Trabalho de escoamento e a energia de um fluido em escoamento

Uma vez que os volumes de controle envolvem fluxo de massa através de suas fronteiras, uma certa quantidade de trabalho é necessária para inserir ou retirar massa do sistema. Esse trabalho é denominado trabalho ou energia de escoamento (W_{fluxo}) e é necessário para a manutenção de escoamento contínuo através do volume de controle, sendo obtido pelo produto entre pressão (P) e volume (V) (eq. 9).

$$W_{fluxo} = P V \quad (9)$$

O trabalho de escoamento também pode ser representado por unidade de massa da seguinte forma:

$$w_{fluxo} = P v \quad (10)$$

A energia total de um sistema compressível simples é composta de energias interna, cinética e potencial. Além disso, um fluido que entra ou sai de um volume de controle possui uma forma adicional de energia recém apresentada que é a energia de escoamento, portanto, a energia total por unidade de massa (e) de um fluido em escoamento é dada pela eq. 11.

$$e = u + e_c + e_p + w_{fluxo} = u + \frac{V^2}{2} + g z + P v \quad (11)$$

A eq. 11 pode ser conveniente simplificada, mas para isso é necessário introduzir o conceito de entalpia. A entalpia é uma propriedade que combina energia interna, pressão e

volume sendo frequentemente utilizada em cálculos termodinâmicos, podendo ser expressa como entalpia total (H , kJ) ou entalpia específica (h , kJ kg⁻¹) (eq.12).

$$\begin{aligned} H &= U + P \mathcal{V} \\ h &= u + P v \end{aligned} \quad (12)$$

Portanto, utilizando o conceito de entalpia é possível reescrever a eq. 11 na forma da eq. 13, que expressa a energia total por unidade de massa de um fluido em escoamento.

$$e = h + \frac{V^2}{2} + g z \quad (13)$$

A energia total (E) transportada por uma dada massa de fluido (m) é obtida conforme eq. 14.

$$E = m \left(h + \frac{V^2}{2} + g z \right) \quad (14)$$

De modo similar, a taxa de transporte de energia (potência), ou seja, a quantidade de energia transportada por unidade de tempo ($\dot{E}$) é dada pela eq. 15.

$$\dot{E} = \dot{m} \left(h + \frac{V^2}{2} + g z \right) \quad (15)$$

De modo mais generalizado, considerando que a energia pode ser transferida apenas por calor, trabalho e fluxo de massa, o balanço de energia apresentado na eq. 1 aplicado a um volume de controle com escoamento em regime permanente pode ser apresentado da seguinte forma:

$$\dot{Q}_e + \dot{W}_e + \sum \dot{m}_e \left(h + \frac{V^2}{2} + g z \right) = \dot{Q}_s + \dot{W}_s + \sum \dot{m}_s \left(h + \frac{V^2}{2} + g z \right) \quad (16)$$

2.4.5 Balanço de energia em câmaras de mistura

Uma câmara de mistura é um volume dentro do qual ocorre a mistura de duas ou mais correntes de fluido. Como exemplo, uma conexão em T serve como câmara de mistura para correntes de água fria e quente em um chuveiro. Em geral, as trocas de calor entre a câmara de mistura e o ambiente externo são desprezíveis ($\Delta Q = 0$) e não envolvem nenhum tipo de trabalho ($\Delta W = 0$). Quando uma corrente de fluido entra e sai de um dispositivo em regime permanente, a variação de energia cinética é próxima de zero ($\Delta E_c = 0$), sendo que esse termo pode ser significativo somente em velocidades de escoamento elevadas (45 m s⁻¹ equivale a 1 kJ kg⁻¹ de energia cinética). De modo semelhante, uma variação de 1 kJ kg⁻¹ de energia potencial corresponde a uma diferença de nível de 102 m, e por isso é comum

desprezar esse termo no balanço de energia ($\Delta E_p = 0$). Desse modo, para câmaras de mistura, o somatório dos produtos dos fluxos de massa de entrada e respectivos valores de entalpia deve ser igual ao somatório dos produtos dessas variáveis na saída do sistema, sendo que a eq. 16 é simplificada na forma da eq. 17.

$$\sum \dot{m}_e h_e = \sum \dot{m}_s h_s \quad (17)$$

2.4.6 Misturas de líquidos em diferentes temperaturas

A mistura de líquidos com diferentes temperaturas também pode ser analisada adotando um procedimento bem mais simples baseado em fundamentos de calorimetria.

A temperatura final de uma mistura de líquidos pode ser estimada por:

$$T = \frac{m_1 c_1 T_1 + m_2 c_2 T_2 + \dots + m_n c_n T_n}{m_1 c_1 + m_2 c_2 + \dots + m_n c_n} \quad (18)$$

Dado que o valor médio de calor específico da água é $4,2 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$, e ainda, substituindo as variáveis que representam massa por fluxos de massa, obtém-se a eq. 19.

$$T = \frac{c \sum \dot{m}_i T_i}{c \sum \dot{m}_i} = \frac{\sum \dot{m}_i T_i}{\sum \dot{m}_i} \quad (19)$$

2.5 Sistemas de controle

Um sistema de controle é um conjunto de dispositivos que visa manter uma ou mais grandezas físicas dentro de condições definidas. Os dispositivos que compõe esse conjunto podem ser mecânicos, elétricos, ópticos, etc. Várias são as grandezas físicas que podem ser controladas, como por exemplo: temperatura, pressão, vazão, velocidade, frequência, posição linear ou angular, tensão, corrente e luminosidade.

Sistema de controle consiste de subsistemas e processos (ou plantas) reunidos com o propósito de controlar as saídas dos processos (NISE, 2002). Segundo Mollenkamp (1988), o controle de sistemas pode estar associado aos seguintes propósitos: prevenir condições instáveis no processo que poderiam pôr em perigo pessoas e/ou equipamentos; mostrar dados sobre o sistema aos operadores da planta para que eles possam manter o mesmo em ritmo seguro e eficiente; manter os processos industriais dentro de seus pontos operacionais mais eficientes.

Percebe-se que há várias formas de definir o que é um sistema de controle. A razão é que o controle de sistemas depende de muitos aspectos de projeto e operação da planta. Os

especialistas em controle têm de lidar com instrumentação ou hardware para medição, técnicas de projetos, estratégias e manutenção de sistemas de controle (MOLLENKAMP, 1988).

Um exemplo de sistema de controle apresentado por Nise (2002) é a produção de calor como resultado de fluxo de combustível. Neste processo, válvulas de combustíveis são usadas para regular a temperatura numa sala, controlando a saída de calor da caldeira. Outros subsistemas, como os termostatos, medem a temperatura da sala. Um sistema de controle, na sua forma mais simples, fornece uma saída ou resposta para uma dada entrada ou estímulo.

Uma das classificações dos sistemas de controle está baseada no fato do sistema possuir ou não realimentação. Um sistema de controle sem realimentação é aquele que se baseia no valor de entrada para manipular as variáveis de saída, chamamos este sistema de malha aberta. Já o sistema com realimentação é denominado de malha fechada, neste caso as variáveis de saídas são monitoradas e seus valores são levados em consideração. Os dois sistemas são descritos a seguir.

2.5.1 Sistemas de controle em malha aberta e malha fechada

Um sistema de controle em malha aberta é aquele em que a saída não afeta a ação de controle. Em outras palavras, num sistema em malha aberta, não se mede o sinal de saída nem tampouco este sinal é enviado para a entrada. Um exemplo prático deste sistema é um forno elétrico, no qual a operação de aquecer o forno não é medida. Caso a temperatura não chegue no valor desejado pelo usuário o sistema não realizará nenhuma correção.

Uma característica do controle em malha aberta é que este não pode compensar a ação de quaisquer perturbações que sejam adicionadas ao sinal atuante do controlador. Utilizando o sistema do forno elétrico como exemplo, temos que a temperatura ambiente interfere (perturba) o sistema, alterando a temperatura de saída do forno. Nada pode ser feito pelo controlador para anular a diferença entre a temperatura desejada do forno e a interferência da temperatura ambiente por se tratar de um controle em malha aberta.

Os sistemas em malha aberta, portanto, não corrigem os efeitos de perturbações e são comandados unicamente com base na entrada. Na Figura 2 é apresentado um sistema de controle em malha aberta.

Um aprimoramento dos sistemas foi a utilização de sensores, que possuem a função de fechar a malha do sistema e realizar a tarefa de corrigir as perturbações. Ao utilizar o exemplo do forno elétrico temos a inclusão de um sensor de temperatura dentro do forno. O valor

medido é utilizado pelo sistema para decidir a tensão a ser aplicada nas resistências elétricas do forno a fim de atingir e manter a temperatura desejada.

Figura 2 - Sistema de controle em malha aberta

As desvantagens dos sistemas em malha aberta, como a incapacidade de corrigir perturbações, pode ser superada no sistema de controle em malha fechada (DORF & BISHOP, 2001). A arquitetura genérica de um sistema em malha fechada é mostrada na Figura 3.

Figura 3 - Sistema de controle em malha fechada

Os termos, controle com retroação e controle em malha fechada, são usados indistintamente. Num sistema de malha fechada, o sinal atuante de erro, que é a diferença do sinal de saída e o sinal de entrada, modifica o controlador de modo a diminuir o erro, e faz com o valor do sinal de saída fique mais próximo do valor desejado (*setpoint*) (OGATA, 2003). A expressão controle em malha fechada acarreta sempre o uso da retroação a fim de reduzir o erro do sistema. Por outro lado, o sistema em malha aberta possui um menor custo, e deve ser escolhido sempre que possível (OGATA, 2003).

Entendendo as classificações dos sistemas percebe-se a necessidade de conhecer e saber a maneira que desejamos que o sistema funcione antes de projetá-lo, procurando garantir seu adequado funcionamento.

2.5.2 Fundamentos de identificação de sistemas

Entende-se por identificação de sistemas a determinação de modelos matemáticos de sistemas reais, onde as características particulares dos sistemas possam ser representadas. Utiliza-se destas características para detecção de falhas, otimização, controle, entre outros. Dois procedimentos podem ser adotados na elaboração de modelos matemáticos, sendo eles: análise físico-matemática e análise experimental. A análise físico-matemática baseia-se nas leis da física, tais como as leis de Kirchhoff para circuitos elétricos e a lei de Newton para sistemas mecânicos. A análise experimental baseia-se na medição ou observação de sistemas. A topologia de desenvolvimento de uma identificação de sistema (modelagem) é apresentada na Figura 4 (COELHO, 2015).

Figura 4 - Topologia de construção de um modelo matemático. Fonte: Adaptado de Coelho (2015)

A modelagem de sistemas pode adotar diferentes formas matemáticas. Vários são os fatores que devem ser considerados, fazendo com que um modelo matemático possa ser mais adequado que outros. Um exemplo apresentado por Ogata (2010) é a utilização de representações de espaço de estados para problemas de controle ótimo. Por outro lado, para a análise de resposta transitória e a resposta em frequência de um sistema linear, invariante no tempo, de entrada e de saída únicas, a representação do modelo matemático pela função de transferência passa a ser mais vantajosa.

Os modelos matemáticos auxiliam na análise dos sistemas, sendo que ferramentas analíticas e de computação podem ser utilizadas nesses modelos (OGATA, 2010). A utilização do modelo para simulação do sistema constitui-se um procedimento de baixo custo

e seguro para experimentar o sistema. Entretanto, a validade (adequação) dos resultados de simulação depende da qualidade do modelo matemático do sistema.

Na obtenção de um modelo matemático relativamente simplificado, frequentemente torna-se necessário ignorar certas propriedades físicas inerentes ao sistema (OGATA, 2010). Na prática, utiliza-se a hipótese básica de que, para a elaboração de modelos, processos reais, em geral, não necessitam obrigatoriamente de modelos complexos. Um sistema complexo é um sistema de muitos componentes conectados em redes grandes que interagem entre si, esses sistemas possuem características de aprendizado, adaptação, não linearidade, etc. Para o presente trabalho é de interesse apenas o estudo de sistemas lineares representados por função de transferência.

A função de transferência pode ser definida como a relação de uma variável de saída com uma variável de entrada, e esta relação é regida por equações diferenciais (BENTO, 1963). Em outras palavras, a função de transferência é um bloco de informações que relaciona valores de entrada e de saída de um sistema. Outro aspecto importante sobre as funções de transferências são as relações de entrada e saída, que podem ser de qualquer natureza (tensão, corrente, posição, velocidade, temperatura), ou seja, a natureza da relação de entrada e saída não é relevante (BENTO, 1963).

A identificação da função de transferência caracteriza uma das etapas de um projeto de controle. O modelo matemático ou função de transferência é obtido através de uma equação diferencial linear e invariante no tempo, que costuma ser expressa por transformadas de Laplace, conforme eq. 20.

$$\text{Função de transferência} = G(s) = \frac{\mathcal{L}[\text{saída}]}{\mathcal{L}[\text{entrada}]} \quad (20)$$

A função de transferência possibilita uma melhor interpretação quando comparado com a equação diferencial. Além de tornar os dados mais intuitivos a função de transferência permite que seja alterado dados do sistema e, rapidamente, perceber o efeito dessas mudanças na resposta do sistema. Porém, a função de transferência só pode ser utilizada em sistemas que sejam lineares (NISE, 2002). Além disso, a função de transferência não fornece nenhuma informação relativa à estrutura física do sistema, ou seja, as funções de transferência de sistemas físicos diferentes podem ser iguais (OGATA, 2010)

2.5.3 O processo de um projeto de controle

Conforme Nise (2002), o processo de um projeto de controle passa por 6 etapas: especificar um sistema físico, desenhar um diagrama de blocos, transformar as especificações do sistema físico em um esquema, obter uma representação de diagrama de blocos através do esquema transformado, reduzir o diagrama de blocos, analisar e verificar se os requisitos do projeto foram atendidos.

O primeiro passo refere-se as especificações físicas, como por exemplo, um sistema de controle de vazão que tem como atuador uma válvula proporcional. Qual é a vazão máxima e mínima que essa válvula deverá suportar? Perguntas como essa devem ser respondidas na primeira etapa, em alguns casos o resultado dessa etapa é um conceito geral do projeto.

O passo dois de um projeto é a realização de um diagrama de blocos funcional, traduzindo as descrições qualitativas apresentadas na etapa um, transformando as informações em blocos que constam as características do sistema e também indicando as interconexões. A Figura 5 é um exemplo de diagrama de blocos funcional.

Figura 5 - Diagrama de blocos de controlador PID

Duas características do sistema podem ser identificadas através do diagrama de blocos da Figura 5, sendo elas: tipo de malha e tipo de controle. O sistema apresentado é uma malha fechada, isso se dá pela utilização de um Sensor (transdutor de saída) realizando a tarefa de fechamento da malha, também chamada de retroalimentação do sistema. Outra característica importante apresentada é o tipo de controlador utilizado neste sistema, através do bloco Controlador é possível verificar as siglas PID, que significam o tipo de controle, sendo um controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID).

A terceira etapa é a criação de um diagrama esquemático, onde o projetista deve realizar uma análise e verificar os fenômenos do sistema. Outra tarefa importante desta etapa são as aproximações, onde o projetista despreza ou inclui os fenômenos do sistema, caso seja

considerado muitas variáveis o sistema se torna complexo, dificultando na extração de um modelo matemático (próxima etapa), descartando muitas variáveis o modelo matemático não descreve adequadamente o sistema real.

O quarto passo é o desenvolvimento de um modelo matemático. Através de leis da física o projetista realiza simplificações do diagrama esquemático e modela o sistema matematicamente. As leis de Kirchhoff e Newton são exemplos de leis que permitem ser utilizadas para extração do modelo, as leis citadas conduzem a modelos matemáticos que relacionam a saída com a entrada de sistemas dinâmicos. A eq. 21 apresenta um desses modelos, que é uma equação diferencial linear invariante no tempo.

$$a^n \frac{d^n c(t)}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} c(t)}{dt^{n-1}} + \dots + a_0 c(t) = b^n \frac{d^m r(t)}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} r(t)}{dt^{m-1}} + \dots + b_0 r(t) \quad (21)$$

Essa equação relaciona a saída $c(t)$, com a entrada $r(t)$, através dos parâmetros do sistema, a_i e b_j .

O quinto passo é a redução do diagrama de blocos. Cada bloco apresenta uma representação matemática, sendo que nesta etapa realiza-se conexões entre os blocos com o objetivo de formar apenas um bloco maior e que contenha todas as informações do sistema.

A última etapa refere-se a análise e o projeto. Nesta fase é verificado o desempenho do sistema, analisando se os requisitos do projeto são alcançados conforme a resposta do controle e da planta, é também realizado ajustes nos parâmetros do sistema. Para realizar os testes são utilizados sinais na entrada do sistema, esses sinais passam pelo controle e a planta, no final do processo é realizado a coleta dos dados de saída do sistema. A fim de facilitar os testes utiliza-se sinais simples na entrada, como por exemplo: impulso, degrau, rampa, senoide e parábola. Através dos sinais de entrada é possível obter as principais respostas de um sistema, que são as respostas transitórias, o erro de regime permanente, a estabilidade e a sensibilidade.

2.5.4 Controle PID – Proporcional, Integral e Derivativo

Existem vários tipos de sistemas de controle, como por exemplo: controle adaptativo, controle robusto, redes neurais, controle nebuloso, entre outros. A escolha de um controle impacta diretamente no funcionamento e no desempenho de uma planta/processo.

O controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é o controlador mais utilizado nas indústrias. O principal motivo desta utilização é o fato da estrutura ser relativamente simples. O controle PID é de fácil compreensão, implementação e flexível o suficiente para ser utilizado em diversas aplicações (THOMAZ, 2009).

O controle PID possibilita um ajuste mais refinado na medida em que a saída (resposta do processo) a ser controlada é ajustada. Porém, este controlador é de variável única, em outras palavras, o controle é realizado com base apenas na variável desejada (saída do sistema).

O controle clássico de PID é ajustado conforme seus ganhos de Proporcional, Integral e Derivativo, onde a compensação dos valores é baseada na eq. 22.

$$u(t) = k_p e(t) + \frac{k_p}{\tau_i} \int e(t) dt + k_p \tau_d \frac{d[e(t)]}{dt} \quad (22)$$

3 METODOLOGIA

3.1 Generalidades

O tratamento térmico de mosto na indústria sucroenergética requer uma tecnologia capaz de controlar independentemente o fluxo de dois fluidos a diferentes temperaturas, a fim de que a temperatura da mistura desses fluidos resulte em valores pré-definidos pelo usuário. Esta pesquisa limitou-se ao desenvolvimento da tecnologia propriamente dita para controle automatizado da variável de interesse mencionada. Trabalhos futuros poderão utilizar a tecnologia desenvolvida nessa pesquisa para estudos da eficácia do tratamento térmico conduzido a diferentes temperaturas na redução de microrganismos ou esterilização do mosto.

3.2 Etapas do desenvolvimento das bancadas de avaliação

O trabalho foi dividido em duas etapas. Na primeira (Etapa I) optou-se por instalar uma estrutura de testes avaliando misturas de líquidos em diferentes temperaturas. Essa estrutura foi nomeada de Bancada I e montada no Laboratório de Hidráulica do Departamento de Engenharia de Biosistemas da ESALQ/USP. Nesse estágio inicial de desenvolvimento do sistema de mistura foi suposto que o uso de água à temperatura ambiente e água quente com temperaturas entre 40 e 70°C era suficiente para o desenvolvimento e avaliação preliminar do sistema de mistura. Foi decidido não realizar os testes iniciais utilizando vapor por razões de segurança. Nessa etapa efetuou-se a comparação de dados obtidos experimentalmente com estimativas baseadas em termodinâmica para suporte a análise de resultados e melhor caracterização do sistema. Não foram realizadas tentativas de controle nessa etapa. Somente após comprovação de funcionamento do sistema nas condições da Etapa I, desenvolveu-se a Bancada II substituindo a linha de água quente por uma linha de vapor. Essa alteração denominou-se Etapa II.

Os testes com vapor realizados na Etapa II e Bancada II operaram com pressões em torno de 10 bar e temperaturas acima de 170°C, necessitando de equipamentos robustos e com maior grau de proteção. Devido a disposição de linhas de vapor e reservatórios metálicos a Bancada II foi desenvolvida no Departamento de Agroindústria, Alimentos e Nutrição da ESALQ/USP. Além disso, tubulações, conexões e acessórios disponibilizados pelo laboratório eram capazes de suportar as temperaturas e pressões de ensaio.

Os subitens abaixo descrevem aspectos comuns às duas bancadas da pesquisa (Bancada I e Bancada II).

3.2.1 Projeto mecânico do sistema de mistura

O sistema de mistura é o aparato que foi montado para a mistura de dois fluidos distintos sendo composto por um trocador de calor de contato direto (ou câmara de mistura, ou misturador), uma válvula proporcional, um sensor de temperatura e duas válvulas de retenção (Figura 6). O trocador de calor foi montado baseando-se num conceito bastante simples que emprega um “tê” como dispositivo para mistura de fluidos (Figura 1). O trocador de calor contém duas seções de entrada e uma de saída. Em uma das seções de entrada injeta-se o fluido a baixa temperatura e na outra seção injeta-se o fluido sob temperatura elevada. Cada uma das seções de entrada contém uma válvula de retenção que evita o fluxo de fluidos no sentido reverso. A elevada turbulência no tê promove a homogeneização dos fluidos e das correspondentes temperaturas, sendo que a mistura é descarregada através da seção de saída do trocador de calor. As tubulações contendo os fluidos a baixa temperatura, alta temperatura e mistura foram denominadas, respectivamente, linha fria, linha quente e linha da mistura.

A vazão através da linha fria supostamente é um requisito da aplicação, não sendo, portanto, controlada por mecanismos integrados ao sistema de mistura. Durante os experimentos realizados instalou-se um registro de gaveta de ½” para simulações de diferentes vazões na linha fria.

A vazão da linha quente foi controlada por uma válvula proporcional com as seguintes especificações: válvula do tipo esfera com duas vias, corpo da válvula em inox, diâmetro nominal de ½”, temperatura máxima de 240 °C, pressão máxima de 2 MPa (20 bar), atuador 24 Vcc de 40 N.m. A seção de escoamento da válvula proporcional é ajustável a partir de um sinal de controle que varia entre 2 e 10 Vcc. Essa tensão elétrica é gerada por um conversor digital-analógico (DAC) com resolução de 12 bits e, portanto, a seção de escoamento é ajustada por um sinal digital de controle que varia na faixa de valores entre 0 e 4095. O sistema eletrônico utilizado para controle desse atuador é descrito doravante.

A temperatura na linha de mistura foi monitorada utilizando uma termoresistência PT100 com as seguintes especificações: ligação a 3 fios, tubo de aço inox AISI 304 com diâmetro de 6 mm, rosca ½” BSP, cabeçote de alumínio tipo KNC, temperatura de trabalho de -50 a +300°C, haste com 20 mm de comprimento.

Em termos da aplicação, existe uma malha de controle (01) que utiliza os dados de temperatura da mistura para calcular o ajuste necessário na válvula proporcional. A válvula, por sua vez, realiza o controle da vazão da linha quente.

A Bancada I foi construída com tubos de PVC de diâmetro nominal de $\frac{1}{2}$ ", enquanto que a Bancada II foi construída com tubos e conexões de ferro galvanizado de diâmetro nominal de $\frac{1}{2}$ ". As alterações entre as bancadas foram realizadas devido as baixas temperaturas e pressões de trabalho na Bancada I, não sendo necessário tubos de ferro.

Figura 6 – Representação dos componentes do sistema de mistura (TT: Transmissor de temperatura)

3.2.2 Sistema eletrônico

O sistema eletrônico utilizado para validar o conceito/protótipo proposto e para automatizar as duas bancadas dos experimentos foi dividida em três blocos, (A), (B) e (C), conforme Figura 7. O referido hardware foi desenvolvido pela equipe do laboratório para aplicações diversas não sendo um circuito dedicado para a aplicação aqui descrita (Figura 8).

Os blocos mencionados foram denominados como: (A) aquisição de dados; (B) processamento e comunicação; (C) controle de atuadores. As tarefas executadas pelos blocos (A) e (C) foram gerenciadas pelo bloco (B). O bloco (B) foi conectado a um aplicativo de supervisão instalado em um computador, que realizou a interface/rede entre o computador e a placa eletrônica. O protocolo de comunicação Modbus RTU foi implementado para permitir a comunicação mestre-escravo entre o computador supervisor (unidade mestre) e a placa eletrônica (unidade escrava) conectados à rede RS-485. O bloco (A) teve a função de receber

e condicionar sinais provenientes de sensores, assim como dispõe de circuitos para proteção elétrica da placa. O bloco (C) controlou os atuadores, que, para a aplicação foram: válvulas proporcionais e válvulas solenoides. Válvulas solenoides foram dispositivos acessórios utilizados apenas na Etapa I do trabalho, sendo ativadas e desativadas por relés, havendo apenas dois estados, totalmente abertas ou totalmente fechadas. Já as válvulas proporcionais foram utilizadas tanto na Etapa I quanto na Etapa II. Essas válvulas receberam sinais analógicos variando entre 2 e 10 Vcc, convertidos por um conversor digital analógico (DAC) de 12 bits. Com isso, o sinal de controle dessas válvulas variou entre 0 e 4095, onde 0 resultou na condição em que a válvula esteve totalmente fechada e 4095, totalmente aberta.

Figura 7 - Diagrama de blocos do circuito: (A) Aquisição de dados; (B) Processamento e comunicação; (C) controle de atuadores

Figura 8 - Placa eletrônica de controle e aquisição de dados

O microcontrolador do bloco (B) foi programado em linguagem C e dispõe de rotinas internas que implementaram dois controladores PID independentes. A saída de cada

controlador era um sinal analógico de tensão elétrica gerado pelo DAC, sendo que a placa dispôs de dois DACs.

O aplicativo de supervisão foi desenvolvido usando linguagem C # através do *software* Microsoft Visual Studio 2017. Ele foi executado em um computador que operou como unidade mestre da rede. O aplicativo dispôs de funcionalidades mínimas necessárias para configurar condições e registrar dados de ensaio (Figura 9).

Figura 9 – Tela do aplicativo supervisório

3.2.3 Aferição dos sensores

Os instrumentos de medição utilizados no trabalho foram aferidos antes do uso nos experimentos.

Na Bancada I foram utilizados três sensores de temperatura e dois medidores de vazão. O monitoramento das temperaturas nas linhas das Bancadas I foram realizados através de três sensores de temperatura PT100, os quais foram acoplados ao sistema de aquisição de dados e suas curvas características foram determinadas submetendo-se a imersão em água cuja temperatura era determinada utilizando termômetro de vidro. Para a medição de vazão da linha de água fria e da mistura foram utilizados dois medidores eletromagnéticos, o da linha

fria opera na faixa de 0 a 90 L h⁻¹, já a linha de mistura uma faixa de 0 a 500 L h⁻¹. A aferição desses medidores foi realizada através da comparação dos resultados entre os dois medidores quando submetidos a mesma vazão.

A Bancada II contou com dois sensores de temperatura e dois sensores de vazão. Para monitoramento da temperatura na Bancada II foram utilizados dois sensores PT100, os quais seguiram o mesmo procedimento de aferição da Bancada I. Os sensores foram acoplados ao sistema de aquisição de dados e suas curvas características foram determinadas submetendo-se a imersão em água cuja temperatura era determinada utilizando termômetro de vidro. A medição de vazão da linha de água fria foi realizada por um medidor de vazão eletromagnético que opera na faixa de 0 a 1 m³ h⁻¹, com resolução de 0,001 m³ h⁻¹ e incerteza de medição de 0,5%. A calibração deste medidor foi realizada através de uma comparação com outro medidor eletromagnético de vazão que opera na faixa de 0 a 4 m³ h⁻¹, com resolução de 1 L h⁻¹. Essa comparação foi feita para se certificar que o instrumento de medição estava operando adequadamente. O medidor que opera na maior faixa de medição (0 a 4 m³h⁻¹) foi calibrado por laboratório externo, sendo um instrumento de medição cujas indicações são confiáveis. O medidor de menor vazão (0 a 1 m³h⁻¹), utilizado durante os experimentos, não havia sido submetido a calibração certificada e, portanto, era necessária a verificação da consistência de suas indicações de vazão. O monitoramento da vazão na linha de mistura da Bancada II foi feito através de uma placa de orifício. O levantamento da curva característica de vazão em função da pressão diferencial utilizou-se como referências as vazões indicadas pelo medidor eletromagnético com faixa de medição de 0 a 1 m³ h⁻¹ da linha de água fria.

3.3 Etapa 1 – Mistura de líquidos em diferentes temperaturas

3.3.1 Estrutura de ensaios

A Figura 10 representa a Bancada I de testes montada para desenvolvimento e avaliação do sistema de mistura quando operado utilizando água fria (na temperatura ambiente) e água quente (40 a 70 °C).

A bancada de testes contou com dois reservatórios de 200 L que propiciaram uma carga hidráulica praticamente constante de 5 mca que alimentava as linhas de água fria e água quente. O reservatório contendo água quente foi equipado com uma resistência elétrica com 9000 W de potência e um controlador ON/OFF de temperatura responsável por ajustar e

manter a temperatura da água dentro do reservatório no valor pré-definido para execução dos ensaios. A linha de água fria interligou o reservatório de água fria e a câmara de mistura, sendo que a vazão através dessa tubulação foi controlada por válvula proporcional e monitorada por um medidor de vazão. De modo similar, a linha de água quente conduziu água do respectivo reservatório até a câmara de mistura, sendo a vazão também controlada por válvula proporcional. A temperatura dos líquidos foi monitorada na entrada das duas válvulas proporcionais e logo após a câmara de mistura utilizando termoresistências (PT100), enquanto que a vazão foi medida nas linhas de água fria e de mistura utilizando medidores eletromagnéticos de vazão. A vazão na linha de água quente foi calculada com base na diferença entre as outras duas vazões observadas. O líquido aquecido (mistura) conduzido pela linha de mistura foi armazenado em um reservatório denominado tanque da mistura. Periodicamente, acionava-se uma motobomba para elevação de água para os tanques de água fria e de água quente, sendo que duas válvulas solenoides controlavam o fluxo de água entre a motobomba e os referidos tanques. A Figura 10 apresenta, esquematicamente, os componentes da estrutura montada para execução dos ensaios com mistura de líquidos a diferentes temperaturas. A Figura 11 apresenta o sistema de mistura desenvolvido conforme o esquema da Figura 10.

Figura 10 - Fluxograma de instrumentação da bancada montada para ensaios com mistura de líquidos a diferentes temperaturas (TT = Transmissor de temperatura, FT = Transmissor de vazão)

Figura 11 – Sistema de mistura e transmissores utilizados na bancada para ensaios com líquidos a diferentes temperaturas

3.3.2 Comparação de dados experimentais com estimativas baseadas em termodinâmica

A fundamentação teórica sobre termodinâmica descrita na revisão bibliográfica foi confrontada com resultados obtidos experimentalmente. O objetivo desse estudo foi comprovar que os modelos teóricos adotados de fato correspondem aos processos relacionados com a aplicação em questão.

Realizou-se a coleta de dados de temperaturas das linhas fria, quente e de mistura, assim como das vazões através das linhas fria e de mistura. A vazão na linha de água quente foi calculada com base na diferença entre as outras duas vazões. Foram realizados ensaios

com sinais digitais de controle das válvulas proporcionais entre 700 e 1300, com incrementos de 100, totalizando 49 condições de ensaio. Tais valores correspondem aos limites operacionais identificados durante testes preliminares, sendo que fora desses limites não havia alterações na vazão indicada pelos instrumentos de medição.

Esses ensaios foram conduzidos na bancada montada conforme a Figura 10 e Figura 11. Todos os sensores e atuadores foram ligados a placa eletrônica. Todos os atuadores e toda a aquisição e registro de dados foi realizada a partir do computador. Após a estabilização das temperaturas nas linhas fria e quente iniciaram-se os ensaios para validação termodinâmica.

Para as análises termodinâmicas de misturas de água no estado líquido, verificou-se que a eq. 17 e a eq. 19 conduziram aos mesmos resultados. Desse modo, os dados experimentais foram confrontados com estimativas baseadas na eq. 19, sendo que o volume de controle foi constituído por uma entrada de água fria, uma entrada de água quente e uma saída contendo a mistura dos líquidos. Para essas condições e reorganizando a eq. 19, a temperatura resultante da mistura foi obtida pela eq. 23.

$$T = \frac{\dot{m}_1 T_1 + \dot{m}_2 T_2}{\dot{m}_1 + \dot{m}_2} \quad (23)$$

A conversão entre vazões volumétricas e vazões mássicas utilizaram a eq. 5, sendo que a massa específica da água foi estimada utilizando a eq. 8.

3.4 Etapa 2 – Mistura de líquido frio e vapor

3.4.1 Estrutura de ensaios

A estrutura de ensaios utilizada nessa etapa está ilustrada no esquema da Figura 12 e a montagem é apresentada através da Figura 13. A água fornecida para a linha fria foi armazenada em um reservatório com capacidade de 5000 L, no qual a temperatura do líquido estava em equilíbrio com a temperatura ambiente. A água captada do reservatório foi pressurizada por uma motobomba KSB modelo C500. A vazão através da linha fria foi medida utilizando o medidor eletromagnético de vazão que operou na faixa de 0 a 1 m³ h⁻¹. A medição da temperatura na linha fria foi realizada utilizando um termômetro de vidro, medindo-se a temperatura da água diretamente no reservatório. A temperatura da água no reservatório não sofreu variações durante os ensaios, pois o volume do reservatório era grande em relação a vazão demandada pela linha fria.

A linha quente transportou vapor sob pressões entre 800 e 900 kPa e temperaturas entre 174 e 178 °C. O vapor foi gerado por uma caldeira da marca Domel, modelo CCV, vertical e alimentada por GLP – Gás Liquefeito de Petróleo. Um registro do tipo esfera foi utilizado para habilitar o fluxo de vapor para a bancada de ensaios.

Na saída do sistema de mistura instalou-se um medidor de vazão do tipo placa de orifício, com diâmetro nominal do tubo de 25 mm e diâmetro nominal do orifício de 6,25 mm. Optou-se por utilizar uma placa de orifícios nessa linha devido a possibilidade de operação com temperaturas elevadas. O transmissor de pressão diferencial instalado na placa de orifício tem uma faixa de medição de 0 a 500kPa, com resolução de 0,01 kPa. A indicação de pressão diferencial foi utilizada para estimar a vazão através da linha de mistura, sendo que a vazão na linha quente foi obtida com base na diferença entre as vazões medidas na linha de mistura e na linha fria.

O monitoramento das temperaturas na linha de vapor e na linha de mistura foram realizados utilizando-se dois sensores de temperatura PT100. O sensor na linha de mistura foi responsável pelo fechamento da malha de controle do sistema.

Figura 12 – Esquema da estrutura de ensaios utilizada para os experimentos na Etapa 2

Figura 13 – Identificação dos componentes da Bancada II: (a) Medidor eletromagnético de vazão; (b) Termoresistência PT100 da linha quente; (c) Válvula proporcional; (d) Termoresistência PT100 da linha de mistura; (e) Placa eletrônica; (f) Medidor de vazão do tipo placa de orifício; (g) Medidor de pressão diferencial

3.4.2 Comparação de dados experimentais com estimativas baseadas em termodinâmica

Assim como na etapa 1 já descrita, foram comparados dados de temperatura estimados e obtidos experimentalmente.

A partir da eq. 17, definiu-se a eq. 24 para cálculo da entalpia específica do fluido na câmara de mistura (h_M).

$$h_M = \frac{\dot{m}_F h_F + \dot{m}_Q h_Q}{\dot{m}_M} \quad (24)$$

Na sequência utilizou-se o aplicativo *Computer Aided Thermodynamic Tables 3* (CATT3) para estimativa da temperatura da mistura a partir dos dados de h_M e de pressão na câmara de mistura. A pressão na câmara de mistura foi calculada pela soma da pressão atmosférica local (valor assumido constante e igual a 100 kPa) mais a perda de carga indicada pelo transmissor diferencial de pressão acoplado a placa de orifício. Os valores de vazão volumétrica obtidos nas linhas frias e de mistura foram convertidos em valores de vazão mássica utilizando a massa específica da água calculada em função da temperatura conforme eq. 8. Valores medidos e estimados da temperatura da água na câmara de mistura foram confrontados e o erro nas estimativas foi analisado com base em gráfico de frequência acumulada de erros.

3.4.3 Identificação do sistema e sintonização do controlador

Ensaaios preliminares indicaram que a vazão máxima através da linha fria era de aproximadamente 900 L h^{-1} , sendo que a pressão nessa linha se manteve em aproximadamente 200 kPa. Tanto ao longo dos ensaios preliminares quanto durante os ensaios a seguir descritos, a temperatura na linha de vapor manteve-se entre 174 e 178°C e a pressão entre 800 e 900 kPa.

A identificação do sistema foi realizada considerando a vazão de referência de 600 L h^{-1} na linha fria, sendo que esse valor foi arbitrado e assumido como uma condição intermediária de operação do sistema.

Antes da etapa de coleta de dados para identificação do sistema, ajustou-se a vazão de referência na linha de água fria e verificou-se o intervalo de valores para operação da válvula proporcional responsável pelo controle de vazão na linha de vapor. A válvula proporcional foi controlada por um sinal digital de 12 bits, que varia entre 0 e 4095. Quanto maior o sinal, maior a abertura da válvula. Experimentalmente, observou-se que o sinal mínimo que proporcionava uma variação de temperatura na linha de mistura era 800 e o sinal que proporcionava temperatura de aproximadamente 100°C era 1400. Não foram realizados ensaios visando ajustes de temperatura acima de 100°C por limitações operacionais. O reservatório contendo a água fria era equipado com um motobomba cuja pressão máxima era de 220 kPa, e essa motobomba não podia ser substituída facilmente. Observou-se que, ao tentar obter temperaturas da mistura acima de 100°C, o fluxo e a pressão causada pelo vapor na zona de mistura aumentava e acabava fechando a válvula de retenção que controlava a passagem de água fria. Desse modo, a vazão de água fria tornava-se nula e a temperatura da mistura igualava-se a temperatura da linha de vapor. A solução para permitir o estudo de temperaturas da mistura mais elevadas seria utilizar uma motobomba capaz de injetar água na câmara de mistura às pressões equivalentes aquelas da linha de vapor, ou seja, em torno de 900 kPa.

Dados os limites do sinal de controle da válvula proporcional, foram gerados 30 valores aleatórios entre 800 e 1400, utilizados como dados de entrada para o procedimento de identificação do sistema. Os valores aleatórios foram gerados pelo Microsoft Excel®. Para cada um desses 30 valores, foram coletados 40 registros de dados na frequência de aquisição de 0,6 Hz. A frequência de aquisição de dados mencionada corresponde ao valor máximo tolerado pelo sistema de aquisição de sinais, sendo suficiente para a referida aplicação. O número de registros coletados para cada valor de entrada do sistema foi determinado com

base em ensaios preliminares, sendo suficientemente longo para permitir que a saída do sistema (temperatura na linha de mistura) entrasse em equilíbrio após uma perturbação devido a alteração na vazão da linha de vapor.

O procedimento de identificação do sistema consistiu no ajuste da vazão da linha fria para 600 L h^{-1} , seguido por uma sequência de valores na entrada do sistema e monitoramento/aquisição dos valores da saída do sistema. Os valores de entrada referiam-se a alterações na seção de abertura da válvula proporcional responsável pelo controle de fluxo de vapor. O monitoramento da saída do sistema referia-se a leitura da temperatura após a câmara de mistura de líquido e vapor.

Os dados de entrada e saída do sistema foram gravados no computador através do sistema eletrônico e do supervisor. A aquisição de dados permitiu a realização do levantamento da função de transferência do sistema através do software Matlab utilizando o pacote *System Identification*.

Uma vez coletado os dados das entradas e saídas do sistema, esses dados foram carregados e separados no *software* Matlab em dois grupos, sendo eles: (a) dados para identificação da função de transferência característica do sistema; (b) dados para validação da referida função de transferência.

Dois aplicativos do Matlab auxiliaram na análise dos dados: *System Identification* e *PID Tuner*. Através do *System Identification*, foi possível estimar o modelo matemático da planta, ou seja, a função de transferência. Conhecido o modelo matemático, o *PID Tuner* auxiliou no levantamento dos parâmetros do controle.

No *System Identification* foi verificado o número de polos e zeros da função de transferência que melhor caracterizava o sistema avaliado. Para isso, foi considerado dados contínuos e números de polos e zeros entre 1 e 3. Não foi escolhido a modelagem através de modelo discreto pois a simulação de eventos discretos abrange o estudo de modelos de simulação cujas variáveis mudam de estado instantaneamente em pontos específicos do tempo, em contraste ao que ocorre com modelos contínuos, cujas variáveis podem mudar de estado continuamente no decorrer do tempo. Além disso, poucos sistemas, na prática, são totalmente discretos ou totalmente contínuos, sendo comum durante a modelagem considerar o modo predominante de ocorrência dos eventos no sistema (SAKURADA, 2009). Conforme Coelho (2015), os modelos matemáticos utilizados em controle de processos não necessitam ser exatos, e sim que se tenham um modelo adequado para determinada aplicação. Desta forma, teste preliminares indicaram que a escolha de polos e zeros de 1 a 3 era suficiente para aplicação.

Uma vez identificada a função de transferência que caracteriza o sistema avaliado, partiu-se para a etapa de sintonização do controlador PID, na qual utilizou-se o pacote *PID Tuner*. Na sintonização do controlador estabeleceu-se os seguintes critérios: (1) tempo de estabilização da variável de saída do sistema em torno de 3 minutos; e, (2) sobressinal tolerável de até 10%. Esses critérios foram atribuídos de modo subjetivo com base nas expectativas de desempenho do controlador para a aplicação em questão.

3.4.4 Experimentos para avaliação do desempenho do controlador

Após a sintonização dos parâmetros do controlador PI, os parâmetros foram configurados na placa controladora e realizaram-se ensaios para avaliação do desempenho do controlador. Os ensaios foram realizados na Bancada II (Figura 12 e Figura 13), sendo avaliadas quatro condições de vazões na linha fria: 200, 400, 600 e 800 L h⁻¹. Cada vazão na linha fria foi ajustada manualmente, sendo que as indicações de vazão volumétrica foram fornecidas pelo medidor eletromagnético de vazão. Para cada vazão na linha fria foram realizados ensaios variando a temperatura alvo (*setpoint*) entre 60°C e 100°C, incrementando e reduzindo valores sequencialmente em intervalos de 10 °C. Cada *setpoint* foi mantido por aproximadamente 250 segundos. Testes preliminares indicaram que este tempo era suficiente para estabilização do sistema. Ao final, teve-se um total de 40 condições de ensaios.

Os tempos de aquisição de dados nessa etapa foram realizados em intervalos de aproximadamente 2,3 segundos, que corresponde ao menor intervalo de aquisição de dados possível para a placa eletrônica quando a função de controle PID está habilitada. O intervalo de aquisição não foi restritivo para a aplicação em questão. Antes de iniciar a coleta de dados em cada uma das vazões de ensaio, manteve-se água fria fluindo nas tubulações por 5 minutos a fim de assegurar equilíbrio da temperatura no sistema hidráulico e padronização das condições iniciais de testes. Em seguida, através do supervisor (computador), o sistema de controle da bancada foi habilitado. Ao habilitar o sistema, os ganhos do controlador e os valores das temperaturas alvo (*setpoint*) foram carregados na placa eletrônica. Desta forma, a cada 250 segundos, o sistema eletrônicos/supervisor ajustava nova temperatura alvo. Ao final, a bancada era desligada e uma nova vazão na linha fria era ajustada, reiniciando o processo.

Durante os ensaios foi realizado a coleta dos seguintes dados: temperatura da linha fria, temperatura da linha quente, temperatura da mistura, vazão da linha fria, vazão da linha de mistura e a posição da válvula proporcional. A medição da temperatura da linha fria foi

realizada através de um termômetro de vidro. O reservatório de água fria era grande em relação a demanda do sistema, desta forma foi considerado que a temperatura da linha fria não sofreu alterações durante os ensaios.

A medição da temperatura da linha quente e da mistura foram realizadas através de duas termoresistências PT100. A medição da vazão da linha fria foi realizada através do medidor de vazão eletromagnético e a vazão da mistura foi realizada pela placa de orifício. A vazão da linha de água quente foi calculada com base na diferença entre as outras duas vazões. A válvula proporcional responsável pela injeção de vapor na linha quente também teve a sua posição medida durante os ensaios. O modelo de válvula utilizado possui um sinal elétrico de retorno, ligado à placa eletrônica e a sua posição foi gravada durante os ensaios. Todas as medições e sinais foram gravados no computador através do sistema eletrônico e do supervisor.

3.4.5 Índices de desempenho do controlador

Os critérios mais utilizados para avaliação do desempenho de controladores PID são obtidos pela integral de funções do erro ou de funções ponderadas do erro. O erro num dado instante de tempo, $e(t)$, é obtido pelo desvio entre o valor de saída do sistema e o valor alvo (*setpoint*). Abaixo são apresentados alguns índices utilizados para avaliar o desempenho de um controlador, conforme descrito por Ogata (2010):

Integral do Erro Quadrático (ISE)

$$ISE = \int_0^T [e(t)]^2 dt \quad (25)$$

Integral do Erro Absoluto (IAE)

$$IAE = \int_0^T |e(t)| dt \quad (26)$$

Integral do Erro Quadrático ponderado pelo tempo (ITSE)

$$ITSE = \int_0^T t [e(t)]^2 dt \quad (27)$$

Integral do Erro Absoluto ponderado pelo tempo (ITAE)

$$ITAE = \int_0^T t |e(t)| dt \quad (28)$$

O limite superior da integral, T , deve ser um tempo suficientemente grande para abranger tanto o período transitório quanto o período em regime permanente da variável de saída do sistema.

Nesse trabalho, optou-se por utilizar o IAE e o ITAE para as análises. O resultado das integrações foi obtido pelo somatório de valores calculados em planilha eletrônica.

3.4.6 Simulações do sistema utilizando o pacote Simulink do Matlab

Utilizou-se o pacote Simulink do Matlab para realizar simulações dos experimentos descritos no tópico anterior. A Figura 14 representa o diagrama de blocos da rotina desenvolvida para realizar as simulações.

Figura 14 - Diagrama de blocos que representa as simulações realizadas utilizando o pacote Simulink do Matlab

O bloco “a” do diagrama de bloco refere-se aos valores alvo de temperatura (*setpoint*) avaliados nos experimentos e confrontados com simulações do Matlab. O bloco “b” realiza a subtração entre o valor do *setpoint* e o retorno da saída (realimentação). O bloco “c” tem a tarefa de controlar o sistema, ele recebe a diferença entre o *setpoint* e o retorno da saída, também chamada de erro, e realiza os cálculos de controle. O bloco “d” refere-se à função de transferência do sistema (modelo matemático do processo). Ligado à saída da função de transferência se encontra o bloco “e”; este bloco é utilizado para gerar uma zona morta. A zona morta foi acrescentada no diagrama, pois, durante a identificação do sistema as áreas não atuantes (mortas) não foram consideradas e a identificação foi realizada apenas com as faixas operacionais dos atuadores. O bloco “f” acrescenta ao valor de saída do sistema a temperatura ambiente, que foi de 26°C para todos os testes. O bloco “g” realiza a soma da temperatura ambiente e o valor de saída do sistema após o tempo morto. Os itens “h”, “i” e “j” formatam os sinais para gravação dos dados da saída do sistema (temperatura da mistura simulada) em planilhas.

Após a montagem do diagrama de blocos no software, o sistema foi simulado e os dados de saída do sistema (temperatura da mistura) foram armazenados em planilhas para posterior comparação entre os valores reais e simulados. A sequência dos valores de *setpoint* utilizados para a simulação foi a mesma utilizada para os experimentos em laboratório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Aferição dos sensores

Os sensores utilizados foram aferidos antes da execução dos experimentos, sendo os resultados apresentados na Figura 15. O medidor que opera na faixa de medição de 0 a 4 m³h⁻¹ foi calibrado por laboratório externo, sendo um instrumento de medição cujas indicações são confiáveis. A Figura 15A indica que os dois medidores eletromagnéticos de vazão (0 a 4 m³h⁻¹ e 0 a 1 m³h⁻¹) apresentaram indicações bastante similares e, portanto, ambos os medidores estão operando adequadamente. A Figura 15B indica a curva de vazão em função da pressão diferencial no medidor de vazão tipo placa de orifício. Teoricamente, a vazão em placas de orifício é obtida por uma equação potencial que contém um coeficiente que multiplica a pressão diferencial elevada a 0,5 (DELMEE, 2003). Para obter melhor ajuste, optou-se pelo uso de um modelo potencial cujo expoente foi de 0,4865. O elevado coeficiente de determinação (R²) indica adequado ajuste do modelo potencial utilizado para correlacionar as variáveis. A vazão assumida como valor verdadeiro para a calibração da placa de orifício foi fornecida pelo medidor eletromagnético de vazão que opera na faixa de 0 a 1 m³h⁻¹.

As Figura 15C e Figura 15D mostram as equações utilizadas para estimar as indicações de temperatura medidas pelas termoresistências instaladas nas linhas quente e de mistura. Ambos os sensores não dispõem de tela para mostrar as temperaturas medidas e, desse modo, as equações apresentadas são indispensáveis para as estimativas de temperatura. A resposta linear de ambos os sensores representa o comportamento típico desse tipo de sensor.

Figura 15 - Aferição de sensores utilizados na Etapa 2 da pesquisa: (A) comparação entre indicações dos medidores eletromagnéticos de vazão; (B) curva característica de vazão em função de pressão diferencial da placa de orifício; (C) equação de calibração do sensor de temperatura instalado na linha de mistura; (D) equação de calibração do sensor de temperatura instalado na linha de vapor

4.2 Etapa 1 – Mistura de líquidos

4.2.1 Dados coletados nos ensaios misturando água em diferentes temperaturas

A Tabela 1 contém dados medidos em 49 condições de ensaios resultantes de diferentes ângulos de aberturas das duas válvulas proporcionais. Os resultados referem-se aos ensaios envolvendo mistura de líquidos e foram utilizados para comparar e validar os modelos termodinâmicos para estimativa da temperatura final de misturas de líquidos a diferentes temperaturas.

Tabela 1 - Dados coletados para validação de equacionamento termodinâmico – mistura de líquidos

Condição de ensaio	Linha de água fria			Linha de água quente			Mistura
	Abertura da válvula (0-4095)	Vazão (L/h)	Temperatura (°C)	Abertura da válvula (0-4095)	Vazão (L/h)	Temperatura (°C)	Temperatura (°C)
1	700	19,3	25,7	700	10,4	46,0	30,3
2	700	19,2	25,8	800	35,5	62,9	48,0
3	700	19,1	25,9	900	59,1	64,2	53,9
4	700	18,9	26,1	1000	76,7	64,8	57,2
5	700	18,8	26,1	1100	88,5	66,1	58,5
6	700	19,2	26,2	1200	95,4	66,1	59,0
7	700	19,1	26,2	1300	99,3	66,2	59,8
8	800	42,4	26,3	700	21,7	61,8	39,5
9	800	42,6	26,0	800	33,9	58,8	40,7
10	800	42,3	26,1	900	57,7	60,0	45,8
11	800	42,1	26,1	1000	76,3	60,8	48,5
12	800	41,4	29,1	1100	88,1	68,1	53,0
13	800	41,2	29,6	1200	94,4	68,8	54,4
14	800	41,1	30,0	1300	98,3	69,2	55,4
15	900	61,0	30,6	700	20,7	64,1	40,0
16	900	60,8	30,8	800	31,7	66,2	42,9
17	900	60,5	31,0	900	55,0	67,5	47,8
18	900	60,1	31,0	1000	73,1	68,8	50,4
19	900	59,7	31,1	1100	84,6	69,3	52,2
20	900	59,3	31,1	1200	91,1	69,3	53,2
21	900	59,2	31,2	1300	94,9	69,3	53,9
22	1000	76,6	31,0	700	20,1	52,8	37,6
23	1000	76,1	31,2	800	31,4	54,5	39,1
24	1000	75,6	31,3	900	55,3	55,7	41,9
25	1000	75,0	31,4	1000	72,5	56,1	43,6
26	1000	74,6	31,4	1100	81,6	56,2	44,6
27	1000	74,2	31,4	1200	88,6	56,0	45,3
28	1000	73,9	31,4	1300	92,8	56,5	45,6
29	1100	84,1	26,2	700	7,5	52,4	29,2
30	1100	83,5	26,4	800	31,3	61,8	34,3
31	1100	82,9	26,4	900	55,7	64,1	38,5
32	1100	82,1	26,5	1000	71,9	64,3	41,1
33	1100	81,6	26,6	1100	83,4	65,1	42,7
34	1100	81,2	26,6	1200	89,7	65,1	43,6
35	1100	80,0	26,6	1300	94,5	65,2	44,7
36	1200	88,2	26,6	700	6,7	49,4	29,2
37	1200	81,6	26,9	800	38,2	57,7	33,8
38	1200	86,7	27,0	900	54,5	59,1	37,6
39	1200	86,0	27,1	1000	73,0	59,8	40,2
40	1200	85,4	27,2	1100	82,3	59,9	41,5
41	1200	85,0	27,2	1200	89,6	59,8	42,4
42	1200	84,1	27,3	1300	94,8	59,8	43,0
43	1300	90,7	27,5	700	6,7	50,8	29,8

44	1300	90,0	27,6	800	31,3	59,0	34,8
45	1300	89,2	27,8	900	54,9	60,0	38,5
46	1300	88,5	27,9	1000	71,6	60,6	41,1
47	1300	88,0	27,9	1100	83,4	61,4	42,7
48	1300	87,5	27,9	1200	90,2	61,8	43,6
49	1300	87,2	28,0	1300	94,3	62,4	44,1

Com base nos dados apresentados na Tabela 1 e na eq. 19, estimou-se a temperatura da mistura para as condições avaliadas. A Figura 16 ilustra o resultado das análises comparando valores estimados e observados para a temperatura da mistura. A eq. 19, embora simples, mostrou-se adequada para a estimativa da temperatura da mistura de águas à diferentes temperaturas. Em 82,49% das estimativas, o erro relativo das estimativas em relação aos valores observados não ultrapassou 5% (Figura 16). É bastante provável que os pequenos desvios entre valores estimados e observados esteja associado principalmente a incertezas e imperfeições nos sistemas de medição. Esse resultado era esperado visto que essas estimativas são básicas e consagradas no contexto da termodinâmica.

Figura 16 - Comparação de valores observados e estimados da temperatura resultante da mistura de águas fria e quente e curva de frequência acumulada de erros nas estimativas de temperatura da mistura

4.3 Etapa 2 – Mistura de líquido e vapor

4.3.1 Comparação de valores estimados e medidos de temperatura na câmara de mistura

A Figura 17A compara dados estimados e medidos de temperatura da água na câmara de mistura. O fluido na câmara de mistura é resultado da mistura de água a 26°C sob pressão manométrica de aproximadamente 200 kPa com vapor a 178°C e pressão manométrica de 850 kPa. Tanto os valores de pressão quanto de temperatura nas linhas fria e quente mantiveram-se relativamente estáveis durante os testes. Os dados apresentados referem-se aos ensaios conduzidos nas vazões de referência de 400, 600 e 800 L h⁻¹ na linha fria.

A Figura 17B indica desvios entre valores observados e estimados, assumindo que os dados observados representam os valores verdadeiros. Observa-se que as estimativas para a vazão de referência de 800 L h⁻¹ apresentaram erros relativos inferiores a 4,7% e, portanto, indicam que o equacionamento termodinâmico adotado estima bem as relações térmicas de interesse. Por outro lado, erros relativos máximos de 13,8% e 51,4% foram observados para as estimativas nas vazões de referência de 600 e 400 L h⁻¹, respectivamente. A pressão na câmara de mistura foi obtida matematicamente somando-se a pressão atmosférica, assumida igual a 100 kPa, e a pressão diferencial medida pelo transmissor de pressão instalado na placa de orifício, que estava a jusante da câmara de mistura. Sob vazões de referência mais baixas, a vazão através da placa de orifício era menor, logo a pressão diferencial medida também era menor. A provável justificativa do maior erro relativo nas vazões menores está associada aos baixos valores de pressão diferencial medidas sob essas vazões, os quais estavam próximo do limite inferior de medição do transmissor de pressão diferencial utilizado. Portanto, supõe-se que os elevados erros relativos nas vazões de referência de 400 e 600 L h⁻¹ são devido à elevada incerteza na medição de pressão diferencial nessas condições de ensaio, ou seja, o instrumento utilizado para medição de pressão diferencial não era apropriado para realizar medições na faixa correspondente a essas condições de ensaio.

Figura 17 - Valores medidos e estimados de temperatura da água na câmara de mistura (A); frequência acumulada de erros relativos nas estimativas de temperatura da água na câmara de mistura (B)

4.3.2 Identificação da função de transferência

A Figura 18 ilustra como a temperatura na câmara de mistura (saída do sistema) varia quando se altera a seção de escoamento através da linha quente (entrada do sistema), mantendo-se constante a vazão na linha fria. Alterações de valores na entrada do sistema (*setpoint*), conduzem a variações na saída do sistema, sendo que essas variações são caracterizadas por um período transitório seguido pela estabilização da variável de saída.

A Figura 18 apresenta o conjunto de dados utilizados para identificação e validação da função de transferência que caracteriza o sistema. A identificação do sistema foi realizada considerando a vazão de referência de 600 L h^{-1} na linha fria, sendo que esse valor foi assumido como uma condição intermediária de operação do sistema. A variável de entrada foi o sinal digital correspondente a seção de abertura da válvula proporcional responsável pelo controle de fluxo de vapor, enquanto que a variável de saída do sistema foi o sinal digital correspondente a temperatura na câmara de líquido e vapor. A expressão dos valores utilizando sinais digitais de 12 bits (números entre 0 a 4095) teve como objetivo reduzir erros relacionados a coeficientes de conversão. A primeira metade dos valores observados foi utilizada para o ajuste da função de transferência, enquanto que a segunda metade dos dados foi reservada para a validação da função matemática obtida utilizando o pacote *System Identification* do Matlab.

Figura 18 - Conjunto de dados coletados para identificação e validação da função de transferência característica do sistema

No aplicativo *System Identification* foi verificado o número de polos e zeros da função de transferência que melhor caracterizava o sistema avaliado. Para isso, foram considerados dados contínuos e números de polos e zeros entre 1 e 3 (Tabela 2).

Tabela 2 - Parâmetros utilizados no levantamento da função de transferência

Identificação	Número de polos	Número de zeros	Tipo de dado	Qualidade do ajuste, FIT (%)*
tf1	2	1	contínuo	52,70
tf2	2	2	contínuo	78,23
tf3	3	1	contínuo	46,97
tf4	3	2	contínuo	-200,4
tf5	3	3	contínuo	46,91

* FIT = Porcentagem das variações na saída do sistema reproduzidas pelo modelo, sendo que quanto maior esse valor, maior é a qualidade do ajuste do modelo aos dados experimentais.

Com base nos resultados mostrados na Tabela 2, a melhor qualidade de ajuste foi observada para uma função de transferência com dados contínuos caracterizada por 2 polos e 2 zeros. Para essa condição, considerada como a melhor aproximação matemática do sistema, o modelo matemático foi capaz de explicar 78,23% da variabilidade nos dados de saída do sistema. A Figura 19 apresenta uma comparação entre o conjunto de dados de validação (dados observados) e os dados estimados pela função de transferência selecionada, com 2 polos e 2 zeros.

Figura 19 – Diagrama temporal para comparação entre valores observados (conjunto de dados reservado para validação) e valores estimados pela função de transferência com 2 polos e 2 zeros (tf2)

A função de transferência é definida como a razão entre a transformada de Laplace do sinal de saída e a transformada de Laplace do sinal de entrada do sistema. A eq. 29 representa a função de transferência adotada.

$$G(s) = \frac{-0,1656 s^2 + 0,0709 s + 0,00024982}{s^2 + 0,1079 s + 0,00016858} \quad (29)$$

4.3.3 Sintonização do controlador

Estabelecida a função de transferência características do sistema (eq. 29), utilizou-se o pacote *PID Tuner* do Matlab para escolha e sintonização do controlador. Embora a opção por um controlador PID (Proporcional, Integral e Derivativo) é a mais utilizada nas indústrias, nem sempre esses três componentes são necessários ou aplicáveis. Para o sistema em questão, tanto a válvula proporcional utilizada para controle da vazão na linha de vapor quanto o próprio processo de alteração de temperatura da água na câmara de mistura, eram processos relativamente lentos. De acordo com Lourenço (1997), nessas condições é comum a utilização de controladores do tipo Proporcional-Integral (PI). O controle PI é utilizado em sistemas com frequentes alterações de carga, sempre que o controlador Proporcional (P), por si só, não seja capaz de reduzir o erro estacionário a um nível aceitável. Contudo, o sistema deve ter alterações de cargas relativamente lentas, para evitar oscilações induzidas pela ação integral.

De fato, as tentativas de sintonização do controlador na opção PID sempre resultaram em valor nulo para o ganho diferencial (K_d). Por isso utilizou-se a opção de controle Proporcional-Integral (PI), sendo que os seguintes valores de ganho foram considerados apropriados para a aplicação: $K_p = 0,1127$ e $K_i = 0,08128$. Para a configuração selecionada, as seguintes especificações de desempenho foram estimadas pelo *PID Tuner*: (1) tempo de subida de 25,4 s; (2) sobressinal máximo de 9,61% acima do valor de regime; (3) tempo de acomodação de 186 s. É importante deixar claro que as especificações de desempenho são valores estimados pelo *PID Tuner* com base na função de transferência e nos valores de ganho estabelecidos para o controlador PI. A Figura 20 ilustra a simulação da resposta ao degrau unitário para a sintonização selecionada do controlador PI. A simulação foi realizada utilizando a função de transferência apresentada na eq. 29 e os valores de ganho do controlador PI. O ponto “a” indica o tempo de subida, ou seja, o tempo necessário para que a variável de saída do sistema atinja de 10% a 90% do valor correspondente a condição estacionária ou valor de regime. O ponto “b” indica o sobressinal máximo, ou seja, o valor máximo da variável de saída do sistema medido a partir do valor correspondente a condição estacionária. O ponto “b” também indica o instante de pico correspondente ao tempo necessário para a saída do sistema alcançar o primeiro pico de sobressinal. O ponto “c” corresponde ao tempo de acomodação, que é o tempo necessário para a curva da variável de saída do sistema permanecer dentro de uma faixa em torno do valor de regime (ponto “d”).

Figura 20 - Resposta unitária do sistema: (a) tempo de subida; (b) valor e instante do sobressinal máximo; (c) tempo de acomodação; (d) faixa em torno do valor de regime

4.3.4 Desempenho do controlador e comparação de valores medidos e simulados

Foram avaliadas quatro condições de vazões na linha fria: 200, 400, 600 e 800 L h⁻¹. Cada vazão na linha fria foi ajustada manualmente, sendo que as indicações de vazão volumétrica foram fornecidas pelo medidor eletromagnético de vazão. Para cada vazão na linha fria foram realizados ensaios variando a temperatura alvo (*setpoint*) entre 60°C e 100°C, incrementando e reduzindo valores sequencialmente em intervalos de 10 °C. Cada *setpoint* foi mantido por aproximadamente 250 segundos. Para essas mesmas condições, também foram obtidos valores de temperatura na câmara de mistura por simulações utilizando o pacote Simulink do Matlab, conforme ilustrado no diagrama da Figura 14.

A Figura 21 compara valores medidos e simulados de temperatura na câmara de mistura para cada uma das condições de ensaios avaliadas. A função de transferência foi determinada apenas para a condição de vazão na linha de fria de 600 L h⁻¹, pois esta foi considerada uma condição intermediária de operação. A função de transferência relaciona valores correspondentes a seção de escoamento da linha quente (entrada do sistema) com valores de temperatura na câmara de mistura (saída do sistema), mantendo-se a vazão na linha fria sempre constante em 600 L h⁻¹. Sendo assim, os valores simulados de temperatura na

câmara de mistura variam apenas em função do tempo e não levam em conta variações da vazão na linha fria.

Figura 21 - Resultados experimentais e de simulação da temperatura na câmara de mistura sob as vazões de referência de 200, 400, 600 e 800 L h^{-1}

A Figura 22 apresenta curvas do valor alvo da temperatura na câmara de mistura, da seção de escoamento na linha quente (entrada do sistema) e da temperatura medida na câmara de mistura (saída do sistema). Todos os valores foram expressos na forma de sinais digitais de 12 bits, e portanto, variam linearmente na faixa entre 0 a 4095. As curvas de saída do sistema indicam novamente que o controlador foi efetivo no controle da temperatura da câmara de mistura. Ao alterar o valor alvo de temperatura, observa-se que, em um curto intervalo de

tempo, a saída do sistema (temperatura na câmara de mistura) praticamente iguala-se ao valor alvo e se mantém constante até que nova alteração do valor alvo ocorra.

Diferentemente das curvas de saída do sistema, as curvas de entrada do sistema não estabilizaram e isso indica que houve contínuo ajuste da seção de escoamento da válvula proporcional instalada para controle da vazão através da linha quente. A contínua correção da seção de escoamento na linha quente para manter a temperatura alvo na linha de mistura, sem tendência de estabilização, indica que houve oscilações em variáveis do processo e, portanto, correção contínua na entrada do sistema foi requerida. Dentre as possíveis oscilações, destaca-se: (a) a temperatura e/ou a pressão na linha de vapor (linha quente) devido a flutuações nas condições operacionais da caldeira ou devido a variações de demanda na linha de vapor; (b) oscilações na pressão da linha fria em função da vazão escoada nessa canalização. A temperatura na linha fria não variou durante os testes, pois o reservatório apresentava volume muito grande em relação as vazões de ensaio.

Figura 22 – Curvas de valor alvo da temperatura na câmara de mistura, sinal correspondente a seção de escoamento na linha quente (entrada do sistema) e sinal correspondente a temperatura medida na câmara de mistura (saída do sistema)

Na Figura 21 e Figura 22 observa-se que nos instantes iniciais (<50 s) a temperatura da mistura (saída do sistema) não sofreu alteração. Essa reação do sistema foi provocada pela existência de uma zona morta na faixa inicial de comando da válvula proporcional. Essa zona morta se apresenta somente na primeira vez em que o sistema é ligado, sendo que não há efeitos disso nos degraus seguintes. Entenda-se que, nesse contexto, degrau se refere a uma alteração do valor alvo (*setpoint*) da temperatura na câmara de mistura. O primeiro *setpoint* apresentado na Figura 21 foi de 100 °C (sinal digital de 1939 na Figura 22), sendo esse o *setpoint* de temperatura máxima. O primeiro alvo a ser atingido saiu da menor temperatura do sistema para a mais elevada, considerando-se assim o pior caso de ajuste para um controlador.

Conforme já foi mencionado, na etapa de sintonização definiram-se os ganhos do controlador PI com expectativa de se obter os seguintes parâmetros: (1) tempo de subida de 25,4 s; (2) sobressinal máximo de 9,61%; (3) tempo de acomodação de 186 s. A Figura 23 apresenta os indicadores do desempenho do controlador nas condições simuladas e reais.

Os valores de tempo de subida (Figura 23A) não excederam o valor esperado de 25,4 s somente nas condições simuladas e na vazão de referência de 200 L h⁻¹, com exceção do primeiro degrau (valor alvo de 100 °C) que representa uma condição extrema para operação do controlador.

Na maioria dos degraus, o sobressinal foi maior para as condições de vazão de 200 e 400 L h⁻¹ na linha fria (Figura 23B). Valores simulados se mantiveram próximo do sobressinal

máximo esperado. Nas condições de vazão da linha fria de 600 e 800 L h⁻¹, o sobressinal máximo esperado foi excedido nos degraus 5 e 4, respectivamente.

O valor máximo de tempo de acomodação não foi excedido em nenhuma das condições simuladas (Figura 23C). Colunas hachuradas indicam que o tempo de acomodação ultrapassou o limite de 250 s, que corresponde ao intervalo de tempo entre mudanças de *setpoint* ou de degraus.

O indicador de desempenho IAE (Figura 23D) foi relativamente elevado no primeiro degrau, para todas as condições ensaiadas e simuladas. O indicador de desempenho ITAE (Figura 23E) também foi relativamente elevado no primeiro degrau, para todas as condições ensaiadas e simuladas. Os resultados do IAE e do ITAE, para o primeiro degrau, podem ser justificados por dois aspectos. Primeiro, há uma zona morta de resposta da válvula proporcional na inicialização do sistema e isso provoca atraso nas alterações da seção de escoamento da linha quente. O segundo aspecto está relacionado ao fato de que o primeiro degrau (valor alvo de 100 °C) representa a pior condição de controle, pois a temperatura na câmara de mistura parte da temperatura da linha fria e tem que atingir o limite máximo de operação do sistema.

Para a vazão na linha fria de 400 L h⁻¹ e a partir do degrau 6, observaram-se valores mais elevados do indicador ITAE. O indicador ITAE é calculado com base no erro absoluto ponderado pelo tempo. Isso implica que, para um erro inicial relativamente grande, o impacto no resultado do ITAE é pequeno. Entretanto, erros que persistem por mais tempo a partir do momento em que foi provocada perturbação no sistema, apresentam maior influência no resultado do ITAE. Isso torna o ITAE um indicador mais rigoroso e sensível do que o IAE.

Tanto a função de transferência quanto a sintonização do controlador foram realizados para a vazão de 600 L h⁻¹ na linha fria, pois essa foi assumida como uma condição intermediária de operação do sistema. Os indicadores de desempenho agrupados na Figura 23 não demonstraram melhor desempenho sob vazão de 600 L h⁻¹ em relação às outras vazões da linha fria. Desse modo, entende-se que a identificação do sistema e sintonização do controlador realizada apenas para a vazão de 600 L h⁻¹ aplica-se satisfatoriamente para faixa de vazões avaliadas.

A

B

C

Figura 23 - Indicadores de desempenho do controlador: (A) tempo de subida; (B) sobressinal; (C) tempo de acomodação - Colunas hachuradas ultrapassaram o limite de tempo de acomodação de 250 s, que corresponde ao intervalo de tempo entre mudanças de *setpoint*; (D) integral do erro absoluto - IAE; (E) integral do erro absoluto ponderado pelo tempo – ITAE

4.3.5 Limites de operação do sistema

Foram realizados testes preliminares que demonstraram os limites de operação da Bancada II. Foram verificadas as limitações em relação a segurança dos operadores e também dos equipamentos instalados. A Figura 24 demonstra a instabilidade causada no sistema quando o *setpoint* foi superior a 100°C.

Figura 24 - Limites de operação da Bancada II

No tempo 253,9 segundos houve a alteração do *setpoint* de 100°C para 110°C. A partir desse momento, a temperatura da mistura ultrapassou 140°C. Este fenômeno foi provocado pelo fechamento da válvula de retenção da linha fria, fazendo com que a linha fria fosse interrompida. A interrupção da água fria provocou a elevação da temperatura na linha de mistura. Essa instabilidade foi provocada devido a diferença de pressão da linha de vapor em relação a linha fria, provocando o acionamento da válvula de retenção. Como solução deste problema uma das possibilidades seria aumentar a pressão na linha fria. Devido às instalações das bombas d'água da bancada serem fixas, optou-se por limitar o *setpoint* de trabalho da Bancada II em até 100 °C.

Entre 283 e 301 segundos a válvula teve uma queda do valor do sinal digital aplicado a ela e, mesmo com a diminuição do vapor na linha quente a temperatura da mistura continuou a subir. Este fato também ocorreu pelo fechamento da válvula de retenção, mesmo com a tentativa de o controlador diminuir a temperatura, pois, ao diminuir a aplicação de vapor na câmara de mistura, o sistema não respondeu às mudanças.

5 CONCLUSÕES

Neste trabalho foi desenvolvido um trocador de calor de contato direto equipado com sistema eletrônico microcontrolado para controle dinâmico da temperatura de misturas de fluidos a diferentes temperaturas.

Equacionamento termodinâmico para a estimativa da temperatura resultante da mistura de líquidos e vapor em diferentes temperaturas foi apresentado e confrontado com valores obtidos experimentalmente, sendo que houve concordância entre valores observados e estimados.

A função de transferência característica do sistema avaliado em laboratório foi identificada e validada com sucesso, sendo que o melhor ajuste foi obtido para uma função de transferência de dois polos e dois zeros.

O controlador Proporcional-Integral (PI), assim como os respectivos coeficientes de ganho selecionados, apresentou desempenho satisfatório na aplicação de controle da temperatura da câmara de mistura.

O desempenho do controlador foi avaliado por experimentos laboratoriais e simulações computacionais, sendo que valores simulados e observados foram similares.

REFERÊNCIAS

- ASSUMPÇÃO, C. Princípios básicos de esterilização a vapor. Revista Brasileira de Enfermagem. Brasília, v. 26, n. 2, jan./fev. 1973.
- BARUFFALDI, R.; DE OLIVEIRA, M. N. Fundamentos de tecnologia de alimentos. São Paulo: Atheneu, 1998.
- BARRIENTOS, C. P. C. Contribuições à avaliação metrológica de esterilizadores por vapor saturado [dissertação]. Rio de Janeiro: Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, Programa de Pós-Graduação em Metrologia, 2012.
- BENTO, C. R. Sistema de controle: teoria e projetos. São Paulo: Érica. 1963.
- BROWN, K. L. Spore resistance and ultra heat treatment processes. Journal of Applied Bacteriology, Normay, v. 76, nov. 1994.
- CAMARGO, C.A. et al. Conservação de energia na indústria do açúcar e álcool: manual de recomendações. Instituto de Pesquisas Tecnológicas, São Paulo, 1990. 797p. (Publicações IPT 1817).
- ÇENGEL, Y. A.; BOLES, M. A. Termodinâmica. 5. ed. [s.l.]: McGraw-Hill, 2006.
- COELHO, A. A. R.; COELHO, L. S. Identificação de sistemas dinâmicos lineares. 2. ed. Florianópolis: Ed. da UFSC, 2015. ISBN 9788532807304.
- COUTO, M. Diversidades nas técnicas de esterilização. Revista SBCC – Sociedade Brasileira de Controle de Contaminação, n. 53, pg. 10-17, jul./ago. 2011.
- DELMEE, G. J. Manual de medição de vazão. 3. Ed. São Paulo: Edgard Blücher, 2003.
- DORF, R. C.; BISHOP, R. H. Sistemas de controle modernos. 8. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001. ISBN 0201308649.
- FERRÃO, E. S. P. Modelagem e validação da transferencia de calor e da distribuição de temperature no processamento térmico contínuo de alimentos líquidos em trocadores bitubulares [dissertação]. São Paulo: Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 2012.
- HYDROTHERMAL. The basics of hydroheater technology. Technical document. 2012.
- KELL, G. S. Density, thermal expansivity, and compressibility of liquid water from 0 to 150°C: Correlations and tables for atmospheric pressure and saturation reviewed and expressed on 1968 temperature scale. Journal of Chemical and Engineering Data, [S.l.] v. 20, n. 1, p. 97–105, 1975.
- LOURENÇO, J. Sintonia de controladores P.I.D. Escola Superior de Tecnologia, Setúbal, 1997. (Apostila). Disponível em: <<http://ltodi.est.ips.pt/smarques/CS/Pid.pdf>> Acesso em: 05 de março de 2018, 17h15.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Secretaria de Produção de Agroenergia - Departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia; Área colhida, produção e produtividade de cana-de-açúcar no Brasil, 2017. Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/producao>>. Acesso em: 26 de maio de 2018, 15h34.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Secretaria de Política Agrícola - Departamento de Café, Cana-de-Açúcar e Agroenergia; Produção Brasileira de Etanol, 2018a.; Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/etanol-comercio-exterior-brasileiro>>. Acesso em: 26 de maio de 2018, 15h38.

MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - Secretaria de Produção de Agroenergia - Departamento da Cana-de-Açúcar e Agroenergia; Exportações brasileiras anuais de etanol. 2018b.; Disponível em: <http://www.agricultura.gov.br/assuntos/sustentabilidade/agroenergia/producao>>. Acesso em: 26 de maio de 2018, 15h48.

MENEGHIN, S.P.; REIS, F.C.; ALMEIDA, P.G.; CECCATO-ANTONINI, S.R. Chlorine dioxide against bacteria and yeasts from the alcoholic fermentation. *Brazilian Journal Microbiology*, v. 39, n. 2, p. 337-343, 2008.

MOLLENKAMP, R. A. Controle automático de processos. São Paulo: EBRAS, 1988.

NAVES, R. F. et al. Contaminação microbiana nas etapas de processamento e sua influência no rendimento fermentativo em usina alcooleira. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer*, Goiânia, v. 6, n. 11, p. 1-16, 2010.

NISE, N. S. Engenharia de sistemas de controle. 3. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. ISBN 8521613016.

NISE, N. S. Engenharia de sistemas de controle. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2012. ISBN 9788521621355.

NOLASCO, J. J. Desenvolvimento de processo térmico otimizado para mosto de caldo de cana na fermentação alcoólica [dissertação]. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2005.

NOLASCO J, J. Eficiência de processo térmico para mostos a base de caldo de cana e melaço na produção de bioetanol [tese]. Campinas: Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas, 2010.

NOVACANA. Processos de fabricação do etanol. Disponível em: <https://www.novacana.com/etanol/fabricacao/>>. Acesso em: 17 de set. de 2016.

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 4. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 2003. ISBN 8587918230

OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 5. ed. São Paulo: Prentice-Hall do Brasil, 2010. ISBN 9788576058106

PELCZAR, M.; REID, R.; CHAN, E.C.S. Microbiologia. São Paulo: Pearson, 1996.

SAKURADA, N.; MIYAKE, D. I. Aplicação de simuladores de eventos discretos no processo de modelagem de sistemas de operações de serviços. Gest. Prod., São Carlos, v. 16, n. 1, p. 25-43, jan./mar. 2009.

THOMAS, G.; Projeto de leis de controle robusto do tipo PSC via realimentação de estados aplicada a um sistema UPS [dissertação]. Porto Alegre: Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul, Faculdade de Engenharia, 2009.