

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus DIVINÓPOLIS
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECATRÔNICA

Daniel Orlando Bueno

PROJETO DE UM TROCADOR DE CALOR HELICOIDAL PARA PROCESSO EM BATELADA
COM E SEM AGITAÇÃO

Divinópolis
2016

Daniel Orlando Bueno

PROJETO DE UM TROCADOR DE CALOR HELICOIDAL PARA PROCESSO EM BATELADA
COM E SEM AGITAÇÃO

Monografia de Trabalho de Conclusão de Curso apresentada ao Colegiado de Graduação em Engenharia Mecatrônica como parte dos requisitos exigidos para a obtenção do título de Engenheiro Mecatrônico.

Áreas de integração: Mecânica, Eletrônica e Controle.

Orientador: Prof. Dr. Ralney Nogueira de Faria
Co-orientador: Prof. Dr. Valter Júnior de Souza Leite

Divinópolis
2016

CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS
Campus DIVINÓPOLIS
CURSO DE ENGENHARIA MECATRÔNICA

Monografia intitulada “PROJETO DE UM TROCADOR DE CALOR HELICOIDAL PARA PROCESSO EM BATELADA COM E SEM AGITAÇÃO”, de autoria do graduando Daniel Orlando Bueno, aprovada pela banca examinadora constituída pelos seguintes professores:

Prof. Dr. Valter Júnior de Souza Leite - CEFET-MG *Campus* Divinópolis -
Coorientador

Prof. Dr. Evandro Fockink da Silva – CEFET-MG *Campus* Divinópolis

Prof. Dr. Luís Filipe Pereira Silva – CEFET-MG *Campus* Divinópolis

Prof. Dr. Lúcio Flávio Santos Patrício
Coordenador do Curso de Engenharia Mecatrônica
CEFET-MG *Campus* Divinópolis

Divinópolis - Dezembro de 2016

DEDICO ESTE TRABALHO PRIMEI-
RAMENTE A DEUS, RAZÃO DA MI-
NHA EXISTÊNCIA, ALÉM DOS MEUS
PAIS, ORLANDO E SIRLENE, MINHA
IRMÃ LETÍCIA, MEUS AVÓS E A MI-
NHA BISAVÓ VALENTINA.

Agradecimentos

Agradeço,

Inicialmente agradeço a Deus pela graça da vida, pela saúde e por me capacitar para os seus propósitos.

Agradeço também aos meus pais, pelo cuidado, carinho, recursos, amor e apoio incondicional durante todos os meus percursos, sejam eles fáceis ou difíceis. À minha irmã Letícia, os meus sinceros reconhecimentos de parceria e de esperança para alcançar seus sonhos.

Agradeço a todos os meus amigos, em especial ao Cleiton, Marcos e Gaubert, pelo companheirismo durante esses nove anos de fraternidade.

Aos meus orientadores, Ralney e Valter, minha gratidão enorme pelos conhecimentos transmitidos, além da amizade e do respeito que sempre terei pelos senhores.

Por fim, agradeço aos meus avós que me servem de exemplo, especialmente minha bisavó Valentina. Nunca me esquecerei da sua humildade, do seu sorriso e da sua força para viver.

O mais importante de tudo é nunca deixar de se perguntar. A curiosidade tem sua própria razão de existir.

Albert Einstein

Resumo

O presente Trabalho de Conclusão de Curso trata do projeto e construção de um trocador de calor helicoidal de cobre para uma planta didática que simula um processo em batelada, com e sem agitação. Foram abordados tanto os aspectos de caráter construtivo, da área eletromecânica, quanto da possibilidade de utilização da planta para aplicação em controle de processos. Este trabalho tem viés investigativo e experimental, que abrange as áreas de Mecânica, Eletrônica e Controle. Na primeira, englobou-se o estudo e implementação do trocador de calor helicoidal com tubo de cobre, assim como a idealização e construção de subsistemas que complementaram a planta didática e a tornaram operacional. Já a segunda área, tange aos circuitos eletrônicos de potência e comunicação para o protótipo didático. Na última área, realizaram-se a calibração dos sensores, a modelagem matemática via método de entrada-saída para um sistema integrador com atraso e a obtenção de sintonias simuladas e reais para controladores PID, tendo como variável manipulada à tensão de uma resistência de imersão e como variável controlada a temperatura no interior do tanque agitado. Para realizar este trabalho, foi realizado um estudo bibliográfico sobre transferência de calor em dispositivos helicoidais, dimensionamento, projeto estrutural e construção do trocador de calor junto ao tanque principal de uma planta didática de automação industrial, já existente. Após a efetuação dessa etapa, os circuitos de comunicação e controle foram implementados. Na sequência, discutiu-se sobre testes experimentais para a modelagem do sistema. Os modelos tratados foram usados para a síntese de controladores PID, com um valor de referência em 40°C . Por fim, sugeriu-se a aplicação da planta com a utilização de controladores mais complexos, além da possibilidade de obtenção de uma função correlação para o trocador de calor construído em uma maior variedade de condições de operação.

Palavras-chave: Transferência de Calor. Trocador de Calor Helicoidal. Processo Térmico. Modelagem Matemática. Controladores PID.

Abstract

The present Term Paper deals with the design and construction of a copper helical heat exchanger for a didactic plant that simulates a batch process, with and without stirring. The aspects of constructive character, the electromechanical area, and the possibility of using the plant for application in process control were discussed. This work has investigative and experimental bias, which covers the areas of Mechanics, Electronics and Control. The first included the study and implementation of the helical heat exchanger with copper pipe, as well as the idealization and construction of subsystems that complemented the didactic plant and made it operational. The second one concerns the electronic circuits of power and communication for the didactic prototype. In the latter area, the calibration of the sensors, the mathematical modeling via the input-output method for an integral plus time delay system and the obtaining of simulated and real tuning for PID controllers were carried out, having as variable manipulated to the voltage of a resistance of immersion and as controlled variable the temperature inside the stirred tank. To carry out this work, a bibliographic study was carried out on heat transfer in helical devices, dimensioning, structural design and construction of the heat exchanger next to the main tank of an existing industrial automation didactic plant. After this step, communication and control circuits were implemented. In the sequence, experimental tests for the modeling of the system were discussed. The treated models were used for the synthesis of PID controllers, with a setpoint of 40°C. Finally, it was suggested the application of the plant with the use of more complex controllers, besides the possibility of obtaining a correlation function for the heat exchanger constructed in a greater variety of operating conditions.

Key-words: Heat Transfer. Helicoidal Heat Exchanger. Thermal Process. Mathematical Modeling. PID controllers.

Sumário

Lista de Acrônimos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Definição do Problema	2
1.2 Motivação	2
1.3 Objetivos	3
1.4 Estado da Arte	4
1.5 Organização do Documento	5
2 Fundamentação Teórica	6
2.1 Conceitos de transferência de calor	6
2.1.1 Coeficiente global de transferência de calor - U	7
2.1.2 Média Log das Diferenças de Temperatura	7
2.2 Trocador de calor helicoidal	11
2.3 Objetivos de Controle	16
2.3.1 Modelagem Matemática	17
2.3.2 Obtenção de controladores	17
2.4 Calibração	19
3 Projeto do Trocador de Calor Helicoidal	21
3.1 Descrição básica da planta de automação industrial	21
3.1.1 Parte mecânica	21
3.1.2 Parte Elétrica	23
3.2 Procedimentos de projeto do trocador de calor helicoidal	26
3.3 Construção do TCH	31
4 Descrição e construção da parte eletromecânica	33
4.1 Definição dos componentes principais	33
4.1.1 Bomba para óleo térmico	33
4.1.2 Reservatórios para o fluido térmico e resfriamento	33
4.1.3 Resistência elétrica tubular	34
4.1.4 Outros componentes e tabela de custo	35
4.2 Concepção e implementação da parte mecânica	35
4.2.1 Sistema de aquecimento	35
4.2.2 Sistema de armazenamento e resfriamento de fluido térmico	35
4.2.3 Sistema de bombeamento	37

4.2.4	Estrutura de sustentação	38
4.2.5	Integração da parte mecânica	39
4.3	Concepção e implementação do sistema elétrico	39
4.3.1	Circuito de potência e comando da resistência elétrica - aquecedor .	39
4.3.2	Circuito de comando para os sensores de temperatura	41
4.3.3	Circuito de potência e comando para a bomba de fluido térmico . .	41
4.3.4	Utilização do programa MATLAB para a operação da planta	43
5	Testes experimentais e Controle	45
5.1	Calibração dos sensores de temperatura	45
5.2	Levantamento da <i>Tensão x Vazão</i> da bomba de óleo	46
5.3	Avaliação da resposta temporal do sistema	47
5.4	Modelagem Matemática	48
5.5	Síntese de Controladores	50
6	Considerações finais e propostas de trabalhos futuros	57
A	<i>Script</i> para projeto do TCH	59
B	Programas para comunicação e operação da planta didática	66
B.1	<i>Script</i> para o Arduino de Atuação	66
B.2	<i>Script</i> para o Arduino de Comunicação	71
	Referências	74

Lista de Figuras

2.1	Distribuições de temperaturas em um trocador de calor com escoamento paralelo (INCROPERA <i>et al.</i> , 2011, Página 712).	9
2.2	Distribuições de temperaturas em um trocador de calor com escoamento contracorrente (INCROPERA <i>et al.</i> , 2011, Página 714).	11
2.3	Representação geométrica de um tubo helicoidal com seção transversal circular (BEJAN; KRAUS, 2003, Página 1089).	12
2.4	Diagrama de blocos de processo com controle realimentado. Adaptada de (SOUZA, 2015, Página 11).	18
2.5	Diagrama de blocos de processo por realimentação com controle PID para sistema integrador com atraso de transporte. Adaptada de (O'DWYER, 2010, Página 350).	19
3.1	Planta didática de automação industrial para análise de fluido em batelada (ARAÚJO, 2015).	22
3.2	Estrutura de sustentação da planta didática (ARAÚJO, 2015).	22
3.3	Impelidor do tipo hélice, com três pás (ARAÚJO, 2015).	23
3.4	Motor utilizado para o agitador (ARAÚJO, 2015).	24
3.5	Vista dos componentes principais no interior do tanque agitado (ARAÚJO, 2015).	25
3.6	Sensor de vazão na planta didática (ARAÚJO, 2015).	25
3.7	Caixa para comando elétrico (ARAÚJO, 2015).	26
3.8	Exemplo de TCH no tanque agitado.	27
3.9	Fluxograma do projeto do trocador de calor helicoidal.	30
3.10	Concepção do TCH em programa de desenho tridimensional	31
3.11	Obtenção do TCH real.	32
4.1	Bomba de óleo para motor de <i>Fusca</i>	34
4.2	Caldeirão industrial N30.	34
4.3	Resistência elétrica tubular (3000 W).	35
4.4	Sistema de aquecimento de óleo térmico.	37
4.5	Sistema de armazenamento e resfriamento de óleo térmico.	37
4.6	Sistema de bombeamento de óleo térmico.	38
4.7	Estrutura de sustentação idealizada.	38
4.8	Estrutura de sustentação construída.	39
4.9	Planta didática de automação industrial com a adição dos sistemas complementares.	40

4.10	Circuito esquemático de ligação do relé de estado sólido.	41
4.11	Circuito esquemático de ligação do sensor de temperatura (ARAÚJO, 2015).	42
4.12	Circuito esquemático de ligação do motor da bomba de óleo térmico.	42
4.13	Diagrama de blocos do circuito de comunicação em MATLAB.	43
4.14	Localização dos sensores de temperatura.	44
5.1	Curva de calibração estática do sensor de temperatura DS18B20.	46
5.2	Curva de resposta dinâmica do sensor de temperatura DS18B20.	47
5.3	Curvas de respostas temporais do sistema para 100% de PWM no aquecedor, sem e com agitação (400 RPM).	48
5.4	Ajustes polinomiais de primeira ordem para as repostas do sistema térmico ao degrau.	49
5.5	Diagrama elaborado em Simulink para teste do sistema controlado sem saturação do sinal de controle.	51
5.6	Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 1, sem saturação.	52
5.7	Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 2, sem saturação.	53
5.8	Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 1, com saturação e ruído.	54
5.9	Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 2, com saturação e ruído.	55
5.10	Curvas de respostas temporais reais do sistema para o controlador caso 1.	56

Lista de Tabelas

3.1	Parâmetros fixos e resultados para o TCH.	29
4.1	Preços para os componentes usados no TCC.	36
5.1	<i>Tensão x Vazão</i> na bomba de óleo térmico	47
5.2	Parâmetros para o modelo matemático do processo.	50

Lista de Acrônimos

PID	<i>Proportional-integral-derivative</i> (Proporcional-integral-derivativo)
SISO	<i>Single Input Single Output</i> (Uma Entrada e Uma Saída)
TCH	<i>Trocador de Calor Helicoidal</i>
LSS	<i>Laboratório de Sinais e Sistemas</i>
TC	<i>Trocador de Calor</i>
LCD	<i>Liquid Crystal Display</i> (Visor de Cristal Líquido)
PWM	<i>Pulse Width Modulation</i> (Modulação por Largura de Pulso)
TCC	<i>Trabalho de Conclusão de Curso</i>
CLP	<i>Controlador Lógico Programável</i>
DC	<i>Corrente Contínua</i>
CA	<i>Corrente Alternada</i>
RES	<i>Relé de Estado Sólido</i>
RX	<i>Recebedor de Sinal</i>
TX	<i>Transmissor de Sinal</i>

Introdução

O processo de troca de calor entre dois fluidos que estão em diferentes temperaturas e se encontram separados por uma parede sólida ocorre em muitas utilizações na engenharia. O dispositivo utilizado para realizar essa transferência de calor é denominado *Trocador de Calor* (TC) (INCROPERA *et al.*, 2010). Entre os tipos mais comuns de trocadores de calor estão os bitubulares, os compactos.

Dentro desse contexto, TCs com formato helicoidal são um dos equipamentos mais comuns encontrados em diversas aplicações industriais, tais como em indústrias químicas e petroquímicas, sistemas termais, energia solar, produção de energia nuclear, indústria de alimentos, na engenharia ambiental, entre outras (JAYAJUMAR, 2008),(JAYAJUMAR, 2010). Além disso, quando comparados com os TCs de tubos retos, a taxa de transferência de calor dos TCs helicoidais é significamente maior devido a um segundo fluxo em planos normais ao fluxo principal (JAYAJUMAR, 2010).

Uma das etapas representativas para análise de um TC e, geralmente, a mais imprecisa, consiste na determinação do coeficiente global de transferência de calor. Além do mais, para projetar ou prever o desempenho de um trocador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor a algumas grandezas. Entre elas estão as temperaturas de entrada e saída dos fluidos, o coeficiente global de transferência de calor e a área superficial disponível para a transferência de calor (INCROPERA *et al.*, 2010).

Geralmente, os projetos que envolvem trocadores de calor levam em consideração a fixação de valores para as grandezas principais do processo, fazendo com que o sistema térmico atue de forma a atingir valores de temperaturas desejados apenas para uma única condição de operação em regime permanente. Sendo assim, a avaliação do comportamento térmico para a variação dos parâmetros de temperaturas de entrada e saída dos fluidos torna-se algo relevante de ser investigado. Uma das formas refletidas de superar tal questão seria a aplicação de controladores automáticos no processo. Existem várias tipologias para projetos de controladores. Sendo que as mais usuais correspondem à síntese PID e

à realimentação de estados.

Para suprir a necessidade de avaliação experimental de processos térmicos é utilizada uma planta elaborada em Trabalho de Conclusão de Curso anterior por ARAÚJO (2015) e que se encontra atualmente no Laboratório de Automação Industrial do CEFET-MG *campus* Divinópolis. Ela possui um tanque cilíndrico metálico, sensoriamento de nível e temperatura do fluido interno ao tanque, aquecedor por resistência de imersão interno ao tanque, motor com impelidor no eixo para agitação do fluido, eletrobomba d'água, válvula solenóide, uma central eletrônica de comando em que é feito o condicionamento eletrônico de sinais de entradas e saídas da planta, e interface visual com *display* LCD para os usuários. Esse protótipo deverá ser acrescido de algumas partes para o cumprimento deste trabalho.

Por fim, o interesse deste trabalho está em responder às seguintes perguntas: Com relação ao trocador de calor helicoidal para processo em batelada, com e sem agitação, qual a eficiência térmica para alguns tipos de condições de operação? E, tratando-se da finalidade de controle, quais compensadores e sintonias possuem melhores desempenhos para algumas condições de operação, em que se deseja controlar a temperatura?

1.1 Definição do Problema

O problema consiste em avaliar a eficiência térmica de um processo com trocador de calor helicoidal em batelada com e sem agitação. O processo em batelada refere-se àquele não-contínuo, executado por etapas definidas, em que ao final de cada processo é adicionada uma nova carga. Além do mais, requer-se determinar o desempenho de controladores e compará-los para pontos de operação a serem escolhidos. Sendo assim, considerando-se a parte mecânica, o presente trabalho permitirá o estudo, projeto e construção de um trocador de calor helicoidal e dos sistemas de aquecimento e resfriamento de fluido térmico, além de projeto estrutural metálico complementar à planta didática supracitada. Em relação ao controle de processos para este trabalho, serão abordados temas como: modelagem de sistemas, sintonia de controladores PID e por realimentação de estados, bem como índices de desempenho em tempo real para análise comparativa de desempenho entre os diferentes controladores. Cita-se ainda que serão desenvolvidos circuitos eletrônicos de comunicação e de potência, para integração dos componentes mecânicos, aquisição de dados e operação do protótipo.

1.2 Motivação

Acredita-se que o desenvolvimento de pesquisa associado ao ramo de sistemas térmicos em conjunto com o controle de processos se faz relevante. Isso porque as regiões Centro-

Oeste e Metropolitana de Minas Gerais constituem-se com uma grande quantidade de companhias especializadas em processos que dependem de grandes quantidades de energia térmica, tais como indústrias de laticínios, alimentícias, químicas, siderurgias e fundições, entre outros processos metalúrgicos. Nem sempre a eficiência de energia é tratada nessas instituições empresariais, o que torna essa proposta importante ao meio geográfico em que o CEFET-MG *campus* Divinópolis está inserido.

Outro fator motivacional para este trabalho gerou-se por meio de ideias discutidas na disciplina de Modelagem e Simulação de Sistemas Térmicos. Assuntos referentes a trocadores de calor helicoidais foram tratados, além de dispositivos térmicos de tubos retos, compactos, torres de resfriamento, entre outros.

A incorporação de controladores PID e por realimentação de estados com integrador terá uma utilização relevante para este trabalho. Isso porque o primeiro deles é uma forma clássica de controle, sendo amplamente empregado na indústria e encontrado em várias bibliografias com diversos tipos de sintonia (OGATA, 1993). Já o segundo, apresenta-se como a identidade mais forte do controle moderno, sendo pouco usado nas indústrias como um todo.

1.3 Objetivos

Os objetivos principais deste trabalho são dois: *i)* projetar e desenvolver um trocador de calor helicoidal com tubo de cobre para processo em batelada com e sem agitação, de tal forma a possibilitar o estudo e discussão da eficiência térmica do sistema. *ii)* sintetizar controladores PID para pontos de operação a serem definidos. Os pontos de operação são definidos de acordo com a faixa de trabalho de temperatura da planta, que dependerá do elemento atuador (resistência de imersão). Os objetivos específicos deste trabalho são:

1. Dimensionar e construir um trocador de calor helicoidal para o aquecimento de um fluido num processo em batelada para uma planta didática de automação industrial;
2. Definir e desenvolver sistema de aquecimento e arrefecimento para o fluido térmico;
3. Implementar circuitos eletrônicos de potência, sensoriamento e comunicação;
4. Modelar o sistema térmico via método de entrada-saída;
5. Projetar controladores PID;
6. Avaliar a eficiência térmica do sistema com e sem agitação.

1.4 Estado da Arte

Atualmente não se tem disponível uma gama considerável de trabalhos que trata sobre a transferência de calor em dispositivos helicoidais no sentido de gerar correlações para o projeto desses equipamentos. Isso foi observado com a execução de pesquisas nas plataformas SCOPUS e CAPES, das quais o CEFET *campus* Divinópolis tem acesso. Encontraram-se 14 trabalhos dentro do contexto apresentado nesta monografia. Foram avaliados e selecionados alguns trabalhos que definem o estado atual de pesquisas práticas e teóricas no contexto desse Trabalho de Conclusão de curso (TCC).

Um deles referiu-se aos esforços de KUMAR; DESHMUKH; GHOSH (2015), em que focou-se nos efeitos internos em tubos no formato espiral aplicados sob condições constantes de vazão mássica. Além disso, verificou-se a dependência do número de Dean e do coeficiente global de transferência de calor à variação da vazão na região anular. Os resultados indicaram que, com a diminuição do diâmetro interno dos tubos helicoidais, o coeficiente global de transferência de calor aumenta.

PAWAR *et al.* (2015) tratou da influência das áreas superficiais de troca de calor e das forças centrípetas geradas pelo escoamento de fluido no coeficiente global de transferência de calor para um trocador de calor helicoidal. Para tal, foram realizados experimentos que conduziram à conclusão do aumento do valor do coeficiente global de transferência de calor e que ele não dependia diretamente da área superficial das espiras.

Já PURANDARE; LELE; GUPTA (2012) realizou uma análise paramétrica para um trocador de calor helicoidal, utilizando algumas correlações encontradas na literatura. Sendo assim, fez-se um estudo comparativo em que observou-se a eficiência dos trocadores helicoidais mesmo com um baixo valor do número de Reynolds. As análises também permitiram inferir que há um aumento na intensidade dos fluxos secundários. Estes consistem em vórtices de fluxo normais ao fluxo principal e são gerados devido às curvaturas dos tubos. Isso para o caso em que o diâmetro do tubo aumenta e o raio das espiras é constante.

PAWAR; SUNNAPWAR; MUJAWAR (2011) apresentaram um estudo crítico da transferência de calor através de tubos helicoidais de seção transversal circular. No trabalho, concluíram que existe um desvio nas correlações que tratam desses dispositivos.

PERARASU; ARIVAZHAGAN; SIVASHANMUGAN (2011) realizaram estudos com a variação da taxa de calor utilizando dois agitadores para um trocador de calor helicoidal acoplado em um tanque. A taxa de transferência de calor aumentou com o acréscimo gradual da velocidade de agitação em ambos agitadores. Variando-se separadamente as velocidades de agitação obtiveram-se correlações distintas, com um desvio de $\pm 15\%$.

1.5 Organização do Documento

Este trabalho está particionado em seis capítulos. O presente capítulo apresenta a definição do problema estudado, a motivação para a realização do projeto, os objetivos do trabalho, o estado da arte e a organização deste documento.

No segundo capítulo são caracterizados os conceitos fundamentais teóricos para o desenvolvimento deste trabalho.

No terceiro capítulo, denominado projeto do trocador de calor helicoidal, é realizada uma descrição do protótipo didático de automação industrial, além dos procedimentos para obtenção dos parâmetros do trocador de calor helicoidal. Também é discutido sobre a construção do TCH.

O quarto capítulo refere-se ao projeto e construção dos dispositivos eletromecânicos complementares à planta didática de automação industrial.

No quinto capítulo realiza-se uma explanação sobre os testes experimentais, modelagem do processo térmico e aplicação de controladores.

O sexto capítulo corresponde às considerações finais e propostas de trabalhos futuros.

Fundamentação Teórica

Para se projetar um trocador de calor helicoidal é necessário revisar conceitos sobre a transferência de calor, realizando definições básicas de assuntos importantes dentro desse contexto. Entre os tópicos trabalhados estão o coeficiente global de transferência de calor, a utilização da média logarítmica das diferenças de temperatura entre as entradas e saídas em TCs. Além do mais, são discutidos sobre os sistemas de controle, em que se insere a modelagem matemática do sistema térmico. Síntese de controladores também é um tema fundamentado.

2.1 Conceitos de transferência de calor

Para o projeto de trocadores de calor geralmente utilizam-se de métodos tradicionais, tais como o uso da média logarítmica das diferenças de temperatura, bem como efetividade-NUT. Para este trabalho, será disposto o método da média logarítmica das diferenças de temperatura. Isso porque as temperaturas de entrada e saída dos fluidos associados ao processo de troca de calor foram fixadas. Em contrapartida, o método da efetividade-NUT é geralmente aplicado quando são conhecidas somente as temperaturas de entrada dos fluidos do processo.

Existem vários tipos de trocadores de calor. E, basicamente, eles são classificados de acordo com a configuração do escoamento e do tipo de construção. Quanto ao tipo de escoamento, existem algumas condições: paralela, contracorrente e cruzada. Na primeira, os fluidos quente e frio escoam no mesmo sentido, entram e saem pelo mesmo lado. Na configuração contracorrente, os fluidos entram por extremidades opostas, escoam em sentidos opostos e deixam o dispositivo em extremidades opostas. Por último, para o caso de escoamento cruzado, os fluidos têm movimentações em sentido perpendiculares (INCROPERA *et al.*, 2010). Levando-se em consideração a forma construtiva, alguns exemplos correspondem aos trocadores de calor concêntricos bitubulares, casco e tubos, compactos, helicoidais, entre outros (INCROPERA *et al.*, 2010). O TC para este trabalho refere-se

ao trocador de calor helicoidal.

2.1.1 Coeficiente global de transferência de calor - U

Para a análise e projeto de trocadores de calor usa-se um conceito fundamental: o coeficiente global de transferência de calor. Ele geralmente possui imprecisões para realizar a sua determinação, e é definido em função da resistência térmica total à transferência de calor entre dois fluidos. Essa resistência normalmente é obtida por meio de testes experimentais. Para cada tipo de trocador de calor existe uma forma de se encontrar o valor de U . No caso do trocador de calor helicoidal, tem-se:

$$U = \frac{1}{\left(\frac{A_o}{h_i A_i}\right) + \left(\frac{A_o \ln\left(\frac{d_o}{d_i}\right)}{2K_t \pi L}\right) + \left(\frac{1}{h_o}\right)} \quad (2.1)$$

em que h_i representa o coeficiente convectivo referente à parte interna ao tubo, h_o diz respeito ao coeficiente convectivo da parte externa ao trocador de calor, d_i é o diâmetro interno da tubulação, d_o consiste no diâmetro externo do tubo e K_t representa a condutividade térmica do material constituinte do tubo, L é o comprimento total do trocador de calor e A_i e A_o referem-se, respectivamente, à área de troca de calor interna e externa ao tubo. As unidades das grandezas adotadas durante todo este trabalho estão no Sistema internacional de unidades (SI) (INCROPERA *et al.*, 2010).

Para fins práticos, utiliza-se geralmente a seguinte relação:

$$\frac{1}{UA} = \frac{1}{U_c A_c} = \frac{1}{U_h A_h} \quad (2.2)$$

em que A representa a área, e os subscritos c e h indicam os fluidos frio e quente, respectivamente. Ou seja, o cálculo do produto UA não tem exigência da especificação do lado quente ou do lado frio ($U_c A_c = U_h A_h$).

2.1.2 Média Log das Diferenças de Temperatura

Para projetar ou prever o desempenho de um trocador de calor é essencial relacionar a taxa total de transferência de calor a grandezas tais como: as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos, o coeficiente global de transferência de calor e a área superficial total disponível para a transferência de calor (INCROPERA *et al.*, 2010). Quando se aplica um balanço de energia levando-se em conta essas considerações, adotando-se que existe uma taxa total de transferência de calor entre os fluidos quente e frio, e a transferência de calor entre o trocador e a vizinhança é desprezível, assim como as mudanças nas energias

potencial e cinética do sistema, a aplicação da conservação da energia em um sistema aberto, com escoamento em regime estacionário, fornece:

$$q = \dot{m}_h c_{p,h} (T_{h,i} - T_{h,o}) \quad (2.3)$$

$$q = \dot{m}_c c_{p,c} (T_{c,o} - T_{c,i}) \quad (2.4)$$

na situação em que os fluidos não passam por uma mudança de fase e se forem admitidos calores específicos constantes. A variável q representa a taxa de transferência de calor, \dot{m} refere-se à vazão mássica, c_p corresponde ao calor específico e T é a temperatura. Os subscritos h , c , i e o dizem respeito aos fluidos quente, frio e as condições de entrada e saída para o fluido, respectivamente.

Outra expressão útil trata-se da relação entre a taxa de transferência de calor total q e à diferença de temperaturas ΔT entre os fluidos quente e frio.

$$\Delta T \equiv (T_h - T_c) \quad (2.5)$$

Tal expressão seria uma extensão da lei de resfriamento de Newton, com coeficiente global de transferência de calor U utilizado em substituição do coeficiente de calor h . No entanto, uma vez que ΔT varia com a posição no trocador de calor, torna-se necessário trabalhar com uma equação para a taxa no seguinte formato:

$$q = UA\Delta T_m \quad (2.6)$$

em que ΔT_m é uma média apropriada de diferenças de temperatura, que é deduzida a seguir. Os balanços de energia e a análise posterior estão sujeitos às considerações subsequentes:

1. O trocador de calor encontra-se isolado termicamente da vizinhança, ocorrendo troca de calor somente entre os fluidos quente e frio;
2. A condução axial ao longo dos tubos é desprezível;
3. Mudanças nas energias cinética e potencial são desprezíveis.
4. Os calores específicos dos fluidos são constantes;
5. O coeficiente global de transferência de calor é constante.

Os calores específicos podem variar em função das mudanças de temperatura e o coeficiente global de transferência de calor pode sofrer alterações devido a modificações nas propriedades dos fluidos e nas condições de escoamento. No entanto, em muitas aplicações tais variações não são significativas e é razoável trabalhar com valores médios para os calores específicos e também para o coeficiente global de transferência de calor.

Levando-se em consideração as distribuições de temperaturas em um trocador de calor em escoamento paralelo, Figura 2.1, inicialmente a diferença ΔT é alta, mas decresce com o aumento de x , aproximando-se assintoticamente de zero. Sendo assim, ΔT_m pode ser determinado por meio de um balanço de energia nos elementos diferenciais dos fluidos quente e frio. Cada elemento tem um comprimento dx e uma área de transferência de calor dA . Dessa forma, de acordo com a Figura 2.1, tem-se

$$dq = -\dot{m}_h c_{p,h} dT_h \equiv -C_h dT_h \quad (2.7)$$

$$dq = -\dot{m}_c c_{p,c} dT_c \equiv -C_c dT_c \quad (2.8)$$

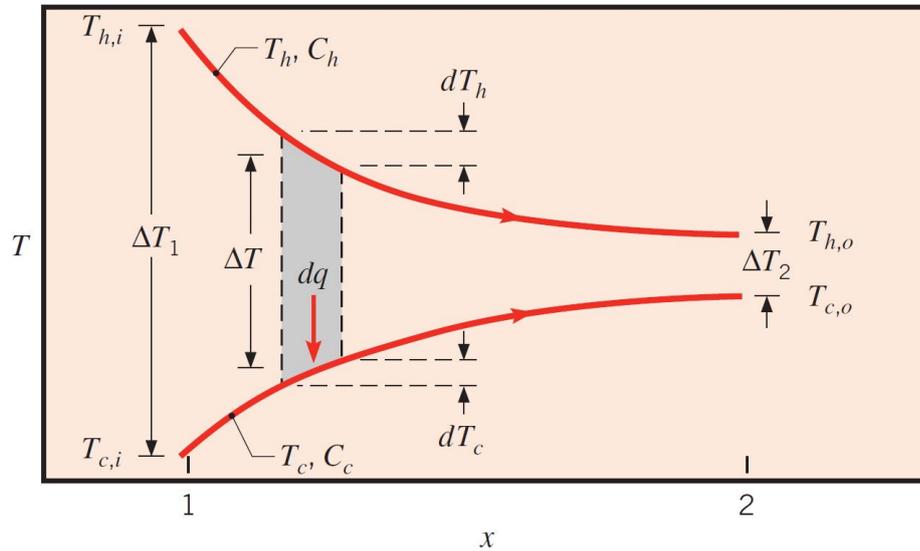


Figura 2.1: Distribuições de temperaturas em um trocador de calor com escoamento paralelo (INCROPERA *et al.*, 2011, Página 712).

em que C_h e C_c correspondem às taxas de capacidade calorífica dos fluidos quente e frio, respectivamente. A taxa de transferência de calor por meio da área dA também pode ser disposta como

$$dq = U \Delta T dA \quad (2.9)$$

em que $\Delta T = T_h - T_c$ significa a diferença de temperatura local entre os fluidos quente e frio.

Realizando a forma integral da equação (2.9), inicia-se pela substituição das equações (2.7) e (2.8) no formato diferencial da equação (2.5)

$$d(\Delta T) = dT_h - dT_c$$

para se obter

$$d(\Delta T) = dq \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right)$$

Substituindo dq através da equação (2.9) e fazendo-se a integração ao longo do trocador de calor, obtém-se

$$\int_1^2 \frac{d(\Delta T)}{\Delta T} = -U \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \int_1^2 dA$$

ou

$$\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -UA \left(\frac{1}{C_h} + \frac{1}{C_c} \right) \quad (2.10)$$

em que os índices 1 e 2 indicam as extremidades opostas do trocador de calor. Realizando-se a substituição de C_h e C_c pelas equações (2.3) e (2.4), respectivamente, tem-se que

$$\ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1} = -\frac{UA}{q} [(T_{h,i} - T_{c,i}) - (T_{h,o} - T_{c,o})] \quad (2.11)$$

Verificando-se que, no trocador de calor com escoamento paralelo da Figura 2.1, os valores $\Delta T_1 = (T_{h,i} - T_{c,i})$ e $\Delta T_2 = (T_{h,o} - T_{c,o})$, percebe-se que

$$q = UA \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} \quad (2.12)$$

Comparando a equação (2.12) com a equação (2.6), observa-se que a diferença de temperatura média apropriada é uma média logarítmica das diferenças de temperaturas (ΔT_{ml}). Assim, tem-se

$$q = UA\Delta T_{ml} \quad (2.13)$$

em que

$$\Delta T_{mt} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{\ln(\Delta T_2/\Delta T_1)} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1/\Delta T_2)} \quad (2.14)$$

Já para a situação do escoamento contracorrente, apresentada na Figura 2.2, diferentemente do trocador de calor com escoamento paralelo, essa configuração proporciona a transferência de calor entre as parcelas mais quentes dos fluidos em uma extremidade e para as parcelas mais frias na extremidade oposta. Fazendo-se a mesma análise efetuada para o trocador com escoamento paralelo, pode-se mostrar que as equações (2.13) e (2.14) também são aplicáveis. Porém, deve-se atentar para a mudança nas diferenças de temperaturas nas extremidades comparada com o caso de escoamento paralelo.

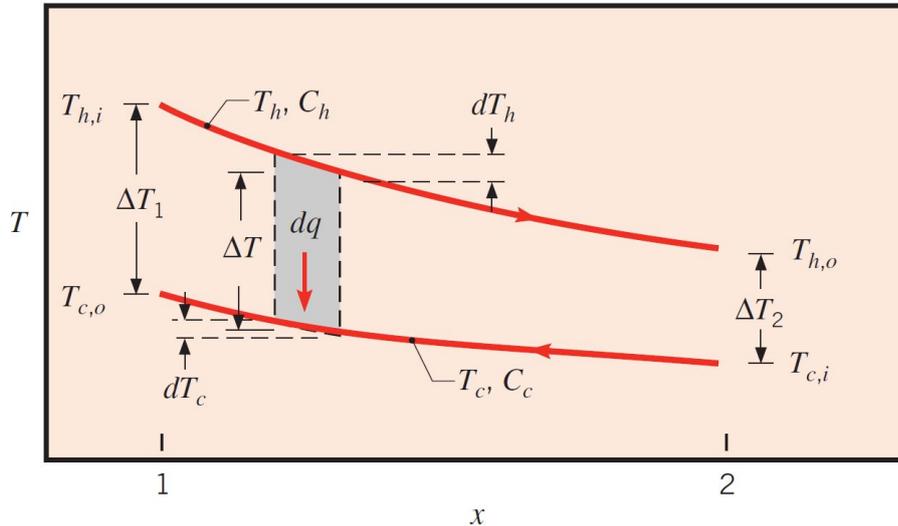


Figura 2.2: Distribuições de temperaturas em um trocador de calor com escoamento contracorrente (INCROPERA *et al.*, 2011, Página 714).

2.2 Trocador de calor helicoidal

Existem na literatura estudos sobre a transferência de calor em TCs com geometria helicoidal. Entre esses estudos, vem sendo destacado o perfil vetorial do escoamento. Este fator tem sido investigado e constatado que o fluxo principal possui aspecto espiral. Além disso, um fluxo secundário também é gerado, basicamente pela mudança contínua da direção do vetor tangencial à superfície curvada dos tubos. Isso resulta na deflexão local do vetor de velocidade do escoamento. Contudo, padrões complexos de fluxo são obtidos e caracterizados por inúmeros vórtices helicoidais sobrepostos sobre o fluxo axial principal. Assim, o somatório dos fluxos garantem uma melhora na transferência de calor

e massa. Esses tipos de geometria dos tubos são atualmente utilizados em uma ampla variedade de aplicações, incluindo aquecedores domésticos de água, reatores de processos químicos, caldeiras industriais e marítimas, dispositivos de diálise renal, oxigenadores de sangue, processo de batelada na fermentação para a produção de cerveja (BEJAN; KRAUS, 2003).

Levando-se em consideração os escoamentos de uma única fase (*single-flow*) para tubos helicoidais, o fluxo de característica espiral é amplamente dependente das características geométricas do trocador de calor. Uma representação típica para um trocador de calor helicoidal com seção transversal circular está representada na Figura 2.3.

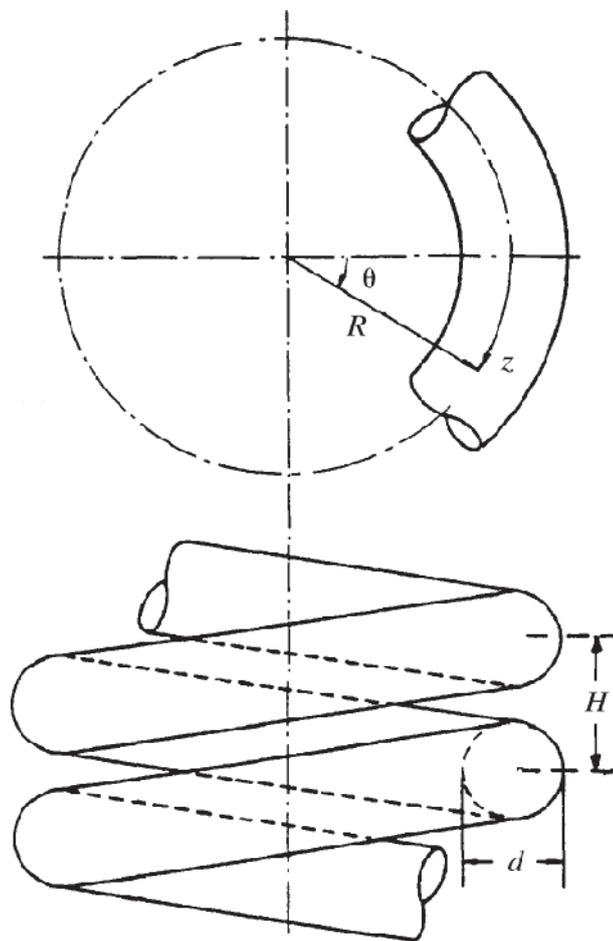


Figura 2.3: Representação geométrica de um tubo helicoidal com seção transversal circular (BEJAN; KRAUS, 2003, Página 1089).

Os parâmetros adimensionais (número de Dean - D_e , raio de curvatura - R_c e o número helicoidal - H_e) que descrevem o comportamento do escoamento e o dimensionamento da geometria dos dutos são geralmente definidos como:

$$D_e = Re_1 \sqrt{\frac{d}{2R}} \quad (2.15)$$

$$R_c = R \left[1 + \left(\frac{H}{2\pi R} \right)^2 \right] \quad (2.16)$$

$$H_e = R_{e1} \sqrt{\frac{d}{2R_c}} \quad (2.17)$$

em que R_{e1} caracteriza-se como o número de Reynolds para o escoamento interno ao tubo, com v sendo a velocidade linear de escoamento e ν representa a viscosidade cinemática do fluido interno ao tubo para determinadas condições de temperatura e pressão.

$$R_{e1} = \frac{v \cdot d}{\nu} \quad (2.18)$$

É importante salientar que o número helicoidal se reduz ao número de Dean quando $H = 0$. A curvatura do tubo atua no sentido de impor uma força centrípeta à movimentação do fluido. Desse modo, geram uma circulação secundária que, para fluxos laminares, tem-se caracterizado por meio de dois vórtices helicoidais simétricos com rotações em sentidos contrários. Esse tipo de característica para a circulação do fluido é geralmente conhecida como fluxo de Dean, na literatura. A transferência de calor é melhorada quando acontece acréscimo de valores no D_e .

Pesquisadores têm publicado trabalhos experimentais e teóricos para escoamentos laminares em conjunto com a transferência de calor em TCHs. Esses trabalhos geraram correlações, tanto para determinar o fator de atrito, quanto para caracterizar o número de Nusselt médio para escoamento plenamente desenvolvido. Sendo assim, uma correlação para o Nusselt médio (Nu_i) apresentada em BEJAN; KRAUS (2003), para temperatura de parede constante e para fluxo de calor constante é apresentada a seguir.

$$Nu_{i,Tc} = \left[\left(3,657 + \frac{4,343}{[1 + (957/P_{ri}H_e^2)]^2} \right)^3 + 1,158 \left(\frac{H_e}{1 + (0,477/P_{ri})} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \quad (2.19)$$

$$Nu_{i,Hc} = \left[\left(4,364 + \frac{4,636}{[1 + (1342/P_{ri}H_e^2)]^2} \right)^3 + 1,816 \left(\frac{H_e}{1 + (1,15/P_{ri})} \right)^{3/2} \right]^{1/3} \quad (2.20)$$

em que Nu_i refere-se ao número de Nusselt para a região interna ao tubo e os subscritos Tc e Hc indicam temperatura da parede constante e fluxo de calor constante, respectivamente. Além disso, P_{ri} representa o número de Prandtl para o fluido da parte interna do trocador de calor.

Uma vez dispostas situações para o caso do escoamento laminar, existem também correlações para o número de Nusselt em casos de escoamentos turbulentos. Antes disso, segundo o que se encontra em (BEJAN; KRAUS, 2003, Página 1089), diante dos esforços realizados por SRINIVASAN; NANDAPURKAR; HOLLAND (1986) conseguiu-se determinar um número de Reynolds para a região de transição (Re_{tr}) entre escoamento laminar e turbulento.

$$Re_{tr} = 2100 \left(1 + 12 \sqrt{\frac{d}{2R}} \right) \quad 10 < \frac{2R}{d} < \infty \quad (2.21)$$

Depois de conhecido o valor de Re_{tr} , para a situação de escoamento turbulento, pode-se utilizar o número de Nusselt determinado por MORI; NAKAYAMA (1967).

$$Nu_i = \frac{P_{ri}}{26,2(P_{ri}^{2/3} - 0,074)} Re^{4/5} \left(\frac{d}{2R} \right)^{1/10} \left[1 + 0,098 \left(Re \left(\frac{d}{2R} \right)^2 \right)^{1/5} \right]; \quad \text{para } P_{ri} \approx 1 \quad \text{ou}$$

$$Nu_i = \frac{P_{ri}^{0,4}}{41} Re^{5/6} \left(\frac{d}{2R} \right)^{1/12} \left[1 + 0,061 \left(Re \left(\frac{d}{2R} \right)^{2,5} \right)^{1/6} \right]; \quad \text{para } P_{ri} > 1 \quad (2.22)$$

Diante de correlações que determinam o valor do número de Nusselt para o lado interno do trocador de calor, são encontrados na literatura trabalhos que tratam do lado externo ao trocador de calor. Dessa forma, segundo HAVAS; DEÁK; SAWINSKY (1987), para determinadas condições geométricas e das propriedades termofísicas do fluido externo ao trocador de calor, consegue-se encontrar o número de Nusselt para o lado externo ao trocador de calor. O trabalho de HAVAS; DEÁK; SAWINSKY (1987) tratou de 179 experimentos em um tanque onde se encontravam um trocador de calor helicoidal e um agitador.

Um número de Reynolds modificado foi introduzido no trabalho de HAVAS; DEÁK; SAWINSKY (1987). Os dados adquiridos diante de todos os experimentos realizados foram ajustados, com um desvio de 5,1%, de forma a se obter a seguinte correlação para o valor do número de Nusselt para o lado externo ao trocador de calor:

$$Nu_e = 0.187 R_{e,o}^{0,688} P_{re}^{0,36} Vis^{0,11} \left(\frac{d_a}{D_t} \right)^{0,62} \quad (2.23)$$

para $R_{ee} \in [1,3 \times 10^3; 1,6 \times 10^5]$; $R_{e,o} \in [3,2 \times 10^2; 3,5 \times 10^4]$; $P_{re} \in [2,7; 124]$; $Vis \in [0,16; 2,9]$; $(d_a/D_t) \in [0,25; 0,4]$; $(d_o/D_t) \in [0,03; 0,051]$. Em que Vis é a razão de viscosidades dinâmicas (μ_o/μ_p), d_a refere-se ao diâmetro do agitador, d_o é o diâmetro externo do

tubo, n é a frequência rotacional (em Hz), D_t consiste no diâmetro do tanque principal onde se encontra o trocador de calor, P_{re} diz respeito ao número de Prandtl para o fluido do lado externo do trocador de calor e ρ é a massa específica do fluido do lado externo do trocador de calor. Os valores de μ_o e μ_p são as viscosidades dinâmicas para o fluido do lado externo e para o fluido do lado interno na temperatura da parede, respectivamente. As equações para o número de Reynolds (R_{e2}) e o número de Reynolds modificado para o lado externo ($R_{e,o}$) estão evidenciadas, de forma respectiva, a seguir.

$$R_{e2} = \frac{d_a^2 n \rho}{\mu_o} \quad (2.24)$$

$$R_{e,o} = \frac{d_o d_a n \rho}{\mu_o} \quad (2.25)$$

Além da correlação para o número de Nusselt apresentada, existem outras, tais como a de NAGATA *et al.* (1972), com parâmetros parecidos com os apresentados em HAVAS; DEÁK; SAWINSKY (1987). A correlação mencionada está mostrada a seguir, na equação (2.26).

$$Nu_e = 0,08 R_{e2}^{0,56} P_{re}^{1/3} Vis^{0,14} \left(\frac{L_a/d_a}{0,2} \right)^{0,15} \left(\frac{d_o/D_t}{0,064} \right)^{0,5} \quad (2.26)$$

em que L_a refere-se à altura do impelidor utilizado para promover a agitação.

Um aspecto importante a ser citado refere-se à definição do número de Nusselt para trocadores de calor genéricos, com seção transversal circular. Tal relação apresenta-se como:

$$Nu = \frac{h D_q}{k} \quad (2.27)$$

em que Nu representa o número de Nusselt, h diz respeito ao coeficiente convectivo de transferência de calor, D_q é algum diâmetro característico (externo ou interno ao tubo) e k é a condutividade térmica do fluido dependendo do lado interno ou externo ao trocador de calor. Com isso, a partir de Nu , obtém-se h , que é utilizado para determinar o coeficiente global de transferência de calor.

Além do mais, outro fator importante para o projeto de trocadores de calor helicoidais consiste na dependência existente entre o comprimento total do trocador de calor - L , com o número de espiras - N e o espaçamento entre as espiras - H . Sendo assim, a equação a seguir refere-se a essa situação (GNIELINSKI, 2010).

$$L = N\sqrt{(\pi D)^2 + H^2} \quad (2.28)$$

em que $D = 2R$.

Neste trabalho faz-se necessário conhecer a equação da taxa de transferência de calor por condução para um trocador de calor com seção transversal circular (cilindro). Isso porque é relevante inferir a temperatura média da parede da parte externa ao trocador de calor (uma vez que existe dificuldade em medi-la), para se determinar a viscosidade dinâmica nessa temperatura do fluido ao lado externo do trocador de calor. Essa viscosidade dinâmica é utilizada para se determinar o valor do número de Nusselt para o lado externo do trocador de calor, equação (2.23). A equação da taxa de transferência de calor por condução (q_r) segue:

$$q_r = \frac{2\pi L k_t (T_{m,i} - T_p)}{\ln(d_o/d_i)} \quad (2.29)$$

em que L refere-se ao comprimento total do trocador de calor, k_t corresponde à condutividade térmica do material constituinte do trocador de calor, $T_{m,i}$ é a temperatura média do fluido do lado interno, T_p diz respeito à temperatura média da parede, d_o e d_i são os diâmetros externo e interno do tubo.

2.3 Objetivos de Controle

O controle de um processo refere-se basicamente em estabilizar uma variável definida em um valor desejado, denominado *set-point* ou, ainda, ponto de equilíbrio ou também atuar no sentido de seguir o sinal de referência (OGATA, 1993). Porém, os processos têm características dinâmicas e as variáveis de saída desviam-se do valor desejado ao longo da operação. Basicamente, isso acontece devido aos efeitos dos distúrbios ou a mudanças de *set-point*.

Tem-se um controle por regulação quando a requisição do sistema de controle é apenas compensar os efeitos dos distúrbios, buscando manter a saída no valor de referência definido. Dessa forma, o controlador atua de modo a minimizar o problema causado pela perturbação.

Já o controle servo é caracterizado quando, numa modificação de *set-point*, o controlador tem a capacidade de fazer com que a variável de saída siga em direção ao novo valor de referência. O sistema de controle age de maneira a seguir a mudança de referência.

2.3.1 Modelagem Matemática

Para realizar o projeto para um controlador de um sistema, inicialmente é necessário conhecer bem o processo e efetuar uma modelagem matemática. Existem vários métodos que permitem identificar sistemas. Entre eles existem os métodos de entrada-saída, que são vantajosos pelo conhecimento da entrada (sinal injetado no sistema pelo controlador e, portanto, conhecido) e pelo sinal de saída que, em geral, é medido. Dentre esses métodos, selecionou-se a aplicação dos mínimos quadrados para um sistema aproximado de integrador com tempo morto. A equação (5.2), a seguir, trata desse caso:

$$G_p(s) = \frac{K_m e^{-\theta s}}{s} \quad (2.30)$$

em que K_m representa o ganho do sistema e θ refere-se ao tempo morto.

A metodologia adotada refere-se a um sistema aproximado por uma função de primeira ordem, dada pela equação (2.31):

$$T(t) = K_m E t \quad (2.31)$$

em que T trata-se da saída do sistema e E da entrada do sistema.

Diante desse contexto, requer-se determinar o valor do parâmetro K_m . Para tal é realizado um ajuste polinomial baseando-se nos mínimos quadrados. Assim, obtém-se os valores dos coeficientes angular e linear para a resposta temporal. Deseja-se que o coeficiente linear seja o mais próximo possível de zero. O valor de K_m é encontrado pela razão entre o coeficiente angular da função polinomial de primeira ordem ajustada e a variação da amplitude do degrau na entrada do sistema.

Nota-se que esses procedimentos apresentam-se como uma boa metodologia para identificação de sistemas aproximados por um integrador com atraso. Isso devido ao fato de que a utilização dos mínimos quadrados gera uma mitigação dos efeitos ruidosos do sistema de medição.

2.3.2 Obtenção de controladores

Quando existe um modelo matemático representativo para a dinâmica de um processo, o foco passa para o projeto e obtenção de controladores. Nessa etapa podem ser utilizadas várias técnicas para resultar em um controle de sistema. A mais comum, simples e rápida delas consiste na síntese de controladores PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Outra abordagem, menos usual, refere-se ao projeto de controladores por alocação de pólos no espaço de estados.

Controladores PID

O algoritmo de controle PID é a tipologia de controle por realimentação mais utilizada na indústria (ASTROM; HAGGLUND, 2007). Relata-se que aproximadamente 95% das malhas de controle de processos industriais são do tipo PID, sendo que deste montante, cerca de 80% consiste no controlador PI.

Tratando-se da área de controle de processos, esta corresponde a uma das que mais avançaram no final do século XX, tanto em pesquisa teórica quanto prática. Mesmo com isso, o controlador PID tem sua aplicação às mudanças de tecnologia ao longo dos anos, desde suas primeiras implementações de forma mecânica e pneumática até a fase dos microprocessadores (RODRIGUES, 2009).

O bloco de controle PID, como é sugerido pelo próprio nome, possui em resposta a uma excitação na entrada do processo, uma parcela proporcional (P) ao sinal de erro, uma participação que é a integral do erro e que infere à ação integral (I) e outra parcela referente à derivada do erro e que provê a ação derivativa (D). A seguir, na equação (2.32), é apresentado o algoritmo PID no domínio do tempo, enquanto que na equação (2.33) é evidenciado o domínio da frequência para essa abordagem.

$$u(t) = K \left(e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + T_d \frac{de(t)}{dt} \right) \quad (2.32)$$

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + sK_d \quad (2.33)$$

em que y corresponde à variável medida do processo, r é a variável de referência ou *set-point*, u é o sinal de controle ou variável manipulada (que atua diretamente na planta ou processo) e e refere-se ao sinal de erro entre a referência e a variável medida (ou variável de saída) do processo. O sinal de controle é a soma dos termos que compõem o bloco PID. Os parâmetros para o controlador dizem respeito a: K - ganho proporcional, T_i - tempo integral e T_d - tempo derivativo. A Figura 2.4 trata da disposição em diagrama de blocos para um sistema de controle com realimentação (*feedback*).

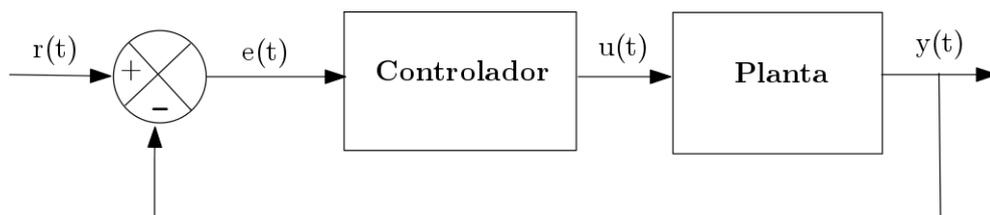


Figura 2.4: Diagrama de blocos de processo com controle realimentado. Adaptada de (SOUZA, 2015, Página 11).

Nota-se que a ação proporcional não garante ao sistema de malha fechada atingir o valor desejado. Sempre apresenta-se um erro entre a saída medida em regime permanente e o sinal de referência (OGATA, 1993). Também é importante salientar que quanto maior o valor de K_p , menor é o erro. No entanto, pior se torna o regime transitório do sistema (tende a uma resposta oscilatória).

Tratando-se da ação de controle integral, a sua principal função é eliminar o erro de estado estacionário observado com o controle apenas proporcional. Tal ação faz com que o sistema apresente, depois do transitório, a resposta na saída igual ao sinal de referência. Ou seja, o erro em regime permanente é zero para sistemas com ação de controle integral. Isso acontece quando o sinal de referência consiste em um degrau. Quando se analisa o valor do tempo integral (T_i), quanto maior for esse parâmetro menor será a sobrepassagem do sinal de saída do sistema. No entanto a resposta tende a se tornar mais lenta.

Já se referindo ao modo derivativo do controlador PID, o seu propósito é melhorar a estabilidade de sistemas controlados em malha fechada. Quando se é utilizada ação derivativa precisa-se de um filtro para atenuar ruído de alta frequência que tende a ser amplificado por tal ação (ASTROM; HAGGLUND, 2007).

Para realizar a síntese de controladores PID existem inúmeros métodos práticos na literatura. Muitos deles são apresentados em O'DWYER (2010), para sistemas aproximados por um integrador com tempo morto, como é mostrado no diagrama da Figura 2.5.

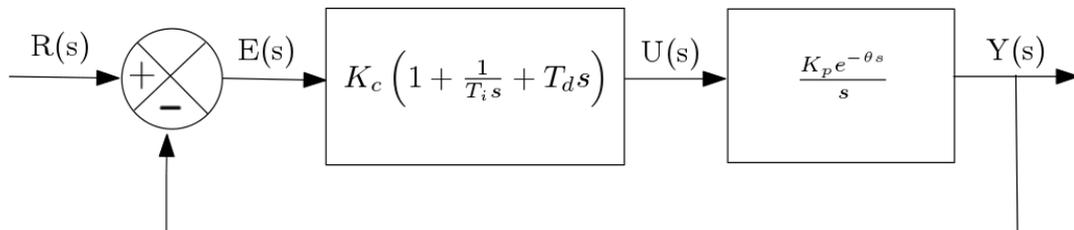


Figura 2.5: Diagrama de blocos de processo por realimentação com controle PID para sistema integrador com atraso de transporte. Adaptada de (O'DWYER, 2010, Página 350).

Sendo assim, serão utilizados alguns métodos de síntese de controladores para sistema integrador com atraso de transporte, como caracterizado em (O'DWYER, 2010, Página 350).

2.4 Calibração

Calibração é um conjunto de procedimentos destinados a estabelecer uma relação entre uma grandeza física conhecida ou padronizada e as leituras de um instrumento de medição no qual esta grandeza é aferida (SOUZA, 2015).

Existem duas tipologias para a calibração. Uma delas refere-se a calibração estática, na qual o sinal de entrada é constante. A outra equivale a calibração dinâmica, pela qual o sinal de entrada se modifica ao longo do tempo.

Para a realização de uma calibração deve-se dispor de um conjunto de dados de aquisições do medidor. Para isso, é preciso que a variável a ser medida entre em regime permanente. Dessa maneira, realizam-se inúmeras medidas e determina-se o valor médio para esse conjunto de dados, enquanto a variável medida é mantida constante. Baseando-se nos valores médios, obtém-se a relação entre o sinal medido e o sinal do sensor por meio de um ajuste polinomial.

Para a situação em que existe uma relação aparentemente linear entre o sinal medido e o sinal produzido pelo sensor, o ajuste polinomial é caracterizado por:

$$y(k) = mk + b \quad (2.34)$$

em que m e b correspondem aos coeficientes angular e linear, respectivamente.

Para encontrar a relação que melhor se ajusta aos dados utiliza-se o método dos mínimos quadrados. Sendo assim, as equações para calcular m e b são dadas por DOEBELIN (1990):

$$m = \frac{N \sum_{i=1}^N ky - (\sum_{i=1}^N k)(\sum_{i=1}^N y)}{N \sum_{i=1}^N k^2 - \left(\sum_{i=1}^N k\right)^2} \quad (2.35)$$

$$b = \frac{(\sum_{i=1}^N y)(\sum_{i=1}^N k^2) - (\sum_{i=1}^N ky)(\sum_{i=1}^N k)}{N \sum_{i=1}^N k^2 - \left(\sum_{i=1}^N k\right)^2} \quad (2.36)$$

em que N é o número de amostragens, y e k correspondem aos dados.

E os desvios padrões referentes aos parâmetros m , b e y são dados por:

$$\begin{aligned} \sigma_m^2 &= \frac{N\sigma_y^2}{N \sum_{i=1}^N k^2 - \left(\sum_{i=1}^N k\right)^2} \\ \sigma_b^2 &= \frac{N\sigma_y^2 \sum_{i=1}^N k^2}{N \sum_{i=1}^N k^2 - \left(\sum_{i=1}^N k\right)^2} \\ \sigma_y^2 &= \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (mk + b - y)^2 \end{aligned} \quad (2.37)$$

em que σ_i , para $i = m, b$ e y , são as incertezas de medição relacionadas a cada um dos parâmetros de (2.34).

Instituindo os limites para $\pm 3\sigma_m$ e $\pm 3\sigma_b$, têm-se intervalos de confiança de 99,7% para o ajuste caracterizado.

Projeto do Trocador de Calor Helicoidal

Neste capítulo pode ser verificada uma explanação geral sobre o protótipo didático de automação industrial construído por ARAÚJO (2015). Além disso, são feitas considerações quanto ao projeto do trocador de calor helicoidal, em que se deseja obter parâmetros geométricos para a sua construção.

3.1 Descrição básica da planta de automação industrial

Com o propósito de projetar e construir uma planta didática de automação industrial para processos em batelada que apresentasse flexibilidade em ser comandada por meio de um sistema microprocessado (Microcontrolador ou Controlador Lógico Programável - CLP), ARAÚJO (2015) desenvolveu o TCC no *campus* Divinópolis, do CEFET-MG. Para tal o protótipo situava-se no laboratório de Automação Industrial, tendo acesso aos CLPs do local. A Figura 3.1 ilustra a planta didática de automação industrial implementada.

3.1.1 Parte mecânica

A respeito da parte mecânica, destaca-se o desenvolvimento da estrutura de sustentação da planta. Esta consiste em tubos de aço quadrados ABNT1020, dimensões de 20x20x1,2 mm, popularmente conhecidos como *metalon*. A dimensão da bancada é de 1170 mm de comprimento, 480 mm de largura e aproximadamente 1600 mm de altura. O processo de união dos tubos se deu por meio de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. A estrutura possui um coeficiente de segurança de valor 4,0, o que torna o projeto superdimensionado, uma vez que em razões práticas um fator de segurança comum consiste em 3,0. Além disso, foram realizadas simulações por meio de elementos finitos e avaliou-se a geometria quanto à tensão mecânica (esforço), ao deslocamento e à deformação. Observou-se que os tubos atendem a demanda requerida no trabalho. A

3.1. Descrição básica da planta de automação industrial



Figura 3.1: Planta didática de automação industrial para análise de fluido em batelada (ARAÚJO, 2015).

Figura 3.2, representa como foi desenvolvida a estrutura de sustentação.

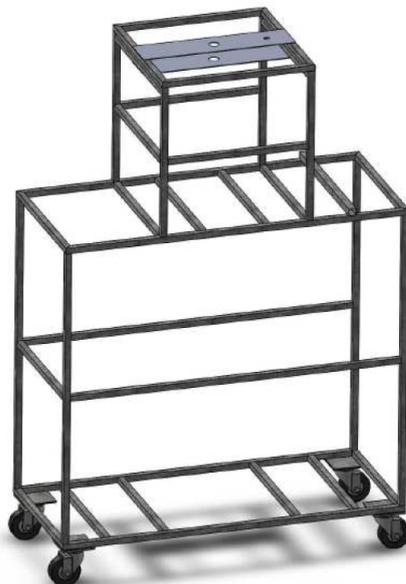


Figura 3.2: Estrutura de sustentação da planta didática (ARAÚJO, 2015).

Outra parte mecânica consiste nos tanques e reservatórios utilizados. Tratando-se do tanque principal, onde podem ocorrer processos com agitação de fluido, ele possui uma dimensão padronizada para caldeirões industriais (N45) usados na indústria de alimentos, com 450 mm de diâmetro. Além disso suporta um volume de 68 litros. Já se referindo

aos dois reservatórios, um deles é usado para armazenar fluido proveniente da batelada e o outro para armazenar fluido em temperatura ambiente. Os reservatórios são iguais e possuem um volume máximo de 70 litros. Eles são comunicantes através de uma tubulação inferior com um registro do tipo esfera, que pode ser aberto manualmente pelo operador da planta para garantir reaproveitamento de fluido quando atingir novamente a temperatura ambiente.

Um impelidor tipo hélice também está presente no protótipo. Isso para garantir a possibilidade de agitação no tanque principal. Possui uma altura de aproximadamente 30 mm e diâmetro total de 117 mm e é constituída por três pás. A Figura 3.3 evidencia o impelidor utilizado.



Figura 3.3: Impelidor do tipo hélice, com três pás (ARAÚJO, 2015).

3.1.2 Parte Elétrica

Sobre a parte elétrica do protótipo, existem alguns componentes que fazem o funcionamento da planta. Eles se caracterizam pelo motor utilizada para movimentação do agitador no tanque principal, eletrobomba hidráulica, válvula solenóide, a resistência elétrica empregada no tanque principal para prover o aquecimento de fluido durante a batelada e os sensores de temperatura e vazão utilizados.

O motor empregado para o impelidor consistiu no modelo 24V MY6812 100W e 2800 RPM. Ele está acoplado junto a uma correia que transmite o deslocamento angular para o impelidor. A rotação máxima que o impelidor pode alcançar consiste em 1048 RPM, uma vez que existe um conjunto mecânico de redução implementado. A Figura 3.4 mostra o motor utilizado.

A válvula solenóide permite o descarregamento de fluido do tanque principal para o reservatório. Ela consiste no modelo normalmente fechado (NF) de 24 V. Com relação à eletrobomba, refere-se à bomba de porão de uso náutico *Shurflo* 380, modelo 355-020-10.



Figura 3.4: Motor utilizado para o agitador (ARAÚJO, 2015).

Possui tensão de alimentação nominal de 12 V, diâmetro do bocal de saída de 19 mm, corrente elétrica máxima de 1,7 A e vazão máxima de 1438 Lph (litros por hora).

Levando-se em consideração o aquecimento de fluido na batelada, emprega-se uma resistência elétrica de imersão circular, modelo LCS 151, com 5000 W de potência elétrica e tensão de alimentação nominal apropriada de 220 VCA. Operando em condições máximas, consegue aquecer 40 litros de água partindo da temperatura ambiente (298 Kelvin ou 25°C) até a temperatura de 50°C (323 K) em 14 minutos. Essa resistência não é utilizada para as finalidades deste trabalho, uma vez que outra forma de aquecimento foi desenvolvida.

Outro componente presente na planta é o sensor de temperatura digital DS18B20. Ele é empregado para medir a temperatura no tanque principal durante o processo de batelada. Na Figura 3.5 apresenta-se o sensor de temperatura (conectado por um cabo preto dentro do tanque), a resistência elétrica de imersão, juntamente com o impelidor utilizado.

O sensor de vazão utilizado refere-se ao modelo YF-S201, que trabalha numa faixa de vazão entre 1 e 30 litros por minuto, com tensão de operação utilizada de 5 VDC. Ele é empregado para limitar o volume de água que entra no tanque principal. A Figura 3.6 mostra o dispositivo montado junto da planta didática.

Por fim, está presente no protótipo uma caixa de comandos elétricos em que se comunicam os sinais elétricos dos sensores, bem como é realizada a alimentação dos dispositivos elétricos. A Figura 3.7 evidencia a caixa de comando. Observa-se a separação dos circuitos e a possibilidade de utilização de sistema com microcontrolador ou CLP para comandar



Figura 3.5: Vista dos componentes principais no interior do tanque agitado (ARAÚJO, 2015).



Figura 3.6: Sensor de vazão na planta didática (ARAÚJO, 2015).

a planta didática. O valor de comando quando se usa microntrolador refere-se a 5 V, enquanto que para o CLP se emprega 24 V. Além do mais, salienta-se que existe um visor *LCD* para permitir a interação homem-máquina, em que se pode acompanhar as grandezas (temperatura, volume) relacionadas ao processo de batelada. Além do mais, uma fonte de alimentação DC (corrente contínua) de computador tradicional é empregada para alimentar os dispositivos elétricos necessários (motor do agitador - até 16 V, eletrobomba hidráulica - 12 V).

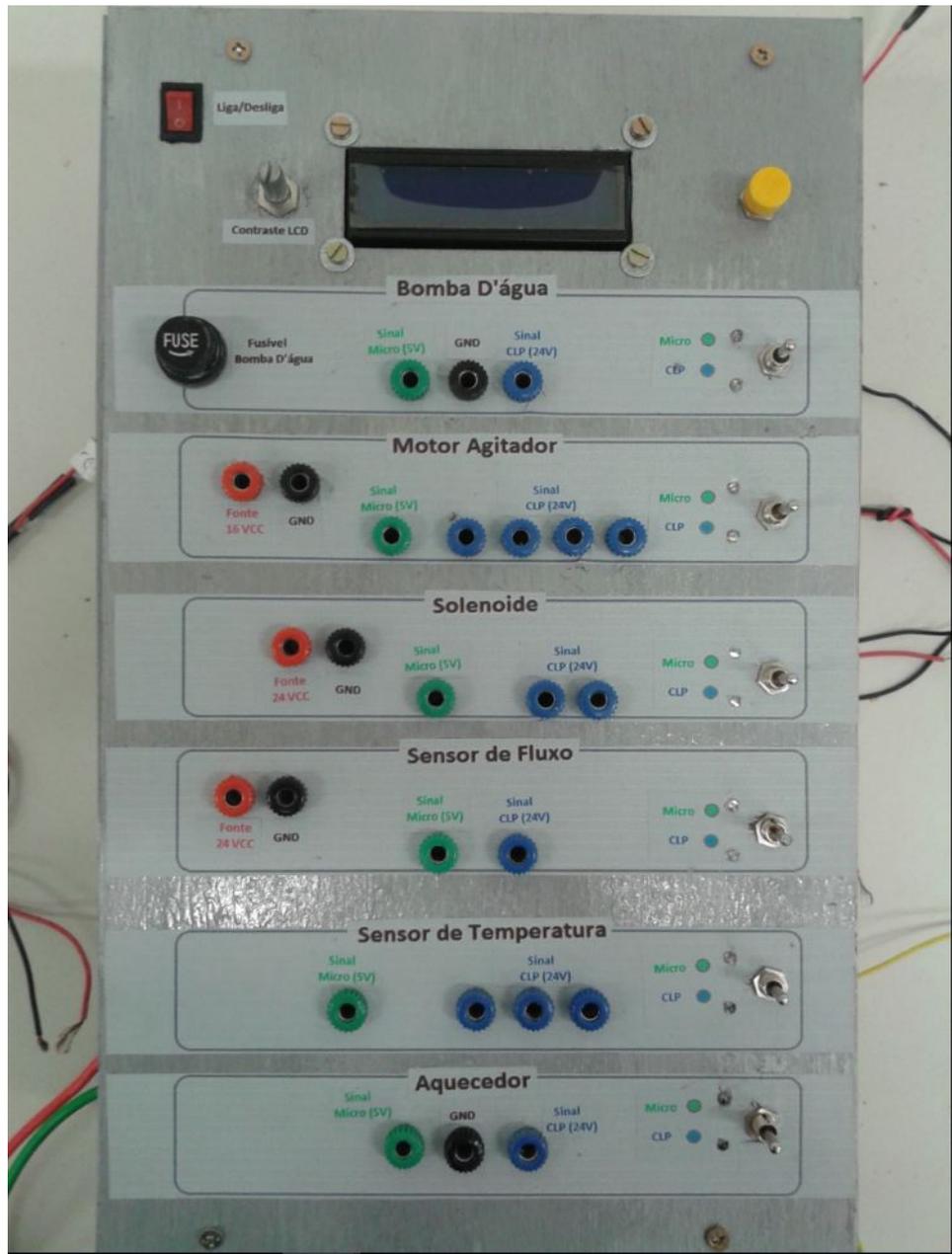


Figura 3.7: Caixa para comando elétrico (ARAÚJO, 2015).

3.2 Procedimentos de projeto do trocador de calor helicoidal

Uma vez conhecida a planta didática de automação industrial foi possível iniciar o projeto para um trocador de calor helicoidal que integrará o tanque principal do dispositivo mecatrônico citado. Para isso, resolveu-se criar um programa no ambiente MATLAB.

Primeiramente, necessitou-se fixar alguns parâmetros para o trocador de calor helicoidal, já que o tanque agitado possui dimensões geométricas bem definidas. Adotou-se para o raio das espiras o valor de $R = 178,7$ mm. Isso porque o tanque possui diâmetro de

$D_t = 450$ mm. A altura do trocador de calor definida correspondeu a $L_t = 200$ mm, uma vez que, diante dos testes realizados por ARAÚJO (2015), é previsto derramamento de água do tanque agitado para rotações próximas do limite máximo, equivalente a 1048 RPM. O fluido interno ao TCH correspondeu ao fluido quente e água dentro do tanque (e externa ao TCH) se referiu ao fluido frio. As temperaturas de projeto do fluido quente na entrada e saída foram $T_{h,i} = 363,15$ Kelvin e $T_{h,o} = 343,15$ Kelvin, respectivamente. Já a temperatura para o fluido frio de entrada consistiu em $T_{c,i} = 293,15$ Kelvin, enquanto que para o fluido frio na saída delimitou-se o valor de $T_{c,o} = 353,15$ Kelvin. Os diâmetros interno e externo (d_i e d_o , respectivamente) dos tubos de cobre flexíveis adotados foram avaliados de acordo com os materiais encontrados comercialmente. Sendo assim, esse correspondeu-se como um parâmetro a ser inserido manualmente na rotina operacional do programa quando for executado. Resolveu-se adotar o tubo de dimensões 12,7 x 0,79 mm devido seu custo comparado a tubos com diâmetros maiores, além de que diâmetros menores aumentam o valor do coeficiente convectivo. Parâmetros importantes de serem comentados são: o diâmetro do agitador empregado – $d_a = 117$ mm, altura do impelidor – $L_a = 31,1$ mm e a rotação mínima utilizada para projeto do TCH, $n = 200$ RPM. A Figura 3.8 exemplifica, de forma simplificada, a entrada e a saída de fluido quente do tanque agitado.

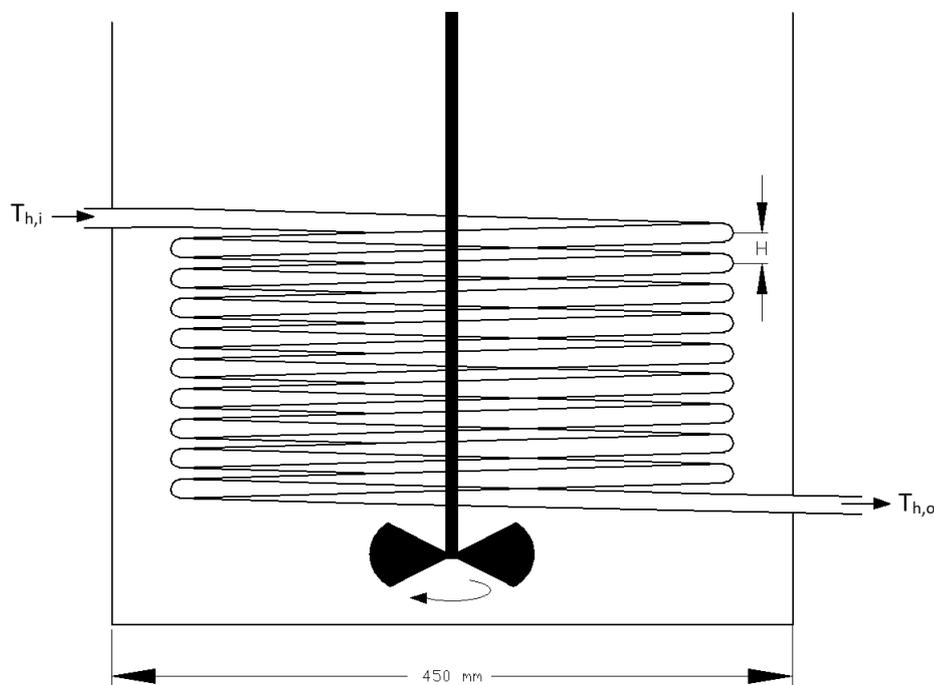


Figura 3.8: Exemplo de TCH no tanque agitado.

Logo após, foram determinadas as propriedades termofísicas dos fluidos quente e frio para os valores de temperatura médios desses fluidos. O fluido frio adotado, como já

citado, consistiu na água, que foi utilizada por ARAÚJO (2015). Já o fluido quente que circulará internamente ao trocador de calor é o óleo térmico *Mobiltherm 605*. Este fluido foi escolhido diante de suas características, tais como alta resistência a degradação térmica, boa fluidez em temperaturas próximas do ambiente, maior vida útil comparado com os fluidos térmicos de sua categoria de utilização, boa taxa de transferência de calor. Além disso, espera-se que seja um componente a ser empregado em trabalhos de pesquisa e pós-graduação, futuramente.

Dando prosseguimento, encontrou-se a vazão mássica do fluido quente baseada na vazão volumétrica máxima fornecida por uma bomba de óleo comercial para automóveis. Esse parâmetro também foi ajustado no programa para ser inserido de forma manual quando o código for executado. Para efeitos de projeto, adotou-se o valor de $Q_h = 3$ litros/min. Diante disso, verificou-se a taxa de transferência de calor do óleo térmico (fluido quente). Além do mais, foi possível calcular o número de Reynolds de acordo com a equação (2.18) para o escoamento interno ao trocador de calor. Dessa forma, usando a equação (2.21), conseguiu-se verificar se o fluxo de óleo térmico é laminar ou turbulento.

Após, definiu-se um valor qualquer inicial para o espaçamento (H) entre as espiras. Com isso, o valor do comprimento total do trocador de calor (L) foi encontrado por meio da equação (2.28), já que a altura do trocador de calor é fixada de forma aleatória como fator a ser corrigido para o processo iterativo.

Uma vez o escoamento sendo laminar, o programa realiza a aplicação das correlações caracterizadas nas equações (2.19) e (2.20). Para este trabalho resolveu-se adotar a equação (2.19), que consiste no caso de temperatura de parede constante. Isso porque não foram encontradas na literatura correlações similares à situação apresentada neste sistema, o qual não apresenta temperatura de parede constante, nem mesmo fluxo de calor constante. Caso o fluxo encontrado seja turbulento, há a utilização das correlações para o número de Nusselt da equação (2.22). Obtido o valor do número de Nusselt para o lado interno do trocador de calor, foi possível encontrar o coeficiente convectivo interno. Isso por meio da equação (2.27).

Depois de caracterizado o coeficiente convectivo interno, fez-se a determinação da temperatura média da parede da região externa ao trocador de calor. Isso através da equação (2.29). Sendo assim, conseguiu-se encontrar o valor da viscosidade dinâmica para a água (fluido do lado externo ao TCH). Assim, aplicando-se as condições para as correlações das equações (2.23) ou (2.26), determinou-se o valor para o Nusselt correspondente à região externa do trocador de calor. E, por meio da equação (2.27), encontrou-se o coeficiente convectivo externo de transferência de calor.

De posse dos coeficientes convectivos interno e externo, e conhecendo-se a equação (2.1), encontrou-se o coeficiente global de transferência de calor. E, em conjunto com

a equação (2.13), conseguiu-se determinar o valor para a taxa de transferência de calor baseada na área externa do trocador de calor.

Assim, a taxa de transferência de calor encontrada ($q_{calculado}$) é comparada com a taxa de transferência de calor do fluido frio baseado na temperatura média entre a entrada e a saída (q_{agua}), no calor específico da água para a temperatura média, além da razão entre o volume de água no tanque ($V = 42,94$ litros) e o tempo de batelada ($t_b = 35$ minutos). Enquanto o valor absoluto da diferença dessas duas taxas de transferência de calor não convergir – ou seja, $|q_{agua}| \approx |q_{calculado}|$ – o programa atualiza o valor do espaçamento das espiras (H) e recomeça os cálculos a partir da determinação do comprimento total do trocador de calor (L) baseado na fixação da sua altura ($L_t = 200$ mm). Sendo assim, o programa retorna os valores de L , H e N , respectivamente, o comprimento total da tubulação do trocador de calor, o espaçamento entre as espiras e o número de espiras. A Tabela 3.1 dispõe os parâmetros fixos e resultados obtidos para o TCH. Os parâmetros em azul referem-se aos valores obtidos para a correlação (2.23) e em vermelho referente à equação (2.26).

Tabela 3.1: Parâmetros fixos e resultados para o TCH.

Parâmetro	Valor
$T_{h,i}$	393,15 K
$T_{h,o}$	343,15 K
$T_{c,i}$	293,15 K
$T_{c,o}$	333,15 K
L_t	200 mm
d_i	11,1 mm
d_o	12,7 mm (1/2") – NBR14745
d_a	117 mm
D_t	450 mm
L_a	31,1 mm
R	178,7 mm
L_{tanque}	270 mm
n	200 RPM (3,333 Hz)
Q_q	3 l/min (0,0408 Kg/s)
t_b	35 min (2100 s)
H_i	25 mm
L_1	10,92 m
N_1	9,723
H_1	20,6 mm
L_2	11,066 m
N_2	9,857
H_2	20,3 mm

A Figura 3.9, demonstra como é o fluxograma do modelo de projeto do trocador de calor helicoidal.

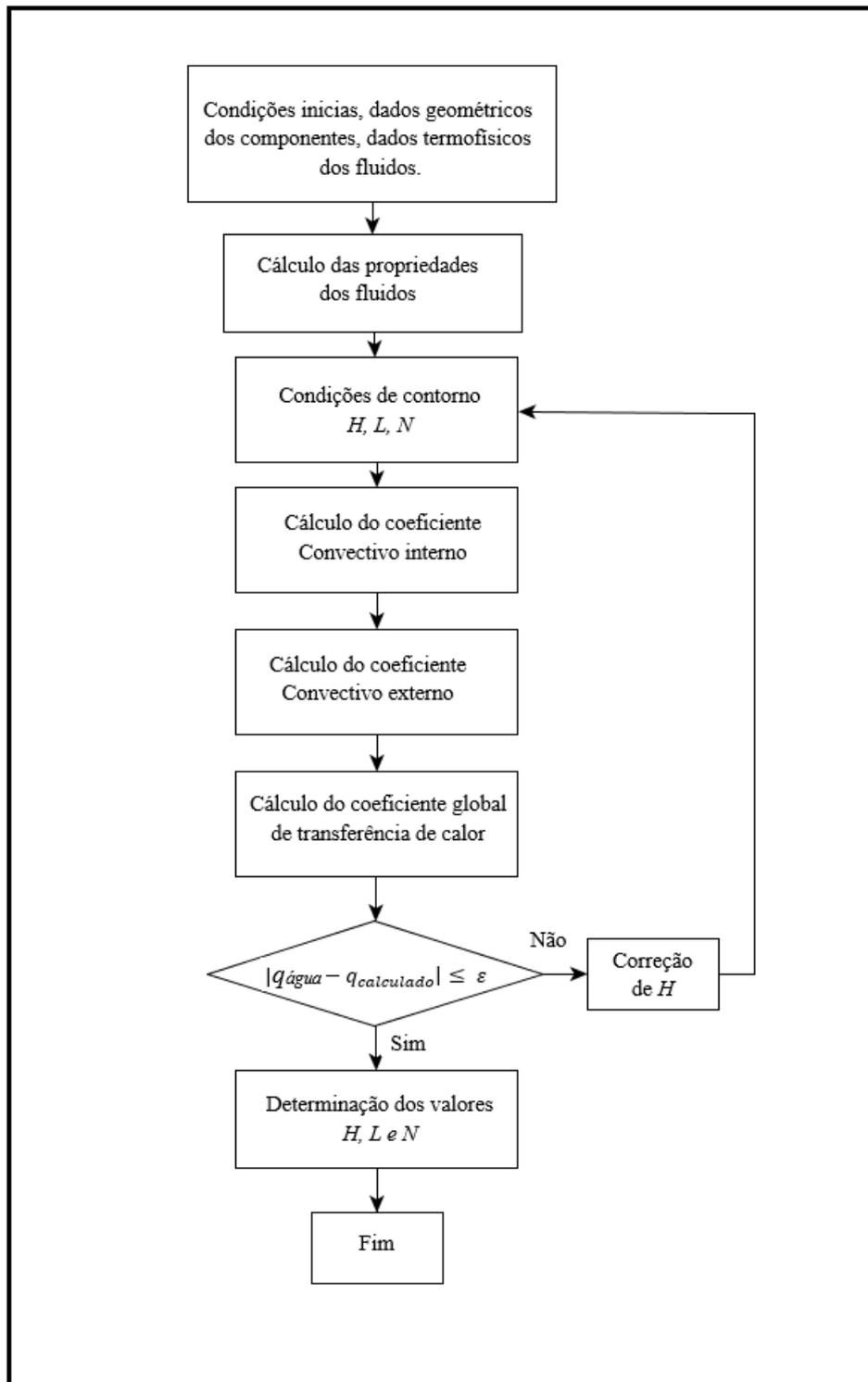


Figura 3.9: Fluxograma do projeto do trocador de calor helicoidal.

Já a Figura 3.2 evidencia o desenho esquemático desenvolvido para o TCH. Já O algoritmo desenvolvido em ambiente MATLAB, que calcula os parâmetros fundamentais geométricos para um trocador de calor helicoidal, encontra-se no Apêndice A.

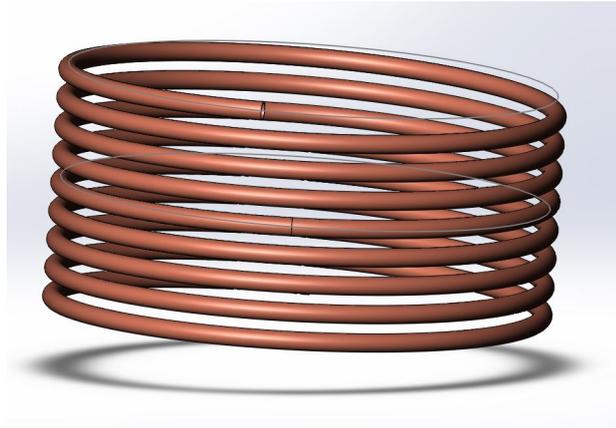


Figura 3.10: Concepção do TCH em programa de desenho tridimensional

3.3 Construção do TCH

Finalizado o projeto dimensional do trocador de calor helicoidal, partiu-se para a sua implementação física. Sendo assim, realizou-se uma pesquisa dos tipos de tubos de cobre comerciais. O tipo adotado para este trabalho consistiu no tubo de 12,7x0,79 mm. Para a sua fabricação se resolveu adotar os valores retornados pela correlação de HAVAS; DEÁK; SAWINSKY (1987). Isso porque apresenta desvio de 5,1%, de acordo com revisão de literatura, enquanto que a correlação de NAGATA *et al.* (1972) não trata do seu fator de confiança. Assim, realizou-se um dobramento de forma manual, por meio de um molde com o diâmetro interno das espiras do TCH. Terminado o dobramento, mediu-se corretamente o espaçamento entre as espiras, de 20,6 mm, e elaborou-se 4 apoios de madeira com furos de 13 mm. Eles foram espaçados de forma correta e suficientes para os tubos de cobre serem inseridos. Por fim, obteve-se o trocador de calor helicoidal, mostrado na Figura 3.11.



Figura 3.11: Obtenção do TCH real.

Descrição e construção da parte eletromecânica

Este capítulo trata da seleção e implementação das partes adicionais à planta didática, para se integrarem ao protótipo e permitirem a troca de calor desejada entre os fluidos do processo de batelada.

4.1 Definição dos componentes principais

Tratando-se dos itens principais utilizados no projeto eletromecânico, estes foram escolhidos de forma a atenderem expectativas como custo, qualidade, facilidade de implementação, parâmetros de projeto. Sendo assim, apresentam-se os componentes escolhidos para cada setor a ser implementado na planta.

4.1.1 Bomba para óleo térmico

Diante dos fatores custo, facilidade de montagem, dimensões reduzidas, a bomba de óleo térmica escolhida consistiu em um equipamento para motor do automóvel *Fusca*, fabricante SHADEK. Ela refere-se a uma bomba de engrenagens com deslocamento positivo, vazão máxima de 6,6 litros/min. A Figura 4.1 representa o componente mencionado.

4.1.2 Reservatórios para o fluido térmico e resfriamento

Levando-se em consideração um reservatório para fluido térmico a ser implementado, realizou-se uma seleção de acordo dois fatores: resistência à oxidação e também ao custo. Dessa maneira, com uma análise mercadológica, definiram-se os modelos de caldeirão industrial circulares de alumínio N26 e N30, com capacidades volumétricas de 12,74 litros e 18,38 litros, respectivamente. O caldeirão com capacidade menor refere-se ao reservatório de óleo, e aquele com maior capacidade consiste no resfriador. A Figura 4.2 ilustra um



Figura 4.1: Bomba de óleo para motor de *Fusca*.

exemplo de caldeirão N30. Segundo a classificação para caldeirões industriais, o número que acompanha o parâmetro N refere-se ao diâmetro do equipamento, em centímetros.



Figura 4.2: Caldeirão industrial N30.

4.1.3 Resistência elétrica tubular

A definição da resistência elétrica a ser utilizada para aquecimento de óleo térmico se baseou no valor referente a taxa de calor do óleo térmico interno ao trocador de calor helicoidal, retornado pelo programa criado em MATLAB. Esse valor consistiu em 4420 W. Sendo assim, depois de várias análises dos tipos de resistências elétricas de imersão, adotou-se o modelo utilizado em *Boiler* de aquecedor solar, de 3000 W, com 300 mm de comprimento. Fora utilizadas duas dessas resistências para estabelecer a potência necessária. A Figura 4.3 caracteriza o modelo selecionado.



Figura 4.3: Resistência elétrica tubular (3000 W).

4.1.4 Outros componentes e tabela de custo

Para a implementação da parte complementar à planta didática de automação industrial, necessitaram-se de vários outros componentes. Eles estão dispostos na Tabela 4.1, com a quantidade e custo para cada equipamento utilizado neste trabalho.

4.2 Concepção e implementação da parte mecânica

Uma vez de posse dos componentes selecionados para a parte complementar da planta didática de automação industrial, iniciou-se a concepção dos sistemas necessárias para aplicação do TCH no tanque agitado. Sendo assim, foram idealizados e implementados os sistemas relacionados à parte mecânica do trabalho.

4.2.1 Sistema de aquecimento

A resistência elétrica tubular utilizada possui 3000 W de potência e 300 mm de comprimento. Sabendo-se disso e comparando com o valor da taxa de calor calculada para o aquecimento do óleo térmico, foram necessários dois resistores tubulares. O recipiente no qual o óleo térmico é aquecido se referiu ao tubo de aço inoxidável circular de 100 mm e comprimento de 360 mm. Sendo assim, aplicando-se o processo de brasagem com varetas de solda Foscooper, foi possível fixar as resistências em duas chapas metálicas circulares com encaixe nas extremidades do tubo circular. Além disso, foram soldados por Foscooper pedaços de tubo de cobre nas extremidades do tubo de aço, por onde o fluido térmico irá escoar. Ao final, através da aplicação da fibra de vidro (popularmente conhecida como lã de vidro), isolou-se o equipamento termicamente e o encobriu com um filme de alumínio. A Figura 4.4 caracteriza o sistema de aquecimento citado.

4.2.2 Sistema de armazenamento e resfriamento de fluido térmico

Para armazenar o fluido térmico *Mobiltherm* 605 foi necessário um reservatório de alumínio do tipo caldeirão N26. Este, por sua vez, foi inserido dentro de outro caldeirão

4.2. Concepção e implementação da parte mecânica

Tabela 4.1: Preços para os componentes usados no TCC.

Quantidade	Componente	Valor
02	Resistência Elétrica tubular de Imersão 3000 W	R\$ 138,70
01	Bomba de óleo de Fusca	R\$ 69,00
01	Tampa para Bomba de óleo de Fusca	R\$ 15,00
01	Caldeirão industrial N26	R\$ 20,00
01	Caldeirão industrial N30	R\$ 35,00
04	Sensor de temperatura digital modelo DS18B20	R\$ 55,60
01	Motor 24 VDC 120 W	R\$ 65,00
01	Relé de Estado Sólido 40A - Fotek	R\$ 56,80
01	Dissipador de alumínio ionizado 10x10 mm	R\$ 15,00
15 m	Tubo de cobre flexível 12,7x0,79 mm	R\$ 160,00
01	Tubo de aço inoxidável circular sem costura 360x100 mm	Doado
10 litros	Óleo <i>Mobiltherm</i> 605	R\$ 100,00
10 m	Perfil de aço ABNT1020 20x20 mm	R\$ 50,00
04	Lã de vidro 1200x500x100 mm	R\$ 40,00
05	Papel Alumínio 7500x450 mm	R\$ 17,50
01	Placa cobreada de fenolite 200x100 mm	R\$ 5,00
01	Mosfet IRF540	R\$ 4,50
01	Disjuntor termomagnético GE - 32A	R\$ 25,00
5 m	Cabo condutor com revestimento de cerâmica - bitola $4mm^2$	R\$ 27,50
01 litro	Tinta Universal - cor Alumínio	R\$ 25,00
08	Varetas Foscooper	R\$ 16,00
07	Varetas IZE Migrare	R\$ 119,00
08	Curvas de 90 graus de cobre 12,7 mm	R\$ 32,00
02	Conjunto Niple/Porcas - 12,7 mm	R\$ 46,00
03	Gás MAP 400 gramas	R\$ 135,00
-	Outros componentes simples	R\$ 20,00
-	TOTAL	R\$ 1296,60

N30. Isso para garantir o resfriamento, quando necessário, de óleo quente por meio de água em temperatura ambiente na região entre os dois tanques. Esse tipo de resfriamento é conhecido por arrefecimento por camisa (*jacket*). Além do mais, quatro partes de tubos de cobre foram soldados por meio de brasagem a esse sistema, por meio da vareta IZE Migrare. Essa vareta permite que o material cobre se una ao alumínio. Duas partes dos tubos de cobre foram soldadas nos dois tanques, para possibilitar a entrada e saída de óleo do reservatório. Já as outras duas partições do tubo de cobre foram unidas somente ao tanque exterior ao reservatório de óleo. Sendo assim, a Figura 4.5, mostra como consistiu a implementação do sistema de resfriamento e armazenamento de óleo térmico.



Figura 4.4: Sistema de aquecimento de óleo térmico.



Figura 4.5: Sistema de armazenamento e resfriamento de óleo térmico.

4.2.3 Sistema de bombeamento

O sistema de bombeamento foi implementado com a finalidade de permitir o escoamento, de maneira forçada, do fluido térmico internamente ao TCH. Sendo assim, primeiramente soldaram-se a entrada e saída da bomba de óleo às partes de tubos de cobre, por meio da vareta IZE Migrare. Isso para permitir a união da bomba de alumínio com o cobre. Logo após, fechou-se a parte aberta da bomba por meio de uma tampa apropriada para o modelo adotado. Depois disso, foi desenvolvido, através de um torno mecânico, um acoplamento de aço ABNT1020, para permitir a ligação entre o eixo da bomba de óleo e o eixo do motor elétrico de 24 VDC e 120 W. Por fim, o conjunto pôde ser montado, como mostra a figura 4.6.

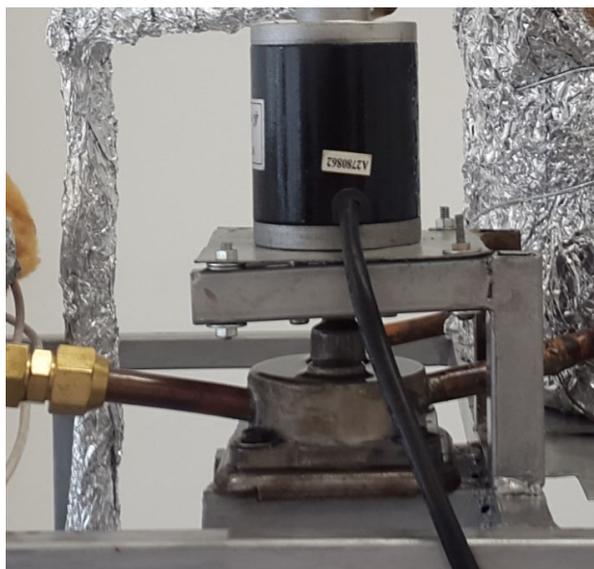


Figura 4.6: Sistema de bombeamento de óleo térmico.

4.2.4 Estrutura de sustentação

Com o objetivo de sustentar os sistemas apresentados, foi desenvolvida, por meio de um programa de desenho técnico tridimensional, a concepção da estrutura de sustentação para a parte complementar da planta didática. A Figura 4.7 mostra o desenho realizado.

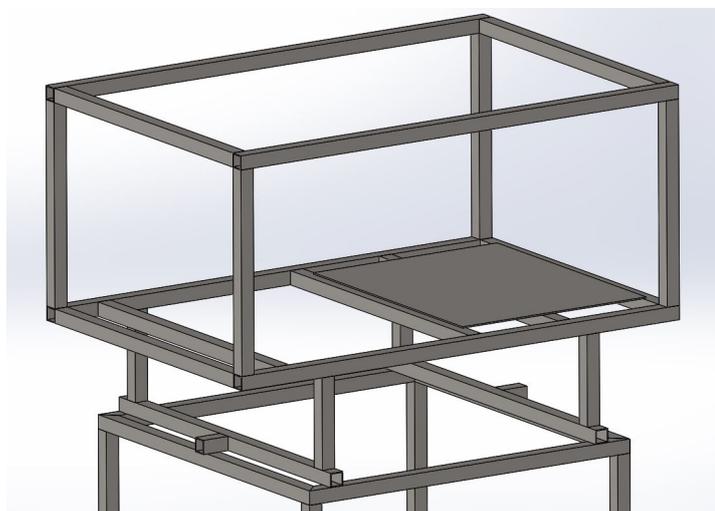


Figura 4.7: Estrutura de sustentação idealizada.

De posse do desenho, tubos de aço ABNT1020 foram medidos e soldados por meio do processo de soldagem a arco elétrico com eletrodo revestido. O eletrodo utilizado referiu-se ao modelo E7018. Ao final, obteve-se a estrutura complementar da planta didática, como pode ser observado na Figura 4.8. Ela foi unida à parte superior da estrutura original, por meio de conjuntos porcas-parafusos M6, com 60 mm de comprimento.



Figura 4.8: Estrutura de sustentação construída.

4.2.5 Integração da parte mecânica

Por fim, com todos os sistemas mecânicos implementados, realizou-se a união de cada parte, inclusive ao trocador de calor helicoidal.

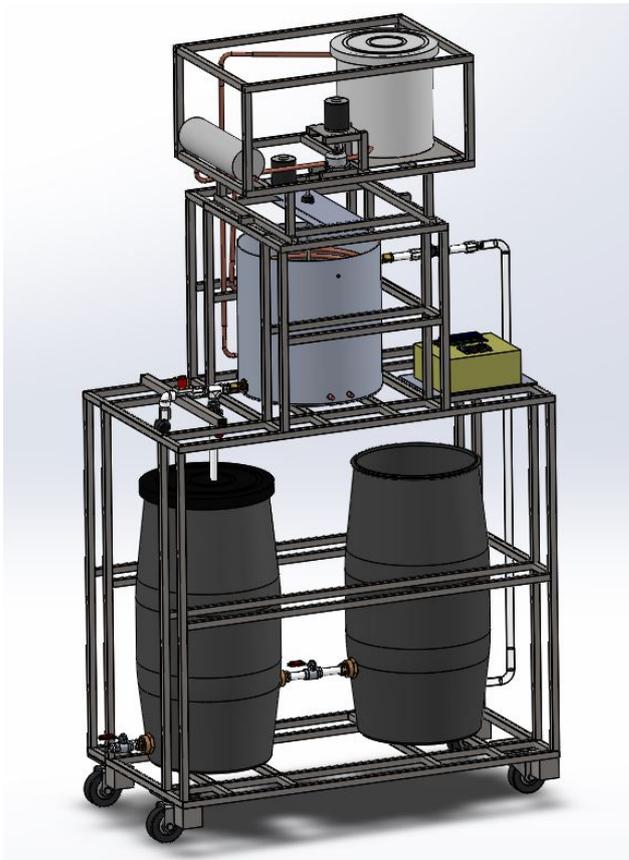
O sistema de aquecimento foi unido ao TCH e ao sistema de bombeamento por meio de tubulação de cobre e aplicação de soldagem com vareta Foscooper. Além disso, o sistema de bombeamento foi ligado na saída de fluido térmico do reservatório de óleo por meio de um Niple de latão. O trocador de calor helicoidal foi soldado junto do tanque agitado por meio de brasagem por vareta IZE Migrare, garantindo posicionamento adequado conforme projetado. Por último, todas as partes tiveram suas tubulações de cobre conectadas e soldadas, com curvas de 90 graus, através da brasagem por Forcooper. Assim, o ciclo de óleo térmico consistiu em: reservatório, bomba, aquecedor, trocador de calor helicoidal, retornando novamente ao reservatório. As Figura 4.9(a) e 4.9(b) caracterizam a concepção da planta didática idealizada, bem como da planta didática construída, respectivamente.

4.3 Concepção e implementação do sistema elétrico

Outra concepção necessária referiu-se aos sistemas relacionados à parte elétrica e eletrônica. Implementaram-se circuitos de potência e comunicação.

4.3.1 Circuito de potência e comando da resistência elétrica - aquecedor

Para realizar o acionamento das duas resistências elétricas de imersão de 220 VCA/3000 W foi preciso, inicialmente, definir os cabos condutores a serem conectados à rede elétrica de corrente alternada. Sendo assim, baseando-se na potência e tensão eficaz das resistências, verificou-se que a corrente elétrica eficaz presente no sistema consistiu em 27,3 A. O



(a) Planta didática idealizada.



(b) Planta didática completa e construída.

Figura 4.9: Planta didática de automação industrial com a adição dos sistemas complementares.

cabo condutor escolhido consistiu naquele com bitola de 4mm^2 , pois suporta uma corrente nominal de 28 A. Sendo assim, utilizou-se um disjuntor termomagnético do fabricante *GE*, com tensão de operação máxima de 32 A, com o objetivo de proteger o circuito contra sobrecarga e curto-circuito.

Com a finalidade de se variar a potência nas resistências elétricas, utilizou-se um relé de estado sólido (RES) do fabricante *Fotek*, com capacidade máxima de 40 A. Esse dispositivo opera diante de um sinal de tensão contínua entre 3 e 32 volts, geralmente modulada por algum dispositivo que gera o sinal de PWM. Além do mais, o RES possui tempo de resposta à modulação de 10 milissegundos. Sendo assim, implementou-se, por meio de um Arduino MEGA, lógica de PWM com frequência baixa (0,5 Hz), para garantir que o RES trabalhasse de forma correta, segura e eficiente. A Figura 4.10 caracteriza o circuito utilizado para controle da potência de aquecimento do óleo térmico.

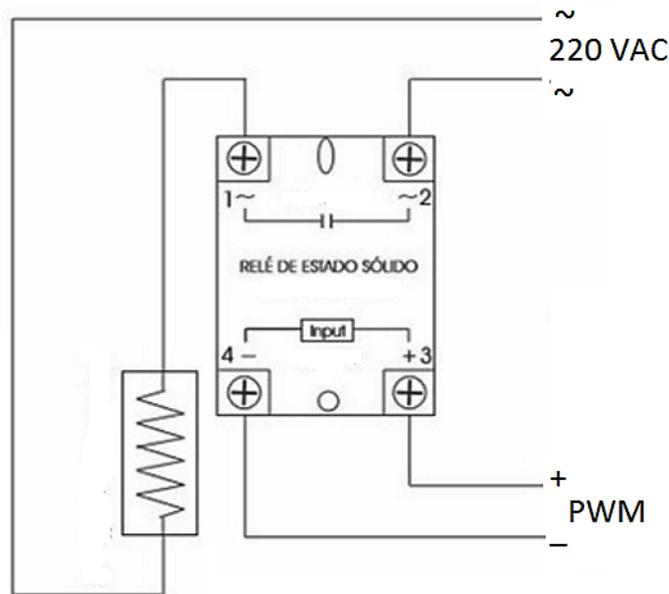


Figura 4.10: Circuito esquemático de ligação do relé de estado sólido.

4.3.2 Circuito de comando para os sensores de temperatura

Para realizar a aquisição de dados e verificação de temperatura, foram selecionados sensores digitais do tipo DS18B20, para medir a temperatura em quatro regiões: entrada e saída do trocador de calor helicoidal, saída do reservatório de fluido térmico e interior do tanque agitado (com água). A escolha desse tipo de sensor deve-se ao fato de que ele possui encapsulamento à prova de líquido. Isso protege o seu circuito integrado interno das regiões em que se deseja medir as temperaturas. Além disso, uma vez que trabalham com sinais digitais, simplificam-se as suas utilizações em um sistema microprocessado (no caso, por Arduino MEGA). O esquema de ligação do sensor de temperatura implementado segue na Figura 4.11.

4.3.3 Circuito de potência e comando para a bomba de fluido térmico

Um circuito de comando e potência para o motor da bomba de óleo térmico foi desenvolvido, permitindo a variação da vazão do fluido. Esse circuito teve o uso de um Mosfet de potência do tipo IRF540, para configuração de chaveamento. A frequência desse chaveamento foi proveniente de um sinal de PWM disponibilizado pelo *Arduino* MEGA, de zero a 5 volts contínuos, aplicados na porta do transistor. O tempo máximo de resposta desse dispositivo é de 10 ms. Resolveu-se adotar um período de 2 segundos para o cha-

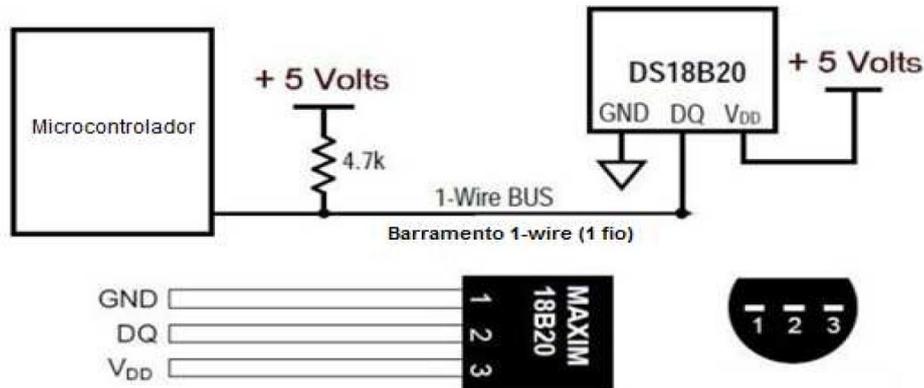


Figura 4.11: Circuito esquemático de ligação do sensor de temperatura (ARAÚJO, 2015).

veamento do relé, ou seja, permitindo no máximo a passagem de 120 ciclos da senoide proveniente da rede elétrica. Além disso, a escolha desse período deveu-se ao fato de que o sistema térmico caracteriza-se como lento. A Figura 4.12 evidencia o circuito elaborado para essa situação. O código que executa a modulação da frequência pelo *Arduino* MEGA encontra-se no Apêndice B.

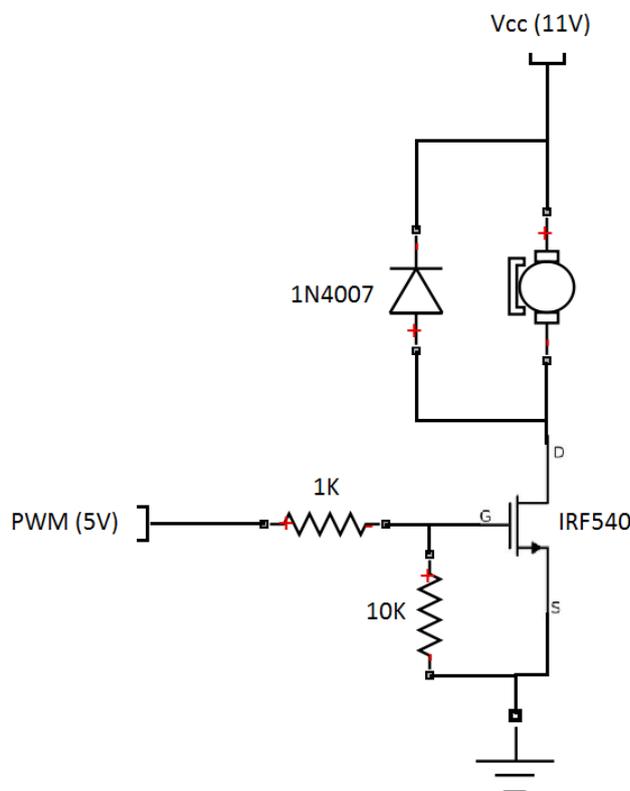


Figura 4.12: Circuito esquemático de ligação do motor da bomba de óleo térmico.

4.3.4 Utilização do programa MATLAB para a operação da planta

Com o objetivo de acompanhar em tempo real a aquisição de dados da planta didática, implementou-se em ambiente MATLAB, através da ferramenta *Simulink*, um programa para realizar a comunicação do sistema microprocessado *Arduino* MEGA. Para tal, foi necessária a utilização do bloco “Query Instrument”, que faz a captação dos sinais digitais por meio do fluxo de sinais RX. Para isso é preciso definir o período de amostragem para o bloco, a porta serial, a porta virtual criada (geralmente consiste em COM3) e o *baudrate* (taxa de transmissão de dados) equivalente ao aplicado no sistema microprocessado. Na Figura 4.13 está apresentado o diagrama para a verificação gráfica em tempo real dos sensores de temperatura e do sinal para atuação enviado ao RES. Sendo assim, a planta pode ser manipulada no ambiente de programação por blocos, de tal forma a permitir as variações da vazão na bomba de óleo, da potência nas resistências elétricas de imersão (para aquecimento do óleo) e da rotação do agitador. Os algoritmos implementados nos Arduinos estão presentes no Apêndice B.

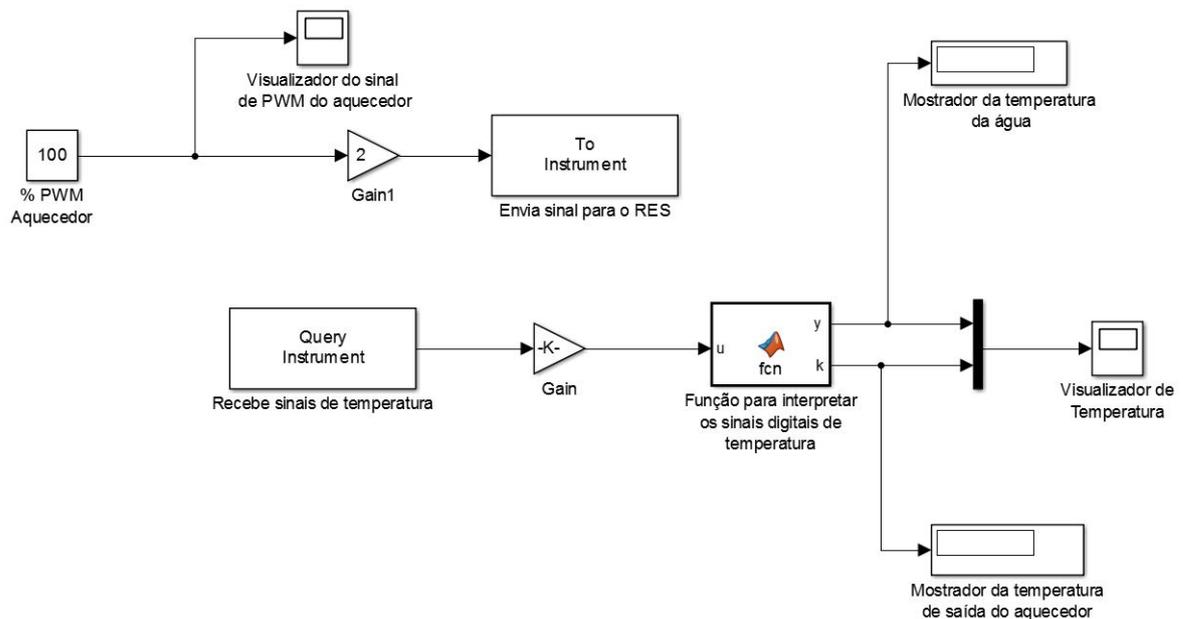


Figura 4.13: Diagrama de blocos do circuito de comunicação em MATLAB.

A localização dos sensores que foram usados para realizar as medidas de temperatura da planta está apresentada pela Figura 4.14, exceto aquele que se encontra internamente ao tanque agitado, pois seu local permaneceu inalterado. Existe medição de temperatura dentro do tanque agitado, na saída do reservatório de óleo térmico e entrada do aquecedor (Figura 4.14(a)), na saída do aquecedor e entrada do TCH (Figura 4.14(b)) e, por último, na saída do TCH (Figura 4.14(c)).



(a) Saída do reservatório de óleo.



(b) Saída do aquecedor.



(c) Saída do trocador de calor.

Figura 4.14: Localização dos sensores de temperatura.

Testes experimentais e Controle

São apresentadas as condições dos testes para a planta didática, bem como a calibração do sensor de temperatura. Evidencia-se também a variação da vazão da bomba de óleo, a modelagem do sistema, além da síntese de controladores para o processo térmico.

5.1 Calibração dos sensores de temperatura

Antes de modelar um sistema é necessário executar a calibração dos sensores que monitoram as variáveis de interesse de um processo. Existem basicamente duas técnicas de calibração: estática e dinâmica. No caso do sensor digital de temperatura DS18B20, realizou-se a sua calibração utilizando um termopar do tipo K.

Os testes consistiram em duas etapas. Na primeira delas foi feita a calibração estática do sensor digital. Para isso, inseriram-se os dois instrumentos no interior de um reservatório isolado termicamente com água em temperatura ambiente. Feito isso, através de um aquecedor doméstico, a água foi aquecida, colocando-se o aquecedor ligado por um intervalo de tempo no interior do recipiente. Após a temperatura do sensor uniformizar, anotaram-se as leituras do sensor e medidor. Foram realizadas apenas 10 medições de temperatura no sensor digital e no medidor com sensor termopar do tipo K. Terminada a coleta de dados, ajustou-se por meio do método dos mínimos quadrados, uma função de primeiro grau que retorna valores de temperatura calibrados dependentes dos valores medidos pelo sensor digital, representada por (5.1).

$$T_r = 0,9893T_s + 1,77 \quad (5.1)$$

em que T_r indica a temperatura ajustada, em Celsius, e T_s representa o valor proveniente do sensor, em Celsius.

Também foram calculados os intervalos de confiança para esse modelo, tomando-se como fundamento as equações (2.37). Os resultados obtidos para os desvios consistiram em $\pm 0,018$ e $\pm 1,2006$, respectivamente, para o coeficiente angular e o coeficiente linear,

caracterizados por $\pm 3\sigma_m$ e $\pm 3\sigma_b$, limites de confiança da ordem de 99,7%. Notou-se que, pelo fato da utilização de apenas 10 pontos na calibração, o limite de confiança do coeficiente angular foi da ordem de 1,8%, enquanto que para o coeficiente linear, quase 68%. Sendo assim, um trabalho de calibração mais apurado é necessário.

A Figura 5.1 caracteriza os pontos coletados, a função de ajuste e os limites de confiança.

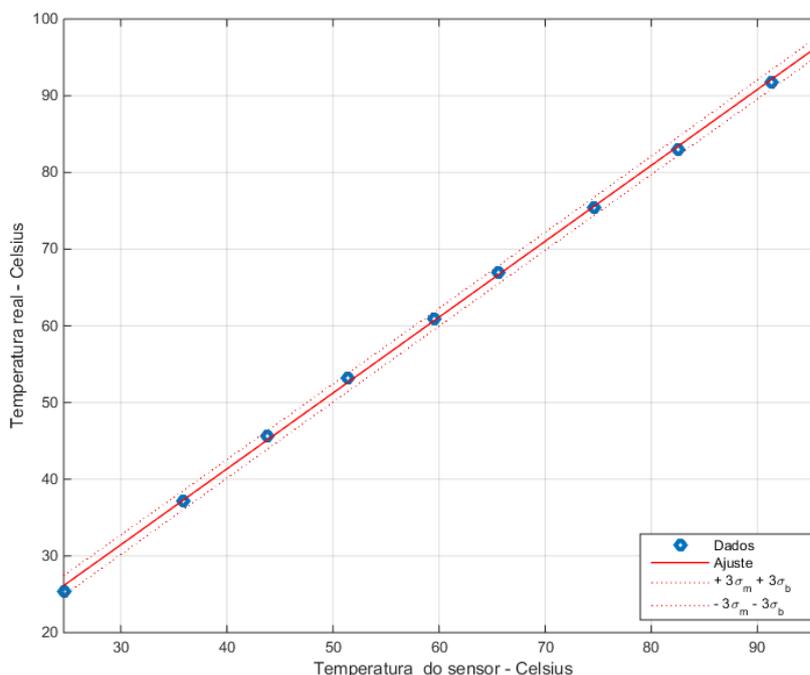


Figura 5.1: Curva de calibração estática do sensor de temperatura DS18B20.

Finalizada a calibração estática, realizou-se um experimento para caracterizar a resposta dinâmica do sensor digital de temperatura a uma entrada em degrau. Para isso, fez-se com que o sensor atingisse temperatura ambiente (de 25,3°C) e, em um reservatório com a temperatura estabilizada em 97°C, foi inserido o medidor DS18B20. Dessa forma, a temperatura do sensor levou cerca de 220 segundos para atingir o valor de equilíbrio. Realizou-se uma normalização dos dados para a origem cartesiana. Assim, aproximando a resposta de temperatura apresentada na Figura 5.2, encontrou-se uma constante de tempo de 44 segundos, na qual a curva atinge 63,2% do valor de regime estacionário.

5.2 Levantamento da *Tensão x Vazão* da bomba de óleo

Com o objetivo de conhecer o valor de vazão de projeto de 3 litros/min na bomba de óleo térmico, realizou-se um levantamento de pontos relacionando à tensão aplicada na bomba de óleo em função do volume de fluido escoado em um determinado tempo. Para

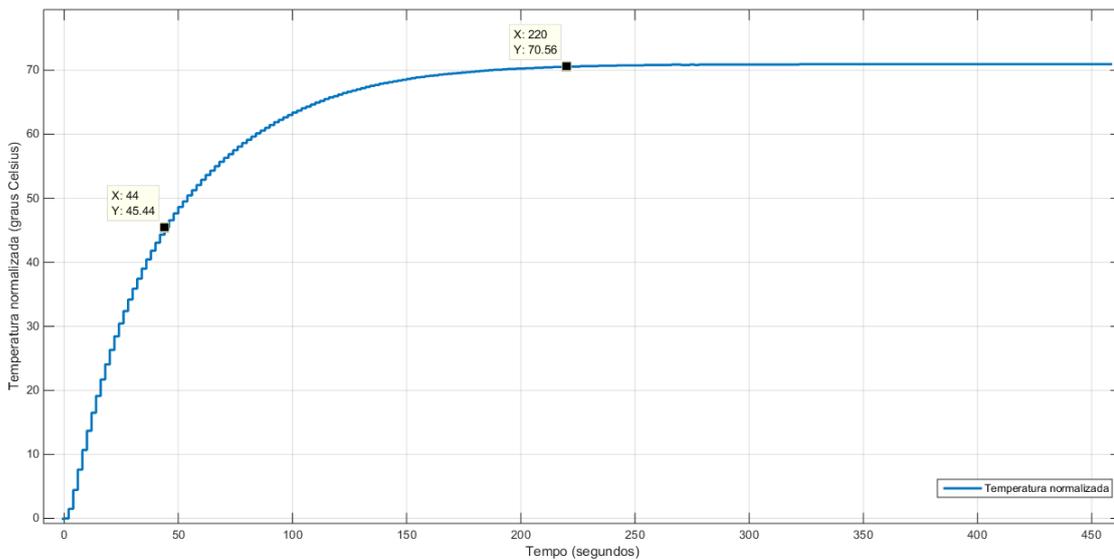


Figura 5.2: Curva de resposta dinâmica do sensor de temperatura DS18B20.

isso, utilizou-se um recipiente graduado e um cronômetro.

O procedimento consistiu em algumas etapas. A primeira delas foi acionar a bomba com determinado valor de tensão elétrica para o motor acoplado ao eixo da bomba. Isso simultaneamente ao início da contabilização de tempo no cronômetro, com escoamento de óleo para o recipiente. A próxima etapa referiu-se à parada da contagem do tempo, bem como a anotação do valor temporal, quando o volume do recipiente atingisse 1,5 litros. A última etapa correspondeu ao cálculo da vazão volumétrica, com base no tempo e volume. Esse procedimento foi executado quatro vezes. Sendo assim, a Tabela 5.1 mostra os valores de tensão em função da vazão encontrada.

Tabela 5.1: *Tensão x Vazão* na bomba de óleo térmico .

Tensão	Vazão
6V	1,68 litros/min
8V	2,40 litros/min
9,5V	2,55 litros/min
11V	2,98 litros/min

5.3 Avaliação da resposta temporal do sistema

Com o objetivo de avaliação da eficiência do sistema térmico com e sem agitação, fez-se o levantamento das curvas de resposta temporal do sistema a uma atuação constante no aquecedor. Para isso, fixou-se o valor máximo para a porcentagem de PWM (100%). Dessa forma, em um primeiro momento, encheu-se o tanque principal até um volume de

40 litros de água. Posteriormente, sem atuação do agitador, adquiriram-se os dados de temperatura ao longo do tempo. Finalizado esse teste, realizou-se outro experimento. Mas, nesse caso, com a atuação do agitador fixada em 400 RPM. Assim, com o mesmo volume anterior de água no tanque agitado, também se obtiveram os dados de temperatura ao decorrer do tempo. A Figura 5.3 caracteriza ambas as situações de respostas temporais, com o degrau aplicado no aquecedor no instante zero segundo. Nelas percebem-se que, para o caso com agitação, o sistema térmico é mais eficiente, pois alcança as mesmas temperaturas que o sistema sem agitação em tempos significativamente menores.

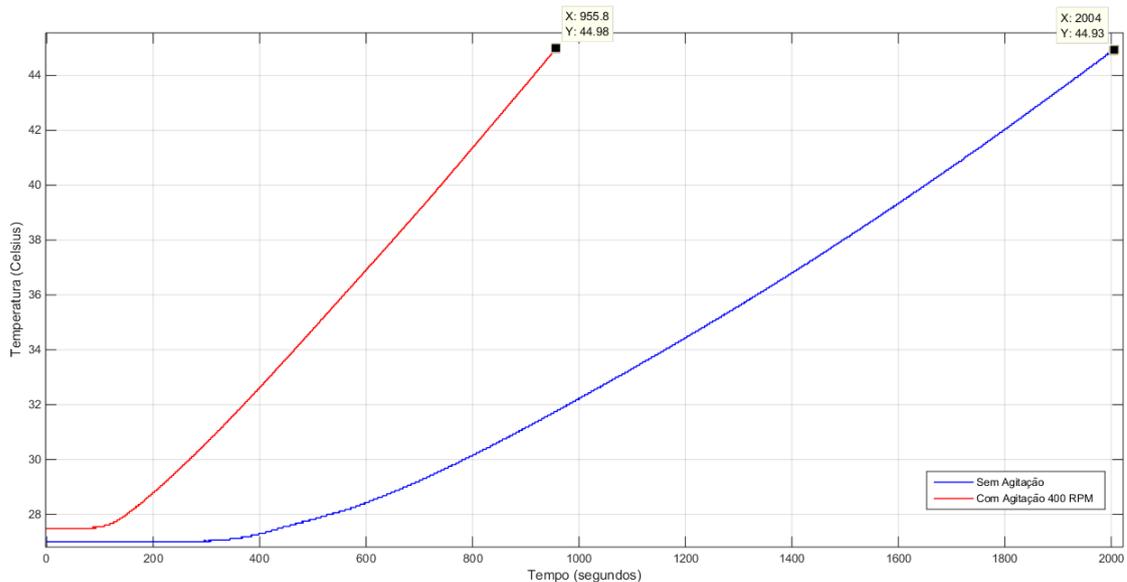


Figura 5.3: Curvas de respostas temporais do sistema para 100% de PWM no aquecedor, sem e com agitação (400 RPM).

5.4 Modelagem Matemática

A modelagem matemática do sistema térmico foi baseada no método da curva de reação. Primeiramente precisou-se definir alguns parâmetros de operação do protótipo, tais como a vazão provida pela bomba de óleo, que foi de aproximadamente 3 litros/min, e a rotação adotada para o agitador, a qual consistiu em 400 RPM. Com essa situação fixada, esperou-se que o tanque agitado atingisse o volume de 40 litros de água. Depois disso, colocaram-se em operação a bomba e o agitador. Na sequência, aplicou-se um degrau no aquecedor, com amplitude pré-estabelecida, em porcentagem do sinal de atuação. Feito isso, obteve-se a curva de resposta de temperatura da água em função do tempo. Os valores de sinais de atuação definidos consistiram em 25%, 40%, 60% e 100%. Dessa maneira, obtiveram-se quatro curvas de temperatura em função do tempo.

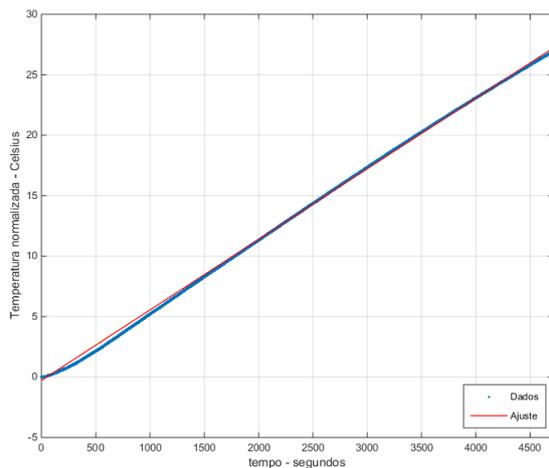
De posse das respostas de temperatura, fez-se uma análise que inferiu a possibilidade

do sistema ser aproximado por um sistema do tipo integrador com ganho e tempo morto. A equação (5.2), a seguir, caracteriza esse tipo de sistema.

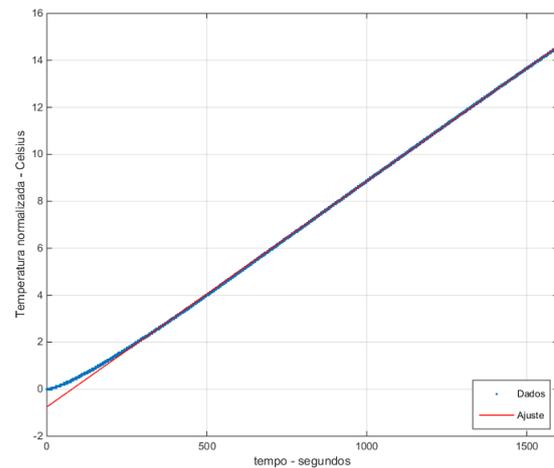
$$G_p(s) = \frac{K_m e^{-\theta s}}{s} \quad (5.2)$$

em que K_m representa o ganho do sistema e θ refere-se ao atraso de transporte.

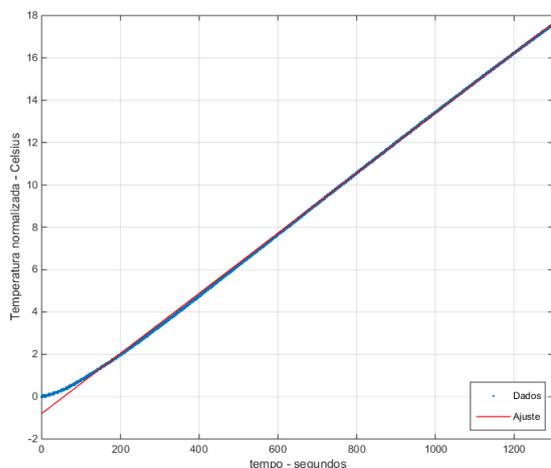
Sendo assim, realizou-se uma normalização dos dados de temperatura para a origem cartesiana, retirando o atraso de transporte evidente. Em seguida, baseando-se na metade final dos vetores de tempo e temperatura, fez-se um ajuste de primeira ordem, por meio dos mínimos quadrados. Cada curva teve um resultado distinto para o ajuste mencionado. A Figura 5.4 apresenta as curvas com seus respectivos ajustes, para cada situação de atuação na entrada do sistema.



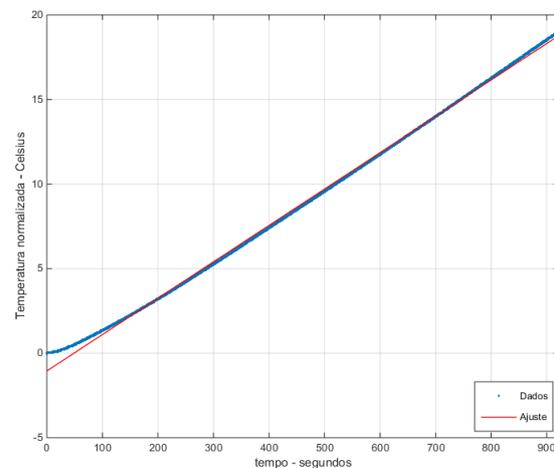
(a) Modelo 1 (25% de PWM).



(b) Modelo 2 (40% de PWM).



(c) Modelo 3 (60% de PWM).



(d) Modelo 4 (100% de PWM)

Figura 5.4: Ajustes polinomiais de primeira ordem para as repostas do sistema térmico ao degrau.

Diante de cada ajuste de primeira ordem realizado, tomou-se o valor do coeficiente angular e o dividiu pelo valor da amplitude do degrau correspondente. Assim, obtiveram-se os valores para o ganho K_m presente na equação (5.2). Além disso, observou-se também o valor em que a curva ajustada interceptava o eixo das abscissas. Esse valor somado com o atraso retirado da curva de resposta de temperatura antes da normalização, referiu-se ao tempo morto total para cada modelo. Dessa forma, obteve-se o atraso de transporte médio, bem como o valor médio para K_m . A Tabela 5.2 evidencia os parâmetros correspondentes para cada modelo.

Tabela 5.2: Parâmetros para o modelo matemático do processo.

Modelo	Degrau (%)	K_m	θ (seg.)
1	25	$2,3332 \cdot 10^{-4}$	259,2806
2	40	$2,4042 \cdot 10^{-4}$	252,2866
3	60	$2,3650 \cdot 10^{-4}$	183,5936
4	100	$2,1510 \cdot 10^{-4}$	153,365
Médio	–	$2,3133 \cdot 10^{-4}$	212,13

5.5 Síntese de Controladores

Os controladores clássicos PID geralmente apresentam a configuração em função de transferência como é caracterizado a seguir, da equação (2.33).

$$G_c(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{sT_i} + sT_d \right)$$

Com base no modelo matemático médio obtido, selecionaram-se duas situações de síntese de controladores para o processo térmico em malha fechada, baseados nos vários métodos de síntese dispostos em O'DWYER (2010). A razão de suas escolhas deveu-se ao fato de que elas não possuem sobrepassagem do sinal de referência, quando o processo é realimentado. O primeiro conjunto de parâmetros de controle, proveniente de NI-LABVIEW (2001), consistiu em $K_p = 0,26/(K_m\theta)$, $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Já o segundo caso, resultado de esforços de VÍTECKOVÁ (1999), referiu-se a $K_p = 0,368/(K_m\theta)$, $T_i = \infty$ e $T_d = 0$. Os valores correspondentes de K_p para o primeiro e segundo caso foram de 5,2983 e 7,4992, respectivamente. Notou-se que a sintonia obtida é, portanto, equivalente a um simples controle do tipo proporcional.

Diante dos parâmetros de controle determinados, realizaram-se dois tipos de simulações em ambiente computacional para teste do sistema controlado. Para isso se utilizou a ferramenta Simulink. Primeiramente, elaborou-se um diagrama de blocos como está apresentado na Figura 5.5.

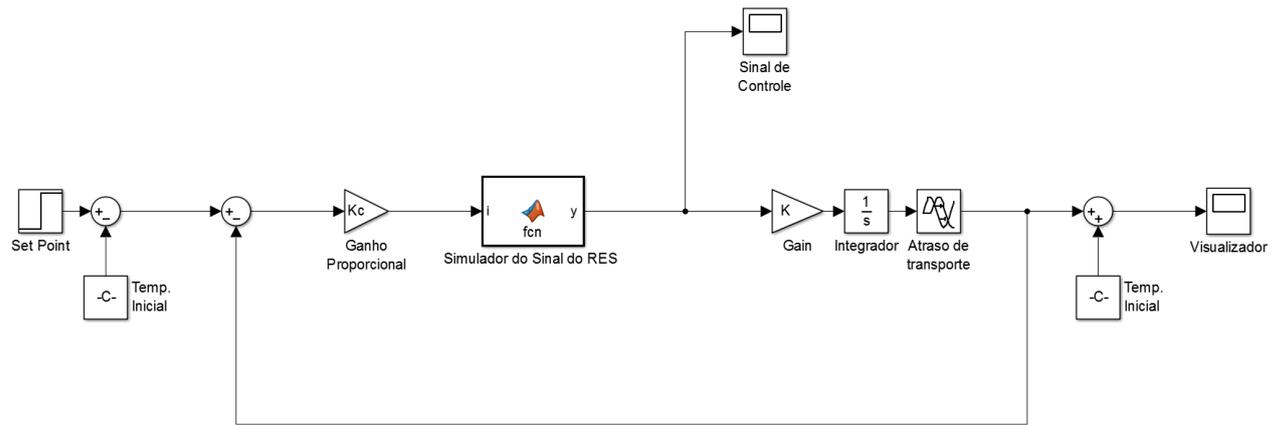


Figura 5.5: Diagrama elaborado em Simulink para teste do sistema controlado sem saturação do sinal de controle.

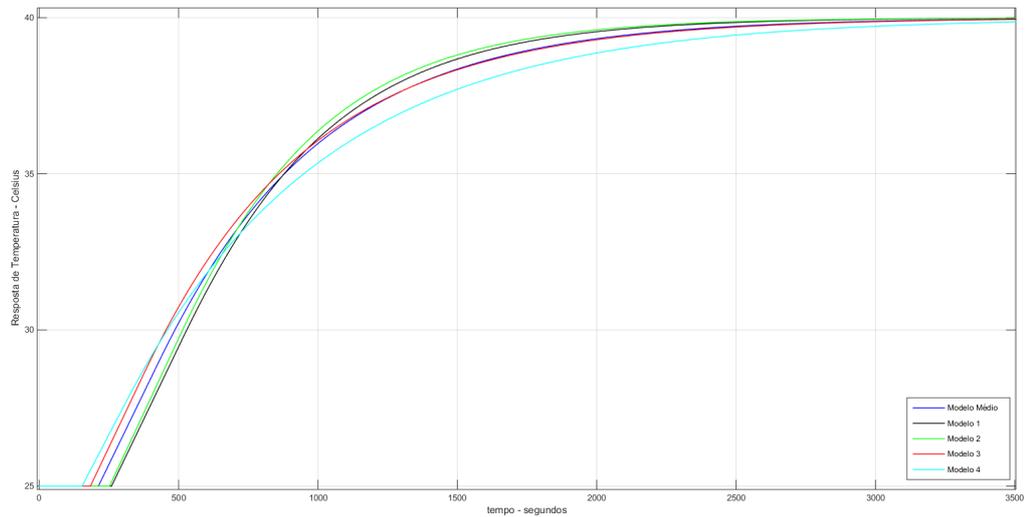
Feito isso, simulou-se o sistema para o modelo matemático médio, veja Tabela 5.2, como também para os outros quatro modelos matemáticos gerados para cada situação de atuação na entrada. Dessa forma, encontraram-se cinco respostas distintas para o processo controlado, sem saturação do sinal de controle, como está apresentado na Figura 5.6, quando se utiliza os parâmetros de NI-LABVIEW (2001).

Para a mesma situação, aplicando-se os parâmetros de VÍTECKOVÁ (1999), obtiveram-se as respostas de saída e sinal de controle evidenciados na Figura 5.7

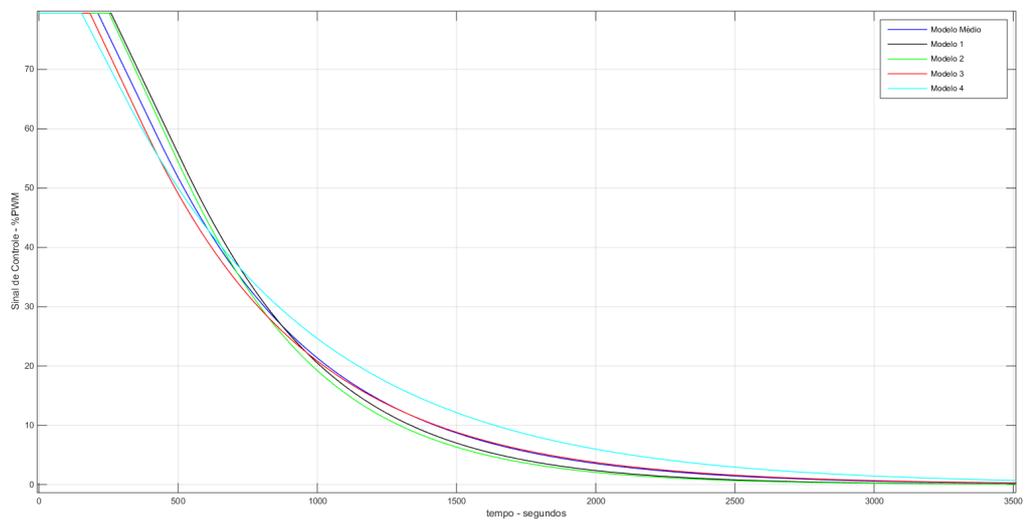
Realizada a simulação para o caso sem saturação do sinal de controle, incorporou-se ao diagrama de blocos um saturador de 0 a 100% do sinal de atuação, além de um ruído aleatório com amplitude máxima de $0,22^{\circ}\text{C}$. Essa amplitude correspondeu a um valor maior que três vezes a resolução do medidor de temperatura utilizado (resolução de $0,07^{\circ}\text{C}$). Sendo assim, obtiveram-se as respostas e seus respectivos sinais de controle para os dois controladores adotados, como ilustram as Figuras 5.8 e 5.9. Observou-se, com uma análise dessas figuras que, quando se incorpora a saturação e o ruído, a resposta de temperatura para duas curvas com valor de $K_c = 7,4992$ ultrapassam levemente o sinal de referência de 40°C e não conseguem retornar para o valor desejado. Devido a isso, foi escolhido, para utilização experimental, o controlador com valor de $K_c = 5,2983$.

Aplicando-se o controlador selecionado no processo térmico real, obteve-se a resposta térmica temporal do sistema, bem como o seu sinal de controle real aplicado no aquecedor. A Figura 5.10 caracteriza esse contexto.

Depois de aplicado o controlador ao processo real, percebeu-se que, devido ao modelo do sistema ser do tipo um, não existiu erro de *offset* considerável, pois a temperatura real para a água estabilizou-se em $39,93^{\circ}\text{C}$. Além disso, verificou-se um atraso de cerca de 130 segundos e uma constante de tempo para o sistema real controlado de aproximadamente 716,5 segundos.

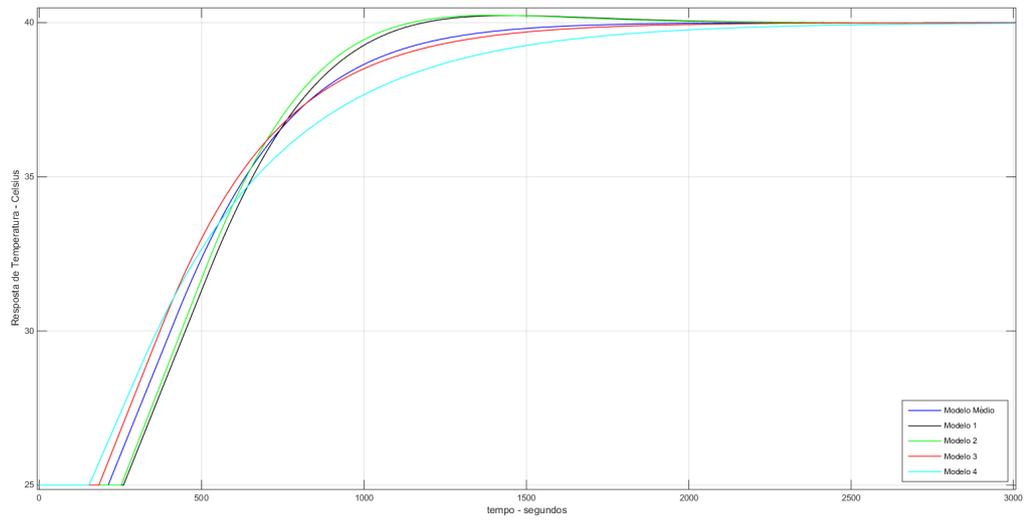


(a) Resposta de temperatura para o controlador caso 1.

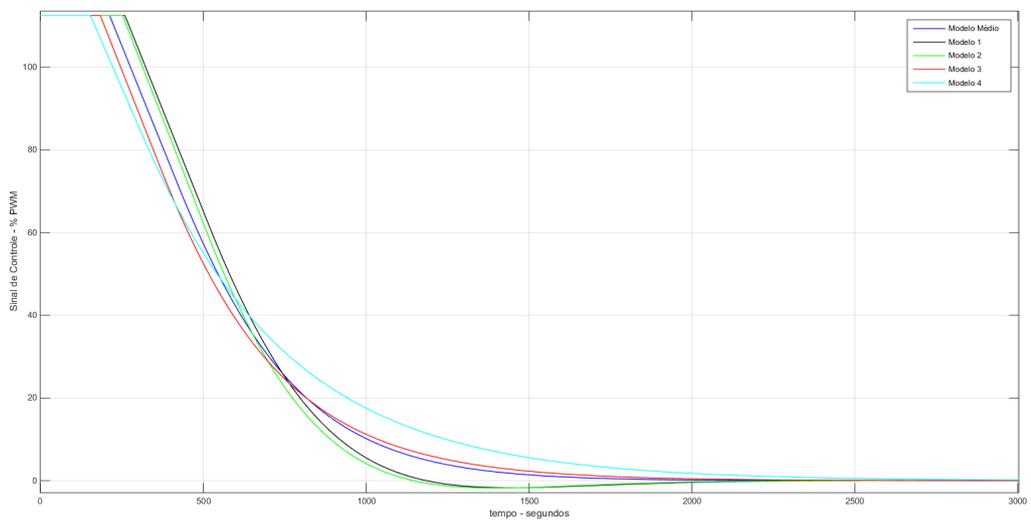


(b) Sinal de controle para o controlador caso 1, sem saturação.

Figura 5.6: Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 1, sem saturação.

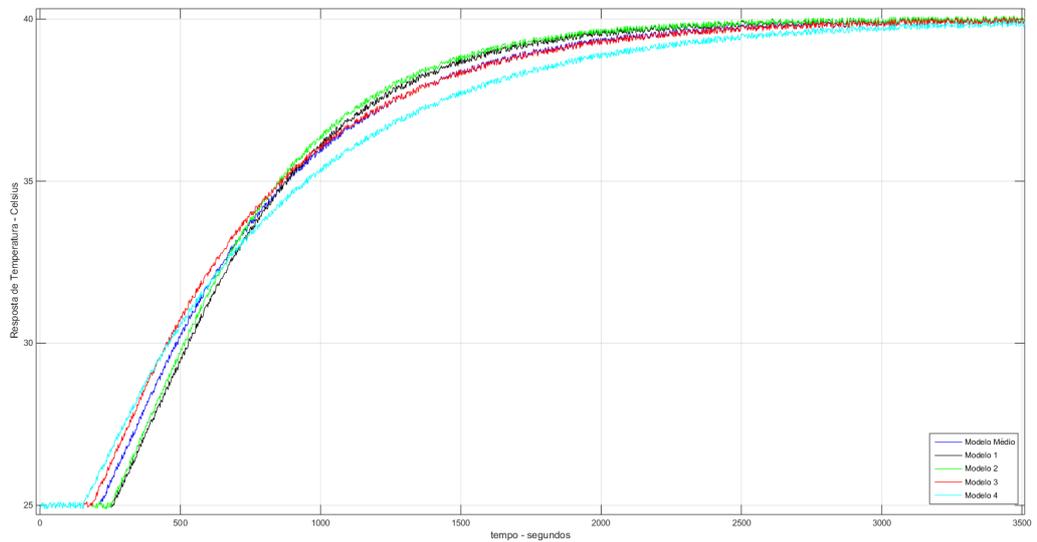


(a) Resposta de temperatura para o controlador caso 2, sem saturação.

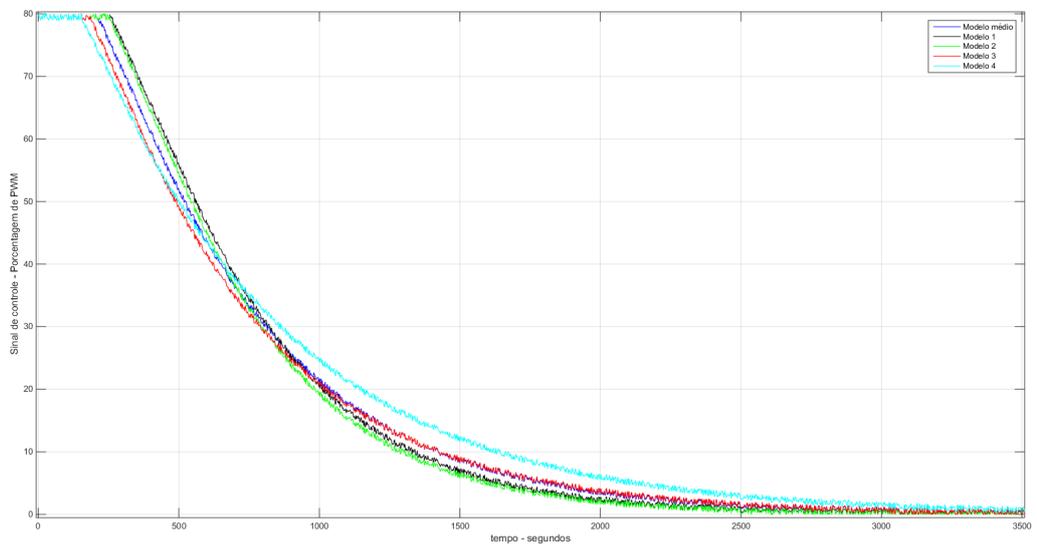


(b) Sinal de controle para o controlador caso 2, sem saturação.

Figura 5.7: Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 2, sem saturação.

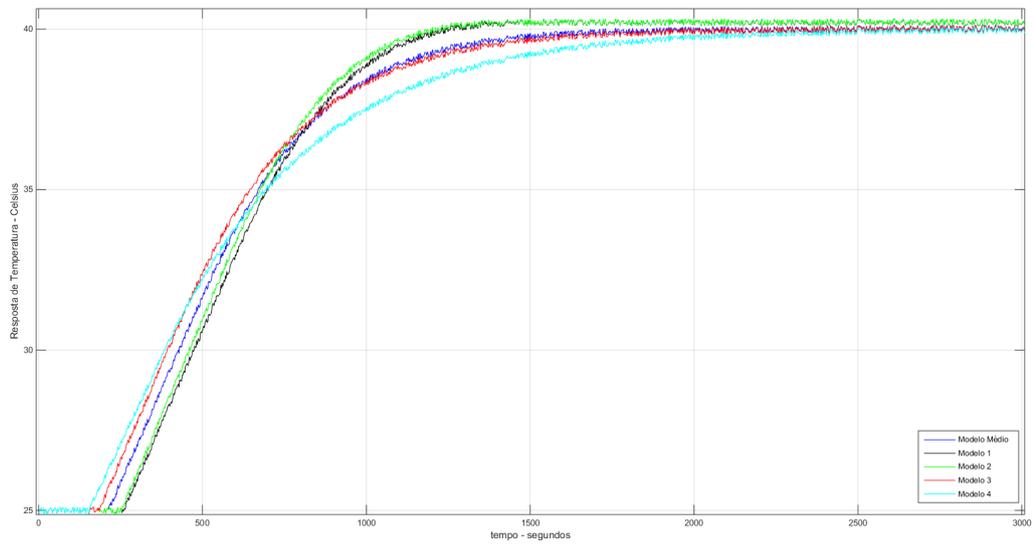


(a) Resposta de temperatura para o controlador caso 1, com saturação e ruído.

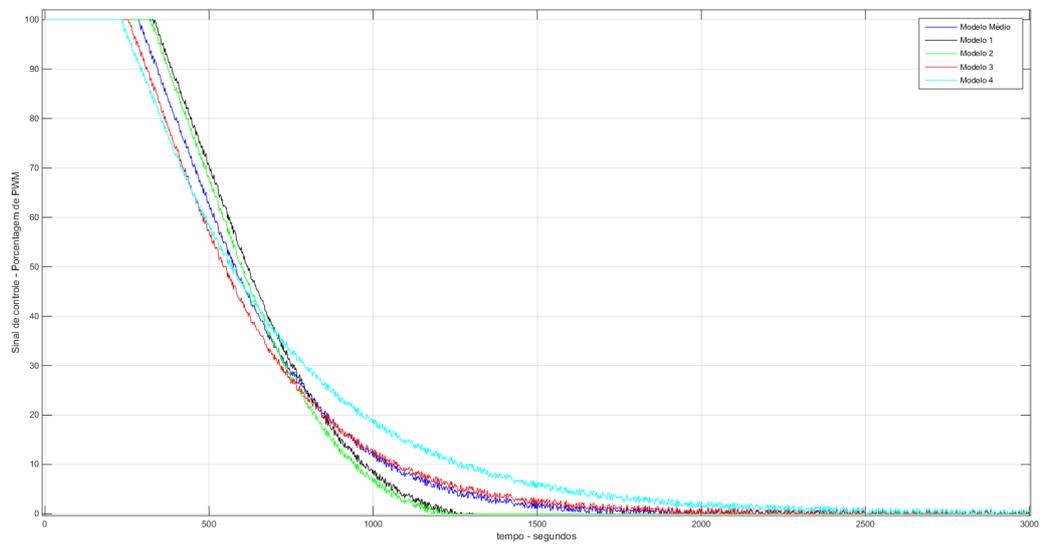


(b) Sinal de controle para o controlador caso 1, com saturação e ruído.

Figura 5.8: Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 1, com saturação e ruído.

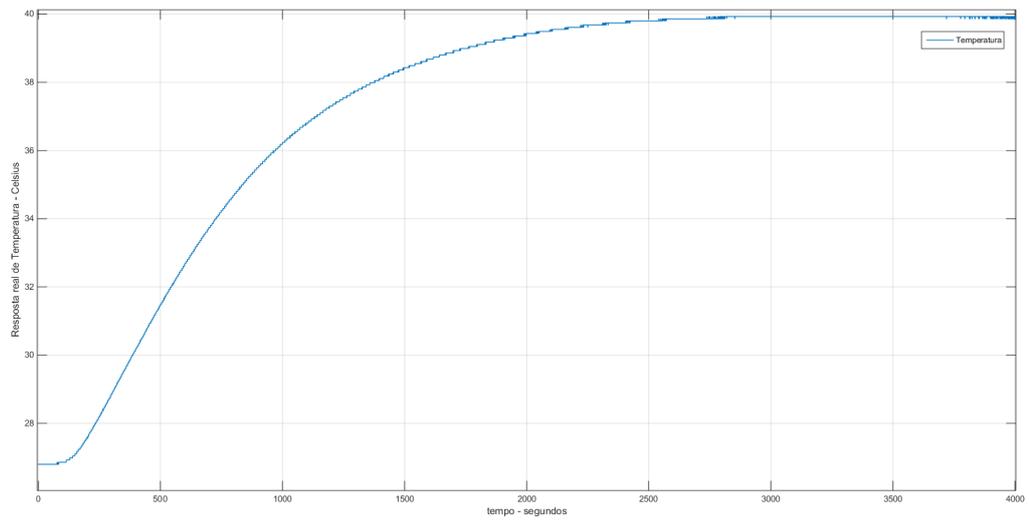


(a) Resposta de temperatura para o controlador caso 2, com saturação e ruído.

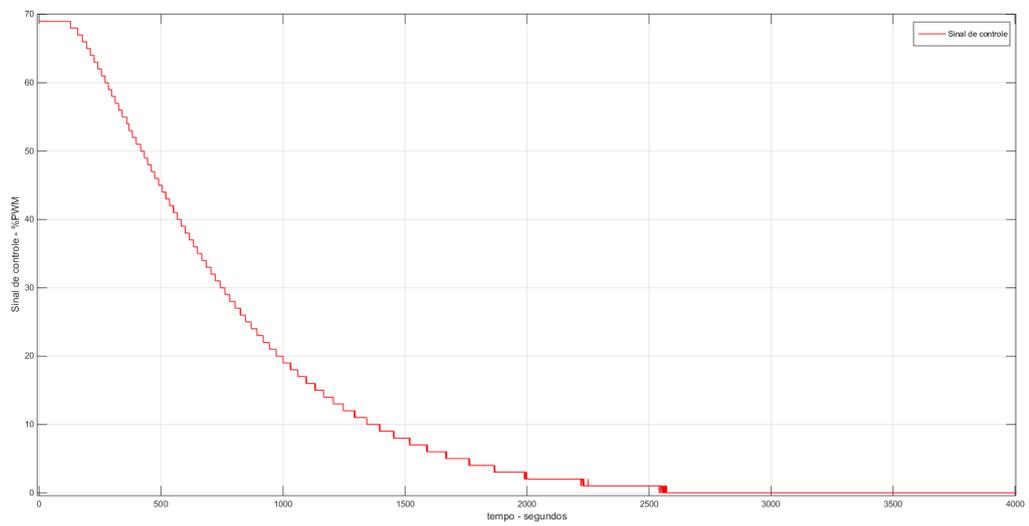


(b) Sinal de controle para o controlador caso 2, com saturação e ruído.

Figura 5.9: Curvas de respostas temporais simuladas do sistema para o controlador caso 2, com saturação e ruído.



(a) Resposta de temperatura real para o controlador caso 1.



(b) Sinal de controle real para o controlador caso 1.

Figura 5.10: Curvas de respostas temporais reais do sistema para o controlador caso 1.

Considerações finais e propostas de trabalhos futuros

Com este trabalho foi possível projetar um trocador de calor helicoidal para processo em batelada com e sem a presença de agitação. Isso por meio da rotina criada em ambiente MATLAB, em que se consegue estimar os valores geométricos essenciais para o trocador de calor helicoidal: o comprimento total, o espaçamento entre as espiras e o número de espiras. Em ambas as correlações utilizadas esses valores foram muito próximos. Assim, possibilitou-se a construção do TCH, a qual foi implementada por meio de dobramento manual com a utilização de um molde. Isso garantiu precisão do raio das espiras.

Além do mais, foram desenvolvidos sistemas de aquecimento e resfriamento para o óleo térmico utilizado no projeto. O sistema de aquecimento garantiu a elevação da temperatura do óleo ao longo do tempo, o que permitiu aquecer a água no interior de um tanque agitado. O sistema do aquecedor utilizou de resistências elétricas tubulares de imersão para prover o aumento de temperatura. Tratando-se do arrefecimento de óleo, este foi possível graças a um sistema de resfriamento por camisa, em que água em temperatura ambiente escoou na região entre dois tanques, diminuindo a temperatura do óleo térmico presente no tanque menor.

Um sistema de bombeamento também foi concebido e implementado. Isso por meio de uma bomba de óleo automotiva com rotação de suas engrenagens promovida por um motor elétrico.

Outro sistema construído consistiu na parte elétrica e eletrônica. Para tal, desenvolveu-se circuito para acionamento e variação de potência para as resistências elétricas do aquecedor, além de circuito que varia a vazão de óleo térmico. Atentou-se para o fato de segurança no processo elétrico, realizando a inserção de um dispositivo (disjuntor) que protege a planta didática de sobrecarga e curtos-circuitos até a faixa de 32 A.

Além disso, a parte de comunicação dos sensores de temperatura também foi desenvolvida. Isso utilizando o programa MATLAB em interligação com o *Arduino* MEGA. Dessa

forma, consegue-se operar a planta por meio de um computador, verificando as curvas de temperatura do processo em batelada.

A calibração dos sensores de temperatura foi executada, bem como a averiguação dos valores de vazão volumétrica na bomba de óleo em função de sua tensão elétrica de alimentação.

A modelagem e a sintonia de controladores também foram realizadas e apresentadas. Definindo-se um modo de operação para a planta, foi possível a aquisição de dados e ajustes para modelos simplificados, conhecidos como integrador com atraso de transporte. Para esse tipo de modelo, encontraram-se alguns métodos de síntese de controladores na literatura, sendo um deles escolhido devido ao critério de não apresentar sobrepassagem na resposta. Isso é fundamental em processos de batelada. Sendo assim, a planta apresentou resposta temporal controlada para um valor desejado de 40°C, quando fixado o valor de 400 RPM para o agitador.

Algumas dificuldades foram encontradas durante o desenvolvimento das atividades realizadas. Em uma delas observou-se que, para as situações tratadas neste trabalho, a literatura é escassa em correlações para projeto de um TCH. Sendo assim, sugere-se como atividade futura, encontrar uma correlação para o TCH construído, em diversas condições de operação (como variação da rotação do impelidor, mudança do fluido a ser aquecido no interior do tanque agitado).

Outro problema consistiu no valor equivocadamente apresentado para o número de Reynolds modificado utilizado em uma das correlações para projeto do TCH. Sendo assim, necessitou-se alterar o valor do Reynolds se baseando em trabalhos mais antigos realizados pelo mesmo autor. Sendo assim, o cuidado com a avaliação das informações encontradas na literatura é um fator a ser levado sempre em consideração.

É necessário citar que foi cometido um equívoco no cronograma apresentado na proposta desse trabalho com relação às etapas de desenvolvimento, uma vez que demandariam mais tempo do que o disponível durante este TCC. Sendo assim, para as atividades não executadas neste trabalho, sugerem-se suas implementações em trabalhos futuros, prevendo um período de quatro meses para realizá-las.

Como proposta de trabalho futuro, também se relata a possibilidade de estudos experimentais utilizando nanopartículas no fluido térmico *Mobiltherm 605*. Sendo assim, verificaria-se a eficiência térmica do sistema com o trocador de calor helicoidal. Esta sugestão tem sido avaliada para implementação em trabalhos de pós-graduação.

Script para projeto do TCH

```
clear all
clc

diam_tubo_e = input('Entre com o diametro nominal...
do tubo em polegadas: ');%metro2
diam_tubo_e = diam_tubo_e*0.0254;
espessura_tubo = (0.79/1000);
diam_tubo = diam_tubo_e-2*espessura_tubo;

altura_trocador = 0.2;
N = input('Entre com a rotacao para o agitador em RPM: '); %rpm
N = N/60; %rotacoes por segundo
Dv = 0.45;
da = 0.117;

D = 0.37;
R = (D/2) - (diam_tubo_e/2); %metro
Dc = 2*R;
Areai_tubo = (pi*(diam_tubo^2))/4;
Area_tanque = (pi*0.45^2)/4;
altura_helice = 3.107/100;

Area_tubo_e = (pi*(diam_tubo_e^2))/4;
altura_tanque = 0.27;
volume_tanque = altura_tanque*Area_tanque;
tempo_batelada = 35*60;

Tqe = 120+273.15; %K
Tqs = 70+273.15; %K
Tfe = 20+273.15; %K
Tfs = 60+273.15; %K

delta_t1 = Tqe - Tfs
delta_t2 = Tqs - Tfe
```

```

delta_tml = (delta_t1 - delta_t2)/...
            (log(delta_t1/delta_t2))

%% propriedades do óleo termico para a temperatura media
propriedades_oleo;

Tm_oleo = (Tqe+Tqs)/2
z=0;
cont = 0;
tam_propriedades = length(Temperatura_oleo);
inteiro = 0;
aux = 0;

for i=1 : tam_propriedades
    if (Temperatura_oleo(i) == Tm_oleo)
        Cp_oleo = Calor_especifico_oleo(i)
        ro_oleo = Densidade_oleo(i)
        k_oleo = Condutividade_oleo(i)
        visc_oleo = Viscosidade_oleo(i)
        mi_oleo = visc_oleo*ro_oleo
        Pr_oleo = (Cp_oleo*mi_oleo)/k_oleo
        inteiro = 1;
    end
end

for i=1 : tam_propriedades
    if ((Tm_oleo > Temperatura_oleo(i)) && inteiro==0)
        aux = i;
    end
end

if(inteiro==0)
    K1 = Condutividade_oleo(aux);
    K2 = Condutividade_oleo(aux+1);
    T1 = Temperatura_oleo(aux);
    T2 = Temperatura_oleo(aux+1);
    ro_1 = Densidade_oleo(aux);
    ro_2 = Densidade_oleo(aux+1);
    cp_1 = Calor_especifico_oleo(aux);
    cp_2 = Calor_especifico_oleo(aux+1);
    Vis1 = Viscosidade_oleo(aux);
    Vis2 = Viscosidade_oleo(aux+1);

    k_oleo = ((Tm_oleo-T1)*(K2-K1) + K1*...
              (T2-T1))/(T2 - T1)
    ro_oleo = ((Tm_oleo-T1)*(ro_2-ro_1) + ro_1*...
              (T2-T1))/(T2 - T1)
    Cp_oleo = ((Tm_oleo-T1)*(cp_2-cp_1) + cp_1*...
              (T2-T1))/(T2 - T1)

```

```

        *(T2-T1))/(T2 - T1)
    visc_oleo = ((Tm_oleo-T1)*(Vis2-Vis1) + ...
        Vis1*(T2-T1))/(T2 - T1)
    mi_oleo = visc_oleo*ro_oleo;
    Pr_oleo = (Cp_oleo*mi_oleo)/(k_oleo);
end

%% propriedades da agua para a temperatura media
propriedades_agua;

Tm_agua = (Tfe+Tfs)/2;
z1=0;
inteiro1 = 0;
aux1 = 0;

Temperatura_agua = dados_agua1(:,1);
tam_propriedades_agua = length(Temperatura_agua);

Calor_especifico_agua = dados_agua1(:,4);
Densidade_agua = dados_agua1(:,3);
Condutividade_agua = dados_agua1(:,5);
Viscosidade_agua = dados_agua1(:,6)*1e-4;
Prandtl_agua = dados_agua2;

for i=1 : tam_propriedades_agua
    if (Temperatura_agua(i) == Tm_agua)
        Cp_agua = Calor_especifico_agua(i)
        ro_agua = Densidade_agua(i)
        k_agua = Condutividade_agua(i)
        visc_agua = Viscosidade_agua(i)
        mi_agua = visc_agua*ro_agua
        Pr_agua = Prandtl_agua(i)
        inteiro1 = 1;
    end
end

for i=1 : tam_propriedades_agua
    if ((Tm_agua > Temperatura_agua(i)) && inteiro1==0)
        aux1 = i;
    end
end

if(inteiro1==0)
    K1a = Condutividade_agua(aux1);
    K2a = Condutividade_agua(aux1+1);
    T1a = Temperatura_agua(aux1);
    T2a = Temperatura_agua(aux1+1);

```

```

ro_1a = Densidade_agua(aux1);
ro_2a = Densidade_agua(aux1+1);
cp_1a = Calor_especifico_agua(aux1);
cp_2a = Calor_especifico_agua(aux1+1);
Vis1a = Viscosidade_agua(aux1);
Vis2a = Viscosidade_agua(aux1+1);

k_agua = ((Tm_agua-T1a)*(K2a-K1a) + K1a*...
          (T2a-T1a))/(T2a - T1a)
ro_agua = ((Tm_agua-T1a)*(ro_2a-ro_1a) + ro_1a...
          *(T2a-T1a))/(T2a - T1a)
Cp_agua = ((Tm_agua-T1a)*(cp_2a-cp_1a) + cp_1a...
          *(T2a-T1a))/(T2a - T1a)
visc_agua = ((Tm_agua-T1a)*(Vis2a-Vis1a) +...
            Vis1a*(T2a-T1a))/(T2a - T1a)
mi_agua = visc_agua*ro_agua;
Pr_agua = (Cp_agua*mi_agua)/(k_agua);
end

%% Calculo do Coeficiente Global de Transferencia de Calor

%vazao determinada pela microbomba / calor do oleo
vazao = input('Entre com a vazao da bomba de...
oleo em litro/min: ');
vazao = (vazao*1e-3)/60; %m3/s

m_ponto_oleo = vazao*ro_oleo;
q_oleo = m_ponto_oleo*Cp_oleo*(Tqe - Tqs);

q_agua = ((ro_agua*volume_tanque)/tempo_batelada)...
          *Cp_agua*(Tfs - Tfe);

index = 1;
H = 0.025;

logico = input('Entre com '1' para temperatura de parede...
constate, ou '2' para fluxo constante: ');
contador_loops = 1;

while (index==1)
    num_espiras = altura_trocador/H;
    L = num_espiras*sqrt((pi*Dc)^2 + H^2); %depende de H
    Area_e = pi*diam_tubo_e*L;
    Area_i = pi*diam_tubo*L;

    %calculo do Reynolds do oleo
    vel = m_ponto_oleo/(ro_oleo*Areai_tubo);

```

```

Re_oleo = (vel*diam_tubo)/visc_oleo
Rc = R*(1 + (H/(2*pi*R))^2);
He = Re_oleo*sqrt(diam_tubo/(2*Rc))

%Regiao de transicao
if (((2*R)/diam_tubo)>10) && (((2*R)/diam_tubo)<inf)
    Re_tr_oleo = 2100*(12*sqrt(diam_tubo/(2*R)) +1)
end

% calculo do Nusselt para a regiao interna
if (Re_oleo > Re_tr_oleo)
    if (Pr_oleo <= 1)
        Nui = ((Pr_oleo*(Re_oleo^(4/5))*((diam_tubo/...
            (2*R))^(1/10)))/(26.2*((Pr_oleo^(2/3))...
            - 0.074)))*(1 + 0.098*...
            ((Re_oleo*((diam_tubo/(2*R))^2))^(-1/5)))
    end

    if (Pr_oleo > 1)
        Nui = (((Pr_oleo^(0.4))/41)*(Re_oleo^(5/6))...
            *((d/(2*R))^(1/12)))*(1 + 0.061*...
            ((Re_oleo*((diam_tubo/(2*R))^2.5))^(1/6)))
    end
end

if (Re_oleo<=Re_tr_oleo) && (logico==1)
    Nui = ((3.657 + (4.343/(1 + (957/(Pr_oleo*...
        (He^2))))^2))^3 + 1.158*(He/(1 + ...
        (0.477/Pr_oleo)))^1.5)^(1/3)
end

if (Re_oleo<=Re_tr_oleo) && (logico==2)
    Nui = ((4.364 + (4.636/(1 + (1342/...
        (Pr_oleo*(He^2))))^2))^3 + 1.816*...
        (He/(1 + (1.15/Pr_oleo)))^1.5)^(1/3)
end

%Calculo de hi - coeficiente convectivo interno
hi = (Nui*k_oleo)/diam_tubo

%calculo da temperatura média na area externa à parede
k_cu = 372; %[W/(m*K)]
Tw = Tm_oleo - q_oleo*((log...
    (diam_tubo_e/diam_tubo))/(2*pi*k_cu*L));

%encontrar o Mi para a temperatura da parede.
tam_propriedades_parede = length(Temperatura_agua);
inteiro2 = 0;
aux2 = 0;

```

```

for i=1 : tam_propriedades_parede
    if (Temperatura_agua(i) == Tw)
        ro_agua_par = Densidade_agua(i)
        visc_agua_par = Viscosidade_agua(i)
        mi_agua_par = visc_agua_par*ro_agua_par
        inteiro2 = 1;
    end
end

for i=1 : tam_propriedades_parede
    if ((Tw > Temperatura_agua(i)) && inteiro2==0)
        aux2 = i;
    end
end

if(inteiro2==0)
    T1p = Temperatura_agua(aux2);
    T2p = Temperatura_agua(aux2+1);
    ro_1p = Densidade_agua(aux2);
    ro_2p = Densidade_agua(aux2+1);
    Vis1p = Viscosidade_agua(aux2);
    Vis2p = Viscosidade_agua(aux2+1);

    ro_agua_par = ((Tw-T1p)*(ro_2p-ro_1p)...
        + ro_1p*(T2p-T1p))/(T2p - T1p)
    visc_agua_par = ((Tw-T1p)*(Vis2p-Vis1p)...
        + Vis1p*(T2p-T1p))/(T2p - T1p)
    mi_agua_par = visc_agua_par*ro_agua_par
end

Re_agua_o = diam_tubo_e*da*(N*ro_agua/mi_agua)
%Re_agua_o = (3.2*1e+2);
Re_agua = ((da^2)*N*ro_agua)/mi_agua
Vis = mi_agua/mi_agua_par
razao_daDv = da/Dv
razao_dDv = diam_tubo_e/Dv

%Nusselt para a regioa externa ao trocador de calor
%normal
%Nue = 0.187*(Re_agua_o^0.688)*(Pr_agua^0.36)...
%*(Vis^0.11)*((da/Dv)^0.62)

%metodo2
Nue = 0.08*(Re_agua^0.56)*(Pr_agua^(1/3))*...
    (Vis^0.14)*(((altura_helice/da)/0.2)^0.15)...
    *(((diam_tubo_e/Dv)/0.064)^0.5)

```

```

he = (Nue*k_agua)/diam_tubo_e

%Ao_U = 1/((1/(hi*Area_i)) + ((log(diam_tubo_e...
%/diam_tubo))/(2*pi*k_cu*L)) + (1/(he*Area_e)))

U = 1/((Area_e/(hi*Area_i)) + ((Area_e*log...
(diam_tubo_e/diam_tubo))/(2*pi*k_cu*L)) + (1/he))
%q_calculado = Ao_U*delta_tml

q_calculado = U*Area_e*delta_tml;
diferenca = q_calculado - q_agua;

%sinal = sign(diferenca)
if diferenca <= 0.5
    H = H-0.00001;
    contador_loops = contador_loops + 1;
% elseif (q_calculado-q_agua) >= 0.5
%     H = H+0.00001;
%     contador_loops = contador_loops + 1;
else break;
end
end

display(L, 'O comprimento do trocador de calor ');
display(H, 'O espaçamento entre as espiras ');
display(num_espiras, 'O número de espiras ');

```

Apêndice **B**

Programas para comunicação e operação da planta didática

Neste apêndice encontram-se os códigos implementados em Arduino para operação da planta por meio de comandos de atuação, bem como a parte de comunicação com os sensores do protótipo.

B.1 *Script* para o Arduino de Atuação

```
#include <TimerOne.h>
#include <OneWire.h>
#include <LiquidCrystal.h> //Inclui a biblioteca do LCD

float volume=0;          // Volume de agua do tanque
//static float temperatura=32; // Temperatura do sistema
int pwm=0;
int comando=0;

//-----
static int PinoBotao=A2;

static int PinoMotor=9;      //Define pino para o
//motor (PWM)
static int PinoBomba=13;    //Define pino para a
//bomba (DIGITAL)
static int PinoAquecedor=8; //Define pino para o
//aquecedor (DIGITAL)
//static int PinoSolenoid=9; //Define pino para
//o solenoide (DIGITAL)

static int PinoSFluxo=2;    //Define pino para o
//Sensor de fluxo (DIGITAL)
//static int PinoSTemp=10;   //Define pino para o
//Sensor de temperatura (DIGITAL)
```

```

char c=213;
//-----
int aux=0;

volatile int contaPulso=0; //Variável para a
//quantidade de pulsos
int fluxomin=10;
float fluxo;
long tbomba;
int tbomba2=0,tbomba2m=0;
float auxbomba=0;
volatile int auxpwm=0,pwmrele=0;
LiquidCrystal lcd(12, 11, 5, 4, 3, 6); //Configura os pinos
//do Arduino para se comunicar com o LCD RS/E/4/5/6/7

//OneWire ds(PinoSTemp);
float temp;

int botao=0;
///

void setup()
{
  pinMode(PinoMotor, OUTPUT); // configura pino como saída
  pinMode(PinoBomba, OUTPUT); // configura pino como saída
  pinMode(PinoAquecedor, OUTPUT); // configura pino como saída
  //pinMode(PinoSolenoid, OUTPUT); // configura pino como saída
//-----
  pinMode(PinoSFluxo, INPUT); // configura pino como entrada
  // pinMode(PinoSTemp, INPUT); // configura pino como entrada
  pinMode(PinoBotao, INPUT); // declara-se o
  //interruptor como entrada

//-----

// attachInterrupt(0, incpulso, FALLING); //Configura o pino 2
//(Interrupção 0) para trabalhar como interrupção
// Serial.begin(115200); // incia a comunicação serial
  Serial.begin(9600);
  // Serial.setTimeout(10);

  lcd.begin(16, 2); //Inicia o LCD com dimensões
  //16x2(Colunas x Linhas)
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0); //Posiciona o cursor na primeira
  //coluna(0) e na primeira linha(0) do LCD

```

```
lcd.print(" TCC- Daniel"); //Escreve no LCD
lcd.setCursor(0, 1); //Posiciona o cursor na primeira
//coluna(0) e na segunda linha(1) do LCD
lcd.print(" O. Bueno"); //Escreve no LCD
delay(5000);
lcd.clear();

//analogWrite(PinoMotor, 100);
// comando=1;
while(comando!=1)
{
  if(Serial.available()>0){

    volume=Serial.parseInt();
    pwm=Serial.parseInt();
    comando=Serial.parseInt();
  }

  Serial.println(comando);
  //Serial.println(3);
  delay(500);

}

}

void Fluxo()
{
  contaPulso = 0; //Zera a variável para contar os
//giros por segundo

//sei(); //Habilita interrupção
attachInterrupt(0, incpulso, FALLING); //Configura o pino 2
//(Interrupção 0) para trabalhar como interrupção
delay (1000); //Aguarda 1 segundo
detachInterrupt(0);
//cli(); //Desabilita interrupção
fluxo = contaPulso*0.152;//Converte para L/min
}

void incpulso ()
{
  contaPulso++;//Incrementa a variável de contagem de pulsos
}
```

```
void ler ()
{
  lcd.clear();
  lcd.setCursor(0, 0); //Posiciona o cursor na primeira
//coluna(0) e na primeira linha(0) do LCD
  lcd.print("Temp:"); //Escreve no LCD
  lcd.print(temp); //Escreve no LCD
  lcd.write( B11011111); // graus Celsius
  lcd.print("C"); //Escreve no LCD
  lcd.setCursor(0, 1); //Posiciona o cursor na
//primeira coluna(0) e na segunda linha(1) do LCD
  lcd.print("Volume: "); //Escreve no LCD
  lcd.print(auxbomba); //Escreve no LCD
  lcd.print(" L"); //Escreve no LCD

}
void callback(){
  auxpwm++;
  if(auxpwm<=pwmrele){
    digitalWrite(PinoAquecedor,HIGH);
    //Serial.println("pwm");
  }
  else{
    digitalWrite(PinoAquecedor,LOW);
    //Serial.println("no pwm");
  }
  if(auxpwm>=200){
    auxpwm=0;
  }
}

void loop(){
  if(aux==0){
    botao=analogRead(PinoBotao); // ler o valor enviado
//pelo botão: "HIGH" ou "LOW"
    if(botao<200)
    {aux=1;
    digitalWrite(PinoBomba, HIGH);
    tbomba=millis();
    }
  }
}

if(aux==1)
{
  //digitalWrite(PinoBomba, HIGH);
  //auxbomba=10;
  //Serial.println(auxbomba);
  Fluxo();// demora 1 seg.
}
```

```

tbomba2=(( millis ()-tbomba)/1000)%60;
tbomba2m=(( millis ()-tbomba)/1000)/60;
auxbomba=auxbomba+(fluxo/60); // se alterar o tempo
//do Fluxo(), tem que compensar aqui!
//aux=2;
if (auxbomba>=volume)
{
    digitalWrite (PinoBomba, LOW);
    aux=2;
//  attachInterrupt (0, incpulso, FALLING); //Configura o pino
//2 (Interrupção 0) para trabalhar como interrupção
    delay (10);
}
lcd.clear ();
lcd.setCursor (0, 0); //Posiciona o cursor na primeira coluna
//(0) e na primeira linha(0) do LCD
lcd.print ("Volume: "); //Escreve no LCD
lcd.print (auxbomba); //Escreve no LCD
lcd.print (" L"); //Escreve no LCD

if (aux==2){
    //  analogWrite (PinoMotor, pwm);
    Timer1.initialize (10000); // inicializa timer1, e
    //seta o período aquisição
    Timer1.attachInterrupt (callback); //chama a interrupção
    //a cada tempo de aquisição
    lcd.setCursor (0, 0); //Posiciona o cursor n
    lcd.print ("Cheio "); //Escreve no LCD
//  Serial.println ("loop");

}
}

if (aux==2)
{
//analogWrite (PinoMotor, 100);
    if (Serial.available ()>0){
        //Serial.println (3);
        int pwmrelen=Serial.parseInt ();
        int tempn=Serial.parseInt ();
        comando=Serial.parseInt ();
        if (comando==2){
            pwmrele=pwmrelen;
            temp=tempn;
        }
    }
    Serial.println (2);
    delay (50);
}

```

```
}
}
```

B.2 *Script* para o Arduino de Comunicação

```
#include <TimerOne.h>
#include <OneWire.h>

const int sensores=2;
//int pinos[2]={52,23};
OneWire ds1(52);
OneWire ds2(51);
OneWire ds[sensores]={ds1,ds2};
int pinorele=4;
volatile int aux=0,auxpwm=0,pwmrele=0;
volatile float temp=0;
static int PinoMotor=7;//Define pino para o
//motor (PWM)
int PinoBomba=3;
int volume=40,pwmbomba=50,pwmagitador=100;///
int comando=0;
///variaveis
int u=0; //
long int a=0;

void setup() {
Serial.begin(115200);
Serial1.begin(9600);
//Serial.begin(9600);
//analogWrite(pbomba,pwmbomba);
Timer1.initialize(40000/1); // inicializa timer1, e
//seta o período aquisição
Timer1.attachInterrupt(callback); // chama a interrupção
//a cada tempo de aquisição
}
float getTemp(int n){
byte data[12];
byte addr[8];
if ( !ds[n].search(addr)) {
//no more sensors on chain, reset search
ds[n].reset_search();
return -1000;
}
if ( OneWire::crc8( addr, 7) != addr[7]) {
//Serial.println("CRC is not valid!");
return -1001;
}
}
```

```

if ( addr[0] != 0x10 && addr[0] != 0x28) {
//Serial.print("Device is not recognized");
return -1000;
}
ds[n].reset();
ds[n].select(addr);
ds[n].write(0x44,1);
byte present = ds[n].reset();
ds[n].select(addr);
ds[n].write(0xBE);

for (int i = 0; i < 9; i++) {
data[i] = ds[n].read();
}
ds[n].reset_search();
byte MSB = data[1];
byte LSB = data[0];
float TRead = ((MSB<<8) | LSB);
float Temperature = TRead / 16;
return Temperature;
}

void callback()
{
temp = getTemp(aux);
aux++;
if (aux==sensores){
aux=0;
}
Serial.println(temp*100);
//Serial.println(millis()-a);
//Serial.println(aux);
//a=millis();
}

void loop() {
if (Serial1.available()) {
comando = Serial1.parseInt();
if(comando==2){
//String b=(String)u+' '+2+' '+2;
//Serial1.print(b);
}
// if(comando==0)Serial.println("epa");
// else if(comando==2)Serial.println("opa");
//else Serial.println("faiou");
}

if(comando==2){

```

```
    analogWrite(PinoMotor , pwmagitador );
analogWrite(PinoBomba ,pwm bomba);
    if (Serial.available()) {
        //u=Serial.parseInt();
        if (Serial.read()=='a'){
            u=Serial.parseInt();
        }
        else{
            int b=Serial.parseInt();
        }
        //Serial.println(u);
        if(u>200)u=200;
        if(u<0)u=0;
    }
    //Serial.println("comando 2");
    //Serial.println(a);
    String b=(String)u+' '+2+' '+2;
    if((millis()/1000)-a>=2)

    { Serial1.print(b);
      a=millis()/1000;
    }
    delay(10);
}

else if(comando==0){
    analogWrite(PinoMotor , 0);
analogWrite(PinoBomba,0);
    if (Serial1.available()) {
        String b=(String)volume+' '+pwmagitador+' '+1;
        Serial1.print(b);
        //Serial.println("comando 0");
        delay(50);
        // Serial.println("comando 0");
    }
}
}
```

Referências

- ARAÚJO, L. C. *Desenvolvimento de uma planta didática de automação industrial para análises de processos fluídicos em batelada*. Minas Gerais, MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso.
- ASTROM, K.; HAGGLUND, T. Advanced PID Control. *The Instrumentation, Systems and Automatic Society*, [S.l.], 2007.
- BEJAN, A.; KRAUS, A. D. *Heat transfer Handbook*. [S.l.]: John Wiley Sons, 2003. v.1.
- DOEBELIN, E. O. *Measurement Systems: application and design*. [S.l.]: McGraw-Hill International editions, 1990. v.1.
- GNIELINSKI, V. Heat Transfer in Helically Coiled Tubes. *VDI Heat Atlas*, [S.l.], v.1, p.709–711, 2010.
- HAVAS, G.; DEÁK, A.; SAWINSKY, J. Heat Transfer to Helical Coils in Agitated Vessels. *The Chemical Engineering Journal*, [S.l.], v.35, p.61–64, 1987.
- INCROPERA, F. P. *et al.* *Fundamentos de transferência de calor e de massa*. [S.l.]: LTC, 2010. v.1.
- INCROPERA, F. P. *et al.* *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. v.1.
- JAYAJUMAR, J. Experimental and CFD estimation of heat transfer in helically coiled heat exchangers. *Chemical Engineering Research and Design*, [S.l.], n.86, p.221–232, 2008.
- JAYAJUMAR, J. Analysis of coiled-tube heat exchangers to improve heat transfer rate with spirally corrugated wall. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, [S.l.], n.53, p.3928–3939, 2010.

- KUMAR, R.; DESHMUKH, M. S.; GHOSH, K. K. Numerical analysis of heat transfer enhancement in pipe-in-pipe helical coiled heat exchangers. *Journal of Mechanical and Civil Engineering*, [S.l.], v.12, n.2, p.70–75, 2015.
- MORI, Y.; NAKAYAMA, W. Study on Forced Convective Heat Transfer in Curved Pipes. *Int. J. Heat Mass Transfer*, [S.l.], v.10, p.681–695, 1967.
- NAGATA, S. *et al.* Turbulent Heat Transfer from Helical Cooling Coils in Agitated Vessels. *Heat Transfer Jpn. Res.*, [S.l.], v.1, n.2, p.44–56, 1972.
- NI-LABVIEW. *PID Control toolkit user manual[Online]*. [S.l.: s.n.], 2001. v.1.
- O'DWYER, A. *Handbook of PI and PID Controller Tuning Rules*. [S.l.]: Imperial College Press, 2010. v.1.
- OGATA, K. *Engenharia de Controle Moderno*. Rio de Janeiro: Prentice Hall do Brasil, 1993.
- PAWAR, S. S. *et al.* Experimental study for comparison of overall heat transfer co-efficient in helical coils of fixed length using water. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, [S.l.], v.4, n.2, p.161–166, 2015.
- PAWAR, S. S.; SUNNAPWAR, V. K.; MUJAWAR, B. A. A critical review of heat transfer through helical coils of circular cross section. *Journal of Scientific Industrial Research*, [S.l.], v.70, p.835–843, 2011.
- PERARASU, V. T.; ARIVAZHAGAN, M.; SIVASHANMUGAN, P. Heat Transfer Studies in Coiled Agitated Vessel with Varying Heat Input. *International Journal of Latest Research in Science and Technology*, [S.l.], v.4, n.2, p.161–166, 2011.
- PURANDARE, P. S.; LELE, M. M.; GUPTA, R. Parametric Analysis of Helical Coil Heat Exchanger. *International Journal of Engineering Research Technology*, [S.l.], v.1, 2012.
- RODRIGUES, L. A. *Sintonia de Controladores Industriais: aplicações de técnicas de identificação e otimização de sistemas*. Minas Gerais, MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2009. Trabalho de Graduação I.
- SOUZA, C. de. *Análise Comparativa do desempenho de Controladores PID sintonizados por técnicas clássicas e por técnicas robustas implementados em CLP*. Minas Gerais, MG: Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, 2015. Trabalho de Conclusão de Curso.

SRINIVASAN, P. S.; NANDAPURKAR, S. S.; HOLLAND, F. A. Pressure Drop and Heat Transfer in Coils. *Chem. Eng.*, [S.l.], v.218, p.113–119, 1986.

VÍTECKOVÁ, M. Digital and analog controller tuning for processes with time delay. *Automatizace*, [S.l.], n.42(2), p.106–111, 1999.