



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO  
ESCOLA DE MINAS  
COLEGIADO DO CURSO DE ENGENHARIA DE  
CONTROLE E AUTOMAÇÃO - CECAU**



**LUDIMILLA NAKANAMI FREITAS**

**MODELAGEM E CONTROLE DE UM SISTEMA DE TROCA DE CALOR  
APLICADO À INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

**MONOGRAFIA DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA DE CONTROLE E  
AUTOMAÇÃO**

**Ouro Preto, 2017**

LUDIMILLA NAKANAMI FREITAS

**MODELAGEM E CONTROLE DE UM SISTEMA DE TROCA  
DE CALOR APLICADO À INDÚSTRIA DE LATICÍNIOS**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia de Controle e Automação da Universidade Federal de Ouro Preto como parte dos requisitos para a obtenção do Grau de Engenharia de Controle e Automação.

Orientador: Paulo Marcos de Barros Monteiro

**Ouro Preto**  
**Escola de Minas – UFOP**  
**Maió/2017**

F866m Freitas, Ludimilla Nakanami.

Modelagem e controle de um sistema de troca de calor aplicado à indústria de laticínios [manuscrito] / Ludimilla Nakanami Freitas. - 2017.

83f.: il.: color; graf; tabs.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro.

Monografia (Graduação). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Departamento de Engenharia de Controle e Automação e Técnicas Fundamentais.

1. Controladores PID. 2. Permutadores térmicos. 3. Trocador de Calor à Placas. I. Monteiro, Paulo Marcos de Barros. II. Universidade Federal de Ouro Preto. III. Título.

CDU: 681.5

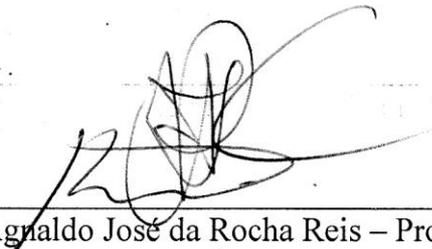
Monografia defendida e aprovada, em 16 de maio de 2017, pela comissão avaliadora constituída pelos professores:



Prof. Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro - Orientador



Profa. Dra. Karla Boaventura Pimenta Palmieri – Professora Convidada



Prof. Dr. Agnaldo José da Rocha Reis – Professor Convidado

## **AGRADECIMENTOS**

À minha mãe, Yone de Fátima Nakanami, agradeço por toda dedicação, tempo, força, confiança, luta, apoio e amor incondicional. E, que sempre me mostrou que o melhor caminho a trilhar é aquele que nos trás felicidade e que nos complementa.

Aos meus avós, João Teruo Nakanami e Kideca K. Nakanami, agradeço por seus ensinamentos, paciência, dedicação e amor.

À todas as pessoas que me apoiaram, acolheram e incentivaram a persistir e lutar por meus objetivos.

Ao meu orientador e Professor Dr. Paulo Marcos de Barros Monteiro por suas palavras de incentivo e compreensão que me ajudaram a compreender melhor a grandiosidade de ser uma Engenheira e de se dividir experiências.

## SUMÁRIO

I. INTRODUÇÃO .....	11
1.1. Objetivos.....	11
1.2. Estrutura do Trabalho .....	12
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1. Trocadores de Calor.....	13
2.1.1. Aspectos Gerais do trocador de calor à placas brasadas (CB76-40H) .....	14
2.1.2. Aspectos Gerais do Pasteurizador (APV SR26BS).....	15
2.2. Controlador Lógico Programável .....	15
2.2.1. Aspectos Gerais do ControladorLógico Programável Rockwell L74 .....	17
III. SISTEMA DE TROCA DE CALOR .....	36
IV. CONTROLADOR PID .....	18
4.1. Classificação dos Sistemas de Controle.....	18
4.1.1. Quanto a quantidade de variáveis.....	18
4.1.2. Contínuos e Discretos.....	19
4.1.3. Quanto à variação no tempo .....	19
4.1.4. Quanto aos parâmetros .....	19
4.1.5. Determinísticos e Estocásticos .....	20
4.1.6. Com memória e sem memória.....	20
4.1.7. Sistemas Lineares e Não-Lineares.....	20
4.2. Ações do Controlador .....	22
4.2.1. Controle Proporcional .....	22
4.2.2. Controle Proporcional Integral .....	23
4.2.3. Controle Proporcional Derivativo .....	24
4.2.4. Controle Proporcional-Integral-Derivativo .....	24
4.3. Controlador PID analisado.....	24
V. TROCADORES DE CALOR .....	26
5.1. Classificação dos trocadores de calor .....	26
5.1.1. Classificação de acordo com o processo de transferência de calor .....	26
5.1.2. Classificação baseada na compactibilidade.....	26
5.1.3. Classificação de acordo com o tipo de construção .....	27
5.1.4. Classificação quanto à disposição das correntes .....	30
5.2. Trocadores de Calor analisados .....	31
5.2.1. Trocador de Calor Brasado.....	31

5.2.2. Pasteurizador .....	33
VI. TRANSFERÊNCIA DE CALOR GLOBAL .....	36
6.1. Arranjos de Corrente.....	38
6.1.1. Corrente em Paralelo .....	38
6.1.2. Arranjo em Contra-Corrente.....	39
6.2. DTML .....	40
6.3. Coeficiente Global de Transferência Térmica .....	41
6.4. Taxa de Transferência de Calor .....	41
VII. MODELAGEM MATEMÁTICA .....	43
7.1. Introdução a Modelagem Matemática .....	43
7.2. Modelagem de um Trocador de Calor em placas: .....	43
7.3. Cálculo dos trocadores de calor .....	56
7.3.1. Cálculo do trocador de calor APV SR26BS.....	56
7.3.2. Cálculo do trocador de calor CB76-40H.....	61
VIII. SIMULAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR A PLACAS.....	67
8.1. Modelo no <i>Simulink</i> .....	67
IX. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL.....	68
9.1. Introdução .....	68
9.2. Conversão de variáveis .....	68
9.3. Estimação dos valores para os parâmetros PID .....	68
9.4. Resultados.....	69
9.4.1. Resultados Coletados Utilizando Controle PI.....	69
9.4.2. Resultados simulados pelo <i>Simulink</i> .....	70
9.4.3. Resultados Coletados Utilizando Controle PID .....	71
9.5. Discussão .....	75
X. CONCLUSÕES.....	76
10.1. Considerações gerais .....	76
10.2. Contribuições desta pesquisa .....	76
10.3. Considerações finais.....	76

## LISTA DE FIGURAS

Figura 2.3: Controlador Lógico Programável ControlLogix7.....	17
Figura 3.1: Processo Pasteurização 3 .....	36
Figura 4.1: Sistema Monovariável .....	18
Figura 4.2: Sistema Multivariável .....	18
Figura 4.3: Sistema variante no tempo .....	19
Figura 4.4: Sistema invariante no tempo .....	19
Figura 4.5: Princípio da aditividade .....	21
Figura 4.6: Princípio da homogeneidade .....	21
Figura 4.7: Sistema Não Linear .....	21
Figura 4.8: Efeito devido o Controle Proporcional .....	22
Figura 4.9: Controle Proporcional e efeito devido o a inserção do Controle Integral .....	23
Figura 4.10: Controle Proporcional e efeito devido o a inserção do Controle Derivativo.....	24
Figura 4.11: Configuração do controlador PID .....	25
Figura 5.1: Trocador de calor do tipo Duplo Tubo.....	27
Figura 5.2: Trocador de calor do tipo Casco e Tubos .....	28
Figura 5.3: Trocador de calor à Placas .....	28
Figura 5.4: Trocador de calor de Placa Aletada .....	29
Figura 5.5: Trocador de calor de Tubo Aletado .....	29
Figura 5.6: Trocador de calor Regenerativo .....	30
Figura 5.7: Trocador de Calor Brasado CB76-40H da Alfa Laval.....	32
Figura 5.8: Entrada e saída dos fluidos do trocador CB76-40H da Alfa Laval.....	32
Figura 5.9: Detalhes do Pasteurizador .....	34
Figura 5.10: Pasteurizador APV SR26BS .....	35
Figura 6.1: Ilustração da troca de calor entre fluidos de temperaturas distintas .....	38
Figura 6.2: Comportamento das temperaturas para fluidos de corrente em paralelo .....	38
Figura 6.3: Ilustração da troca de calor entre fluidos de temperaturas distintas em contra- corrente .....	39
Figura 6.4: Comportamento das temperaturas para fluidos em contra-corrente .....	39
Figura 7.1: Esquematização da troca de calor no feixe tubular e entre as placas.....	44
Figura 7.2: Diagrama de Blocos I.....	50
Figura 7.3: Fluxo de calor que escoo pela porção quente.....	51
Figura 7.4: Diagrama de Blocos II .....	54

Figura 7.5: Diagrama de Blocos III .....	56
Figura 7.6: Diagrama de Blocos IV .....	57
Figura 7.7: Diagrama de Blocos V .....	58
Figura 7.8: Diagrama de Blocos VI.....	58
Figura 7.9: Diagrama de Blocos VII .....	59
Figura 7.10: Diagrama de Blocos VIII.....	60
Figura 8.1: Sistema de Trocadores de Calor no <i>Simulink</i> .....	67
Figura 9.1: Resultado coletado da resposta utilizando o Controle PI.....	69
Figura 9.2: Teste no <i>Simulink</i> utilizando os parâmetros da série A .....	70
Figura 9.3: Teste no <i>Simulink</i> utilizando os parâmetros da série B.....	71
Figura 9.4: Teste real insatisfatório .....	72
Figura 9.5: Teste real satisfatório .....	74
Figura 9.6: Dados coletados do teste satisfatório .....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 5.1: Relação das especificidades do Trocador de Calor Brasado .....	33
Tabela 5.2: Relação das especificidades do Pasteurizador.....	35
Tabela 6.1: Coeficiente Global de Transferência de Calor .....	41
Tabela 7.1: Tabela com configurações estruturais e de capacidade .....	61
Tabela 9.1: Tabela dos parâmetros $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ encontrados.....	74

## **LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS**

**CEMIL** – Cooperativa Central Mineira de Laticínios Ltda

**PID** – Proporcional-Integral-Derivativo

**PHE** – *Plate Heat Exchanger*

**CLP** – Controlador Lógico Programável

**M4.3** – Motor 4 do Pasteurizador 3

**PS03** – Chave de pressão na malha 03

**V13** – Válvula 13

**M02** – Motor 02

**TIC44** – Indicador Controlador de Temperatura 44

**TT44** – Transmissor de Temperatura 44

**V44** – Válvula 44

**M09** – Motor 09

**TT45** – Transmissor de Temperatura 45

**V71** – Válvula 71

**TT72** – Transmissor de Temperatura 72

**V75** – Válvula 75

**DTML** – Diferença de Temperatura Média Logarítmica

## RESUMO

A inserção do controle e da automação nos processos industriais tem se tornado mais frequente à medida que observam-se as necessidades impostas pela delimitação do espaço de trabalho, assim como a natureza perigosa do mesmo e os resultados a serem obtidos em um tempo idealizado. As indústrias, em sua maioria, são compostas por elementos e equipamentos que propiciam riscos que podem causar danos à saúde e à vida dos indivíduos que por ali transitam e manuseiam tais dispositivos. Para que haja segurança no ambiente de trabalho, o controle e a automação são duas das ferramentas utilizadas, que, além disso, proporcionam a obtenção de resultados mais precisos e exatos, sendo estes alguns dos benefícios mais relevantes para que o produto obtenha as especificidades desejadas pelo produtor e para que o mesmo apresente a qualidade exigida para ser comercializado. Automatizando-se e realizando o controle dos parâmetros de modo eficiente, são obtidas respostas em um curto espaço de tempo, reduzindo-se, dessa maneira, os gastos com manutenções, acionamentos elétricos e materiais utilizados para manter o funcionamento. Nesse contexto, realizou-se a modelagem matemática do sistema de troca de calor e, o estudo direcionado à determinação dos parâmetros PID do controlador que está conectado à dois trocadores de calor à placas, implantados na indústria de laticínios CEMIL (Cooperativa Central Mineira de Laticínios Ltda). Propõe-se por meio desse estudo verificar a necessidade da otimização do controle existente dos dois trocadores de calor e, analisar os benefícios a serem alcançados. Devido a complexidade da modelagem do processo existente, as limitações quanto as informações dos fornecedores dos equipamentos e o curto tempo, propõem-se uma modelagem simplificada.

**Palavra-chave:** PID, trocador de calor, trocador de calor à placas,

## **ABSTRACT**

The implementation of the control and the automation in industrial processes are becoming increasingly common as it's possible to observe the necessities imposed by the limited working space, its hazardous nature and the results that to are expected to be achieved in an optimum time. Most industries are composed by elements and equipment that threat both people's health and their lives. In order to guarantee workers safety, the control and the automation are two of the tools utilized that, additionally helps to obtain more accurate and more precise results, in which these are some of the most relevant benefits that help the product to meet the required specificities and to present the quality demanded. Automating and controlling the parameters in an efficient way, it's possible to obtain expressive results in a short period, reducing expenses related to maintenance, electric drive and additional materials. In this context, a mathematical modelling of the heat exchanging system was carried and, a directed study was performed with the purpose to determine the PID parameters that is linked to two plate heat exchangers existing at CEMIL (Cooperativa Central Mineira de Laticínios Ltda). The purpose of this research is to verify the necessity of the optimization of the existent control of both plate heat exchangers and, to analyse the benefits it can bring. Owing to the existing mathematical modelling complexity, there were limitations concerning the technical information of the equipment and the short deadline, a simple modelling was carried.

**Key-words:** PID, heat exchanger, plate heat exchanger

## **I. INTRODUÇÃO**

A Engenharia exerce uma ampla influência em nossa rotina de modo a solucionar problemas, melhorar a qualidade de vida, as condições de trabalho e os métodos de produção. Nos processos industriais, torna-se indispensável para assegurar a qualidade do produto, assim como a segurança dos que ali trabalham.

O advento de novas tecnologias permitiu que novas técnicas fossem incorporadas ou desenvolvidas para sanar os problemas e/ou aperfeiçoar processos industriais, objetivando-se produzir itens com baixo custo e, que atendam aos rígidos padrões de qualidade.

Nas indústrias alimentícias, tais padrões são rigorosamente assistidos visto que, se trata da produção de um bem de consumo que produz consequências diretas à saúde do consumidor.

Para se obter boas práticas de produção, quando o soro do leite, recém chegado, é encaminhado à empresa, no caso da CEMIL (Cooperativa Central Mineira de Laticínios Ltda), adota-se o procedimento da transferência do produto por tubulações afim de realizar o aquecimento do mesmo utilizando, entre demais equipamentos, dois trocadores de calor (CB76-40H e APV SR26BS) para eliminar bactérias indesejadas, evitando-se a transmissão de doenças aos consumidores. Nesse contexto, a temperatura deve ser monitorada e comediada de maneira que opere em um determinado limite para garantir que as bactérias benéficas não sejam eliminadas e para que contenha os bons nutrientes.

Para garantir tais características e para que o produto possa ser encaminhado para a etapa seguinte, a empresa realiza o controle do processo por meio do controle PID em que a grandeza temperatura representa o principal elemento a ser controlado.

A determinação de valores considerados ideais para os parâmetros PID do controlador Rockwell L74, representa economia em termos de consumo energia elétrica e manutenção.

Para que tais valores fossem apurados, inúmeros problemas foram encontrados que apresentaram atraso significativo para o desenvolver da pesquisa.

### **1.1.Objetivos**

Desenvolver um estudo que possibilite a aplicação dos conceitos e técnicas adquiridas ao decorrer do curso de Engenharia de Controle e Automação. Trata-se de utilizar dos conceitos da termodinâmica e de suas fórmulas, dos conceitos de controle PID e do comportamento característico de cada um de seus fatores e, de conceitos básicos de modelagem matemática.

Elaborar um modelo simplificado e específico, afim de possibilitar a simulação do sistema de controle da temperatura dos trocadores de calor e a verificação do tempo e do comportamento da resposta, assim como os melhores índices possíveis para cada parâmetro do sistema de controle PID, para que o *Setpoint* seja alcançado e estabilizado em tempo inferior ao que se apresenta no momento atual.

## **1.2.Estrutura do Trabalho**

Propõem-se a verificação do presente modelo e otimização dos valores dos parâmetros: proporcional(P), integral(I) e derivativo(D) do controlador PID (Rockwell L74) do modelo atual de um sistema composto por dois trocadores de calor, e a modelagem matemática dos mesmos.

O desenvolvimento de tal análise é fundamentada nas seguintes etapas:

- O Capítulo 2 apresenta a revisão bibliográfica contendo tecnologias precedentes às utilizadas atualmente e, aspectos gerais dos equipamentos estudados na pesquisa;
- O Capítulo 3 faz-se referência à classificação dos sistemas de controle, às ações que cada parâmetro exercem e a descrição controlador pesquisado;
- O Capítulo 4 apresenta algumas das classificações relacionadas aos trocadores de calor, a descrição dos trocadores de calor utilizados e, a descrição do processo de troca de calor e como cada componente se comporta durante o mesmo;
- O Capítulo 5 corresponde à descrição do cálculo da transferência de calor global;
- O Capítulo 6 é destinado à modelagem matemática do comportamento dos trocadores de calor assim como do processo que os envolve e, ao cálculo dos trocadores;
- O Capítulo 7 apresenta a simulação dos trocadores de calor à placas;
- O Capítulo 8 se destina à validação experimental;
- Concluindo, o Capítulo 9 apresenta as conclusões.

## II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Trocadores de Calor

Os trocadores de calor, de modo geral, viabilizam a troca de calor entre fluidos que possuem temperaturas distintas, sem que esses tenham contato direto. Geralmente, são observados a ocorrência de dois processos de troca térmica: a condução e a convecção e, menos comum, a radiação.

Os trocadores de calor assumem formatos distintos que variam de acordo com cada necessidade.

Um dos primeiros dispositivos identificados que foi observado que desempenhava a mesma função de um trocador de calor foi uma caldeira que era destinada à preparação de alimentos (INANOV, 2010) e, pedras que eram colocadas sobre o fogo (MAHAN´S, 2016).

O princípio de troca de calor foi evidenciada em uma outra aplicação, inventada pelos Romanos. O achado, era uma espécie de sauna que se localizava abaixo do nível da terra na qual, seu piso era feito de cimento e, suas paredes e teto eram revestidos de cerâmica. Uma abertura abaixo da superfície do piso permitia a passagem da fumaça com ar quente que irradiava calor para a câmara (MAHAN´S, 2016).

Os Coreanos, por sua vez, utilizaram de uma técnica similar, denominada *Ondol Heating*.

Com o passar do tempo, para o melhor aproveitamento e aplicabilidade do calor, aprimoraram-se as técnicas.

No ano de 1777, Jean-Simon Bonnemain, na França, desenvolveu um modelo artificial destinado a incubação de ovos de galinha e para a criação de galinhas (RÜDIGER, 2008). Seu dispositivo era composto por uma tira bimetálica que era conectada diretamente em um fogão de ferro.

Posteriormente, Bonnemain apresentou novas propostas para sua aplicar seu sistema de regulação de calor que incluía banheiras, estufas, fogões de ferro, e demais sistemas (RÜDIGER, 2008).

Stuart Cramer, por sua vez, contribuiu para o melhoramento de condicionamento de ar de uma indústria de algodão. Ele utilizou de um sistema de umidificação, na qual a água era borrifada, afim de controlar os níveis de umidade relativa do ambiente em que o produto estivesse inserido. Desse modo, evitava-se a quebra do fio de algodão e melhorava-se a qualidade do ar para o trabalhador (ROBERTS, 20-?).

Na Inglaterra, em 1829, os irmãos Price apresentaram um sistema destinado ao aquecimento de domicílios à partir de água quente e aquecimento à vapor (MAHAN'S, 2016).

Nesse mesmo período, houve a introdução dos trocadores de calor brasado, ou ainda, trocadores de calor à placas soldadas.

Atualmente existem duas modalidades do trocador de calor à placas, ou ainda, *plate heat exchangers* (PHE). A primeira é composta por placas soldadas e a segunda é formada por placas que são móveis, cujo número é determinado de acordo com a necessidade de cada processo. O trocador de calor à placas, apresenta relevante eficiência na troca de calor (SWEP, 20-?) dentre outros benefícios como economia em termos de energia, manutenção e espaço utilizado.

### 2.1.1. Aspectos Gerais do trocador de calor à placas brasadas (CB76-40H)

O trocador de calor à placas é um dispositivo que viabiliza a troca térmica entre fluidos de temperaturas distintas. Seu tamanho é notavelmente reduzido, sendo assim, essa modalidade é considerada a menor e a mais compacta (MAHAN'S, 2016).

Esse trocador de calor possui placas que apresentam ondulações, ou ainda, rugosidades, em sua superfície que variam de espessura cuja finalidade é permitir um maior contato entre o fluido e a placa, permitindo-se, assim, uma maior troca de calor, resultando em uma elevada eficiência. Essas placas são constituídas de aço inoxidável, sendo essas soldadas umas nas outras com cobre, permitindo um funcionamento sob elevada pressão e temperatura, visto que não possui juntas (ALFA LAVAL, 20-?).

Esse modelo possui dois canais de entrada e dois canais de saída, que permitem a passagem de dois fluidos distintos, o vapor, que representa o fluido quente e, a água, que representa o fluido frio.



Figura 2.1: Trocador de Calor Brasado  
Fonte: ALFA LAVAL, 2012.

### 2.1.2. Aspectos Gerais do Pasteurizador (APV SR26BS)

O pasteurizador possui placas onduladas que possibilitam que o fluido escoe pelos canais de maneira mais eficiente, devido à sua extensa superfície. Além disso, as placas são móveis, o que permite que o equipamento atenda à variadas necessidades, facilite na higienização e na manutenção do mesmo. Esse permutador apresenta juntas que são integradas ao conjunto por meio de barras que realizam pressão para que haja vedação sem que haja escape dos fluidos (SPX FLOW, 2012).

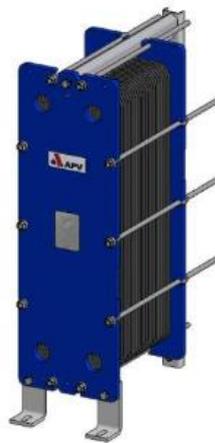


Figura 2.2: Trocador de Calor à Placas ou Pasteurizador  
Fonte: SPX FLOW, 2012.

## 2.2. Controlador Lógico Programável

A indústria, que em sua maioria possui inúmeros processos a serem controlados, utiliza de mecanismos para que: os erros sejam eliminados ou minimizados, haja segurança para os funcionários, assegure a qualidade e padronização do produto e, haja exatidão e precisão dentro dos limites estipulados.

O Controlador Lógico Programável (CLP), ou ainda, *Programmable Logic Controller (PLC)*, proporciona as ferramentas mencionadas acima quando corretamente utilizado. Esse dispositivo é utilizado para controlar sistemas simples como o acionamento automático de um motor, assim como sistemas complexos, como todos processos de uma planta de uma Usina Termoelétrica.

Os sistemas de controle possuem três partes: transdutores ou sensores, controladores e atuadores (UFMG, 2002).

O transdutor é um instrumento, podendo ser elétrico ou ainda eletrônico, cuja função principal é a demonstração de uma grandeza ou a transferência de um dado, à partir da conversão de energia (PROFELECTRO, 20-?). Esse dispositivo pode, ou não, ter o sensor como parte integrante.

O sensor é um equipamento capaz de detectar uma mudança. Esse dispositivo realiza a conversão de uma grandeza em outra grandeza de natureza elétrica (PROFELECTRO, 20-?).

Controlador Lógico Programável, de acordo com a Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT), é um equipamento de cunho eletrônico, composto por *hardware* e *software* cuja função e aplicação sejam compatíveis às necessidades industriais (VENSON, 20-?).

Atuador, de acordo com Curzel (2010), é um equipamento cuja função é efetivar uma função. À exemplo, pode-se citar o acionamento do funcionamento de uma caldeira, a abertura de válvulas e a movimentação da ferramenta do robô.

Esses elementos comunicam-se entre si. O transdutor é um dos elementos de entrada que converte uma grandeza em um dado sinal, sendo esse último, geralmente, elétrico. Atribui-se ao controlador o posto de monitorar em tempo real, em sua maioria, o processo em que se está associado à partir dos transdutores. O atuador, por sua vez, converte o sinal de saída gerado pelo controlador promovendo o acionamento de uma válvula, ou de um motor, ou de demais equipamentos.

Os primeiros controladores, cuja função era realizar o controle de sistemas, surgiram no final do século XIX, período correspondente à Revolução Industrial. Nesse período algumas das tarefas manuais eram substituídas por equipamentos mecânicos, tornando os processos repetitivos e críticos em processos automatizados.

No século seguinte, esses instrumentos mecânicos deram lugar aos relés, que permitiu a implementação de sistemas de controle mais complexos, e contatores. Os relés, ainda hoje, são utilizados na automação de sistemas mais arcaicos devido ao seu custo, relativamente baixo, e por sua aplicabilidade em equipamentos de pequeno porte cuja quantidade de transdutores e atuadores são limitados.

A criação dos circuitos integrados, representou: a redução do espaço físico que, anteriormente era ocupado pelos relés; processamento mais rápido e; durabilidade superior.

A década de 70 foi marcada pelo início da utilização de computadores para realizar o controle de processos em maior escala. À partir desse momento, a lógica, que até então era realizada por interligações elétricas, passou a ser substituída pela lógica programável. Embora esse artifício tenha solucionado o problema do extenso uso de fios elétricos, o computador não era

robusto o suficiente para suportar as condições adversas do ambiente industrial. Dessa forma, ainda nessa mesma década, com a elevada demanda por um equipamento que resistisse à tais condições, foi criado o CLP (Controlador Lógico Programável).

### 2.2.1. Aspectos Gerais do Controlador Lógico Programável Rockwell L74

O Controlador Lógico Programável da Rockwell, modelo L74, é um dispositivo projetado com capacidade de processo, memória e velocidade de processamento que atendam, ao mesmo tempo, requisitos básicos de uma planta básica e, aplicações de processos de alta performance. Esse equipamento oferece ferramentas de fácil manipulação de controle (ALLEN-BRADLEY, 2014).



Figura 2.3: Controlador Lógico Programável ControlLogix7  
Fonte: ROCKWELL AUTOMATION, 2014.

Esse controlador faz parte da família de controladores *ControlLogix*. Ele possui uma elevada quantidade de portas de entrada e de saída e, possui inúmeras opções de comunicação, podendo ser por: *Ethernet/IP*, *ControlNet*, *DeviceNet*, *Data Highway Plus*, *Remote I/O*, dentre outros. Suporta no máximo 500 conexões de controle (NEX INSTRUMENT, 2011).

### III. CONTROLADOR PID

O controlador Proporcional-Integral-Derivativo (PID) é uma ferramenta amplamente utilizada nas indústrias para processos de controle industrial (NATIONAL INSTRUMENTS, 2011). Essa abordagem permite um controle mais refinado e preciso do processo, gerando uma saída mecânica ou eletrônica.

As ações desse controlador são três: proporcional, integral e derivativa.

#### 3.1. Classificação dos Sistemas de Controle

Os sistemas de controle podem ser classificados de diversas maneiras para melhor compreensão de suas características (PEZZIN, 2003).

##### 3.1.1. Quanto a quantidade de variáveis

Os sistemas de controle podem ser classificados com relação ao número de variáveis, podendo ter uma variável ou mais de uma.

##### 3.1.1.1. Monovariável

O sistema monovariável possui uma entrada e uma saída, como resposta.



Figura 4.1: Sistema Monovariável

##### 3.1.1.2. Multivariável

O sistema multivariável possui mais de uma entrada e mais de uma saída, como mostra na figura 4.2.

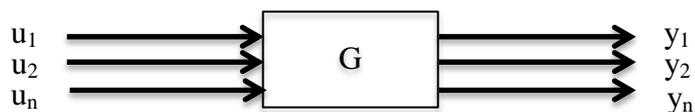


Figura 4.2: Sistema Multivariável

### 3.1.2. Contínuos e Discretos

#### 3.1.2.1. Contínuos

Nos sistemas ditos contínuos, suas variáveis são apresentadas em função do tempo contínuo.

#### 3.1.2.2. Discretos

Nos sistemas classificados como discretos, ao menos uma variável tem seu tempo conhecido em apenas alguns instantes.

### 3.1.3. Quanto à variação no tempo

#### 3.1.3.1. Variante no tempo

No sistema variante no tempo, o momento em que a entrada é aplicada é relevante, visto que a saída depende desse instante.



Figura 4.3: Sistema variante no tempo

#### 3.1.3.2. Invariante no tempo

No sistema invariante no tempo, a saída independe do momento em que a entrada é aplicada.



Figura 4.4: Sistema invariante no tempo

### 3.1.4. Quanto aos parâmetros

#### 3.1.4.1. Parâmetros Concentrados

Nos parâmetros concentrados são **utilizadas** equações diferenciais ordinárias.

#### **3.1.4.2. Parâmetros Distribuídos**

Nos parâmetros distribuídos são utilizadas equações diferenciais parciais.

### **3.1.5. Determinísticos e Estocásticos**

#### **3.1.5.1. Determinísticos**

Um sistema de controle é dito determinístico quando é possível fazer a previsão de sua saída e quando seu resultado é possível de ser repetido.

#### **3.1.5.2. Estocásticos**

Quando um sistema é classificado como estocástico, não é possível de fazer a previsão de sua saída e, não é repetível.

### **3.1.6. Com memória e sem memória**

Um sistema é dito com memória se a presente resposta é dada em função de, pelo menos, uma entrada passada. E, um sistema é dito sem memória se a presente resposta é dada em função da presente entrada.

### **3.1.7. Sistemas Lineares e Não-Lineares**

#### **3.1.7.1. Sistemas Lineares**

Para um sistema ser considerado um sistema linear, as seguintes propriedades devem ocorrer considerando-se que o sistema esteja inicialmente em repouso.

##### **3.1.7.1.1. Aditividade**

No princípio da aditividade ou superposição, quando tem-se uma entrada  $u_1$  e adiciona-se à ela uma entrada  $u_2$ , a resposta à essa adição é  $y_1+y_2$ , ou seja:

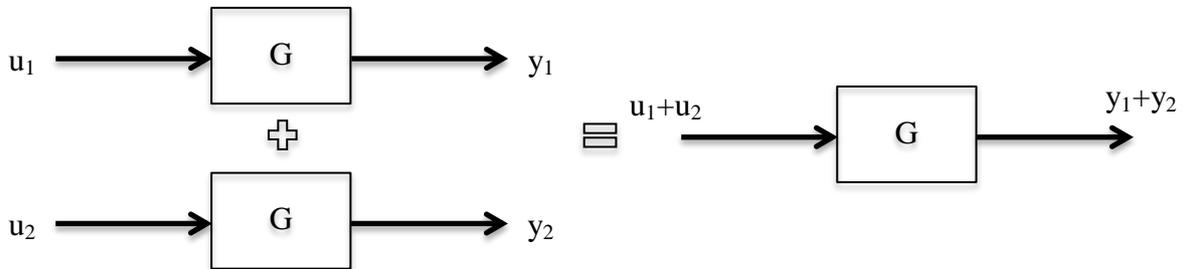
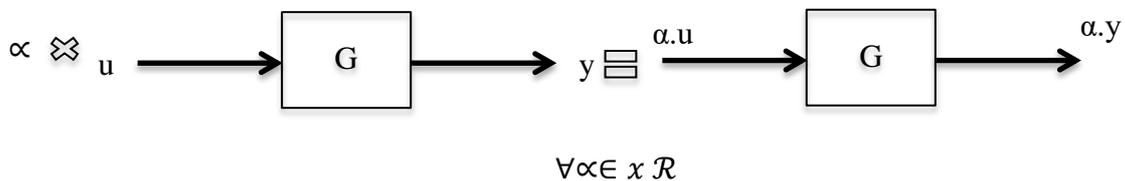


Figura 4.5: Princípio da aditividade

### 3.1.7.1.2. Homogeneidade

O princípio da homogeneidade baseia-se no fato de que ao multiplicar-se a entrada por um número real, a resposta resultante será, também, multiplicada por esse mesmo número real.



$$\forall \alpha \in \mathcal{R}$$

Figura 4.6: Princípio da homogeneidade

### 3.1.7.2. Sistemas Não-Lineares

Nos sistemas Não-Lineares não se aplicam as propriedades de aditividade e de Homogeneidade. Assim:



Figura 4.7: Sistema Não Linear

Exemplo:

$$y = \cos u$$

$$u_1 \rightarrow y_1 = \cos u_1$$

$$u_2 \rightarrow y_2 = \cos u_2$$

Aplicando-se a propriedade da aditividade, adicionando-se  $u_1$  com  $u_2$ :

$$y = \alpha u_1 + \beta u_2$$

$$y = \cos(\alpha u_1 + \beta u_2) \neq \alpha \cos u_1 + \beta \cos u_2$$

$$y = \cos(\alpha u_1 + \beta u_2) \neq \alpha y_1 + \beta y_2$$

## 3.2. Ações do Controlador

### 3.2.1. Controle Proporcional

No processo de controle há uma variável a ser manipulada, podendo ela ser uma tensão, por exemplo. Essa variável se modifica proporcionalmente à diferença calculada entre o *Setpoint* e a variável do processo (temperatura, pressão...). Ou seja, a variável a ser manipulada varia de modo proporcional ao desvio.

Se o desvio for igual a zero, isso significa que o *Setpoint* é igual a variável do processo (NOVUS, 2003). Se o desvio aumenta, a variável manipulada cresce na mesma proporção, com limite superior de 100%. Sendo o limite delimitado à 100%, esse valor corresponde à Banda Proporcional. Duas situações podem ocorrer, para uma Banda Proporcional elevada, a variável manipulada apenas apresentará um valor elevado para que haja correção do processo, apenas se o desvio for alto. Na segunda situação, se a Banda Proporcional for baixa, a saída da variável manipulada será elevada para a realização da correção, mesmo que haja pequenos desvios.

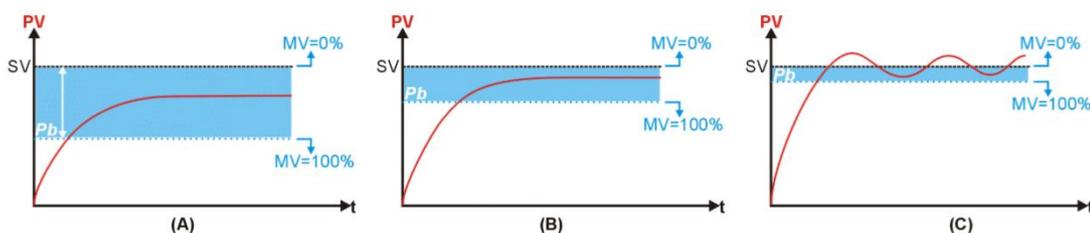


Figura 4.8: Efeito devido o Controle Proporcional

Fonte: NOVUS, 2003.

A figura 4.8 ilustra o que ocorre quando a Banda Proporcional é grande. Há a estabilização do sistema. Entretanto, sua saída está distante do *Setpoint*.

A figura (B) descreve o que ocorre com a saída quando a Banda Proporcional é consideravelmente menor que o caso anterior, mas não muito pequena. Ocorre, também, a estabilização da resposta que se aproxima ao valor desejado (*Setpoint*).

A terceira ilustração (C) mostra o que acontece quando a Banda Proporcional é consideravelmente pequena. A resposta apresenta uma inconstância representada pela oscilação.

Idealmente, deseja-se que a variável de processo seja equivalente ao *Setpoint*, dessa maneira, a variável manipulável seria igual a zero. Isso significaria que a energia não é mais entregue ao sistema e que, o que resulta em desvios. Essa é a razão pela qual um sistema puramente proporcional não se estabiliza quando a variável do processo é igual ao *Setpoint*.

Quando um sistema é operado apenas em modo Proporcional, um valor é adicionado na variável manipulada para que quando a variável proporcional for equivalente ao *Setpoint*, haja ainda alimentação de energia, esse valor é geralmente 50%. Essa quantidade adicionada é chamada de Bias, ou ainda, Polarização, que, quando devidamente regulada, faz com que a variável do processo se estabilize próximo ao valor desejado.

### 3.2.2. Controle Proporcional Integral

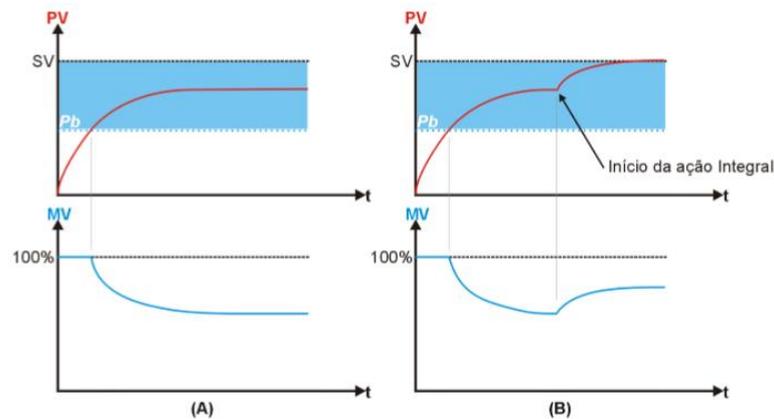


Figura 4.9: Controle Proporcional e efeito devido o a inserção do Controle Integral

Fonte: NOVUS, 2003.

Diferentemente do controle proporcional, o controle integral não é aplicado puramente ao sistema. A parte integral age na saída da variável manipulada e apresenta proporcionalidade com relação à amplitude e à duração do desvio, afim de compensar o desvio ocasionado pelo

controle exclusivamente proporcional. Dessa maneira, o controle PI age afim de eliminar o erro em regime permanente.

### 3.2.3. Controle Proporcional Derivativo

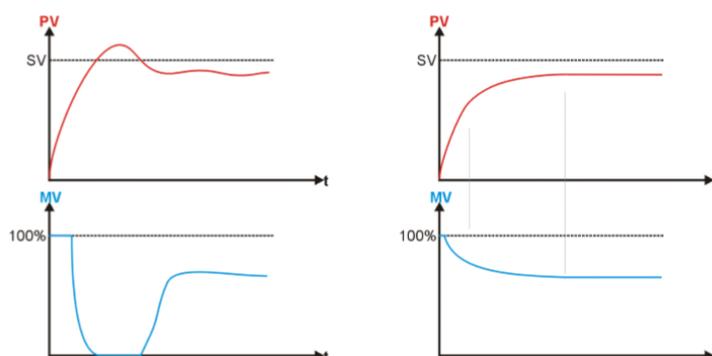


Figura 4.10: Controle Proporcional e efeito devido a inserção do Controle Derivativo  
Fonte: NOVUS, 2003.

Assim como o controle PI, o derivativo age em combinação com o controle proporcional. A porção derivativa atua, também na saída do controlador, ou seja na variável manipulada, e apresenta resposta proporcional à velocidade de variação dos desvios. O controle derivativo age de maneira a evitar que a variável de processo aumente ou diminua de maneira brusca. Dessa maneira, o derivativo apenas atua quando há variação no erro, caso a variação não ocorra, ou seja, caso ele esteja estável, ele não age.

### 3.2.4. Controle Proporcional-Integral-Derivativo

O controle PID é a integração dos controles Proporcional, Integral e Derivativo, na qual, resumidamente, pode-se dizer que o Proporcional é responsável pelo controle básico, o Integral faz a ação de corrigir o erro e o Derivativo reduz as variações. Embora pareça ser de simples explicação, a sintonia das variáveis correspondentes a cada um, é complexa, visto que a alteração de cada uma apresenta um efeito nas demais variáveis.

## 3.3. Controlador PID analisado

Os ganhos proporcional ( $K_p$ ), integral ( $K_i$ ) e derivativo ( $K_d$ ) são os parâmetros de um controlador PID.

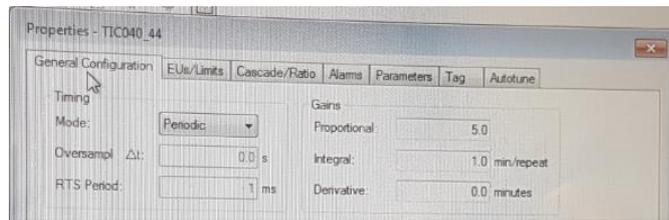


Figura 4.11: Configuração do controlador PID

Como observado na figura 4.11, os valores correspondentes à cada um dos ganhos citados são, respectivamente, 5,1 e 0. Assim, tem-se que o controle adotado foi o Controle Proporcional-Integral.

Desse modo, tem-se que a porção integral age na saída da variável manipulada e, é proporcional à amplitude e à duração do desvio, com o objetivo de compensar o desvio ocasionado pelo controle proporcional. O controle PI foi utilizado para eliminar o erro em regime permanente.

## **IV. TROCADORES DE CALOR**

Como visto no Capítulo 2, o trocador de calor é um equipamento utilizado para viabilizar a troca de calor entre dois ou mais fluidos, separados por uma parede e, que possuem temperaturas distintas. A transferência de calor ocorre do fluido mais quente para o fluido mais frio.

A variabilidade dos modelos de trocadores de calor se dá devido à diversidade da aplicação e da finalidade do mesmo em diferentes processos e indústrias.

O modelo mais popular é o de casco e tubos, que pode ser encontrado em refinarias de petróleo e seu uso se justifica para processos de troca de calor em alta pressão.

Diversos são os modos de classificação dos trocadores de calor.

### **4.1. Classificação dos trocadores de calor**

Os trocadores possuem formas distintas, assim como dimensões e perfis de escoamento.

ALMEIDA (20-?) faz uma análise dos métodos de classificação baseado em estudos realizados por FAAS e OZISIK (1965) e, KAKÇ, SHAH e BERGLES (1982), propondo o seguinte método de classificação:

1. Classificação de acordo com o processo de transferência de calor;
2. Classificação baseada na compactibilidade;
3. Classificação de acordo com o tipo de construção;
4. Classificação quanto à disposição das correntes.

#### **4.1.1. Classificação de acordo com o processo de transferência de calor**

Existem duas modalidades de troca de calor, por contato direto e por contato indireto. Na troca de calor por contato direto, os fluidos que trocam calor entre si, não se misturam, sendo assim imiscíveis entre si.

A troca de calor por contato indireto, por outro lado, não ocorre o contato dos fluidos, sendo separados, dessa maneira por uma superfície impermeável.

#### **4.1.2. Classificação baseada na compactibilidade**

A classificação dos trocadores quanto à compactabilidade, é relativa. A exemplo, pode-se associar a compactabilidade realizando a razão entre a área da superfície que se realiza a transferência de calor e, o volume. Se a área superficial específica for superior à  $700\text{m}^2/\text{m}^3$ , pode-se classificá-lo como um trocador de calor compacto, desconsiderando-se seu modelo estrutural. E, caso o trocador de calor possua área superficial específica inferior ao valor mencionado, pode ser classificado como trocador de calor não compacto.

Um trocador de calor com elevado valor de compactabilidade implica na redução de volume de troca de calor.

A importância de se classificar quanto à compactabilidade está diretamente relacionada à sua aplicabilidade. É necessário que os trocadores sejam compactos para automóveis, assim como para aviões e para equipamentos de condicionamento de ar.

#### 4.1.3. Classificação de acordo com o tipo de construção

A classificação de acordo como tipo de construção se refere ao seu modelo construtivo. Os trocadores podem ser classificados por:

##### 4.1.3.1. Trocadores de calor do tipo duplo tubo

Os trocadores do tipo duplo tubo, como o próprio nome infere, possui dois tubos. Os tubos possuem diâmetros distintos, na qual um deles se posiciona dentro do outro, concentricamente, de forma que possibilite a passagem do fluido por duas cavidades, uma cavidade interna ao tubo central e outra cavidade entre os dois tubos.

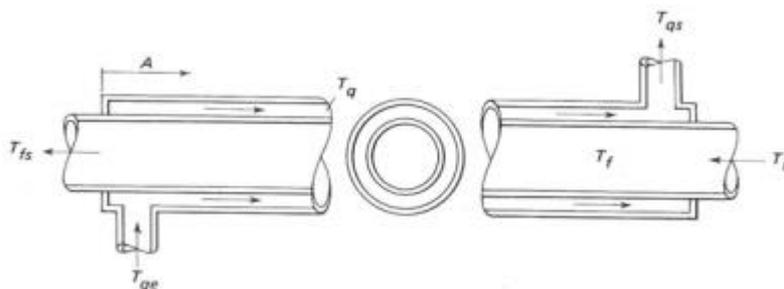


Figura 5.1: Trocador de calor do tipo Duplo Tubo

Fonte: PIRES, FERNANDES, VILELA, SILVA, BORGES, EMÍLIA, FALEIROS, 2016

##### 4.1.3.2. Trocadores de calor tipo casco e tubos (ou multi-tubulares)

Como visto anteriormente, esse padrão representa o modelo mais comum dentre os trocadores. Sua ampla utilização se justifica quanto a facilidade de fabricação e ao custo de produção, relativamente baixo.



Figura 5.2: Trocador de calor do tipo Casco e Tubos  
Fonte: WESSLER, 2013.

Ele é composto por inúmeros tubos de formato cilíndrico localizados no interior de um casco, de forma cilíndrica, na qual todos os tubos são dispostos paralelamente entre si e ao casco. Nesse conjunto, a troca pode ser realizada entre líquidos, ou líquido para gás ou ainda, gás para gás.

#### 4.1.3.3. Trocadores de calor à placas

Esses trocadores são constituídos de placas, como o nome sugere e, geralmente, de espessura fina. As placas podem ser constituídas por superfície lisa ou rugosa, com capacidade para suportar temperaturas e pressões moderadas. Não são consideradas compactas isto que, seu valor calculado quanto à compactabilidade está entre os montantes  $120\text{m}^2/\text{m}^3$  e  $230\text{m}^2/\text{m}^3$ .



Figura 5.3: Trocador de calor à Placas  
Fonte: ALLBIZ, 2010-2017.

#### 4.1.3.4. Trocadores de calor de placa aletada



Figura 5.4: Trocaador de calor de Placa Aletada  
Fonte: SOLUÇÕES INDUSTRIAIS.

Os trocadores de calor de placa aletada podem aumentar significativamente o valor de compacticidade. Essa modalidade de trocadores pode ser composta por placas lisas e rugosas, assim como visto no modelo anterior em que, as placas são isoladas por placas lisas. Podendo, ainda, haver variação no sentido do escoamento dos fluidos nas aletas. Esses trocadores trabalham em baixa pressão e geralmente, a troca de calor é realizada entre gases.

#### 4.1.3.5. Trocadores de calor de tubo aletado



Figura 5.5: Trocaador de calor de Tubo Aletado  
Fonte: ALLBIZ, 2010-2017.

Os trocadores de tubo aletado são utilizados para trocas de calor em elevada pressão (até 30 atm) ou quando é necessário que de um lado da troca a superfície seja maior.

#### 4.1.3.6. Trocadores de calor regenerativos



Figura 5.6: Trocador de calor Regenerativo  
Fonte: FERNANDES, 2015.

Existem dois modelos de trocadores de calor regenerativos, sendo eles: dinâmico ou estático. O primeiro possui uma parte central, em formato de tambor, que se move em rotação passando por uma seção quente e depois por uma seção fria. Durante a troca de calor, o calor é depositado na parte central e, quando há a passagem desse tambor pela porção fria, o calor é transferido para o gás frio.

O trocador de calor regenerativo estático não possui elementos móveis. A passagem dos fluidos quente e frio é realizada de modo alternado por uma válvula, passando por uma parte central composta de uma massa porosa. A troca de calor ocorre primeiramente pela passagem do fluido quente, pela massa, na qual o calor é armazenado nesse componente e, posteriormente, realiza-se a passagem do fluido frio que retira o calor da massa.

#### **4.1.4. Classificação quanto à disposição das correntes**

São diversas as configurações de escoamento. As principais são:

##### **4.1.4.1. Correntes paralelas**

Ambos os fluidos entram pelo mesmo lado e fluem no mesmo sentido, e saem do mesmo lado.

##### **4.1.4.2. Contracorrente**

Diferentemente do caso anterior, os fluidos entram, escoem e saem por lados opostos.

#### **4.1.4.3. Correntes cruzadas**

Nessa disposição, o fluido quente escoe perpendicularmente ao fluido frio. Existem três tipos de configurações de trocador de calor por correntes cruzadas:

- a primeira baseia-se na troca de calor na qual os fluidos não se misturam;
- o segundo modelo baseia-se na troca de calor em que um fluido está misturado e o outro não se mistura e;
- na terceira configuração, ambos os fluidos encontram-se misturados.

#### **4.1.4.4. Escoamento multipasse**

Como o próprio nome infere, o escoamento multipasse apresenta múltiplas passagens. Esse modelo é frequentemente utilizado visto que, os múltiplos canais permitem que a troca de calor seja intensa. Adicionalmente, as configurações são variadas, o que permite, também, a extensa empregabilidade do mesmo.

### **4.2. Trocadores de Calor analisados**

O processo de troca de calor estudado, incluiu dois modelos distintos de trocadores de calor. O primeiro é o trocador de calor brasado da Alfa Laval, modelo CB76-40H e, o segundo trocador analisado foi o pasteurizador de soro APV SR26BS. Sendo que, o primeiro realiza um processo de pré aquecimento da água, antes que esse mesmo fluido passe pelo pasteurizador.

#### **4.2.1. Trocador de Calor Brasado**

O trocador de calor brasado estudado, primeiramente, foi o CB76-40H da Alfa Laval.

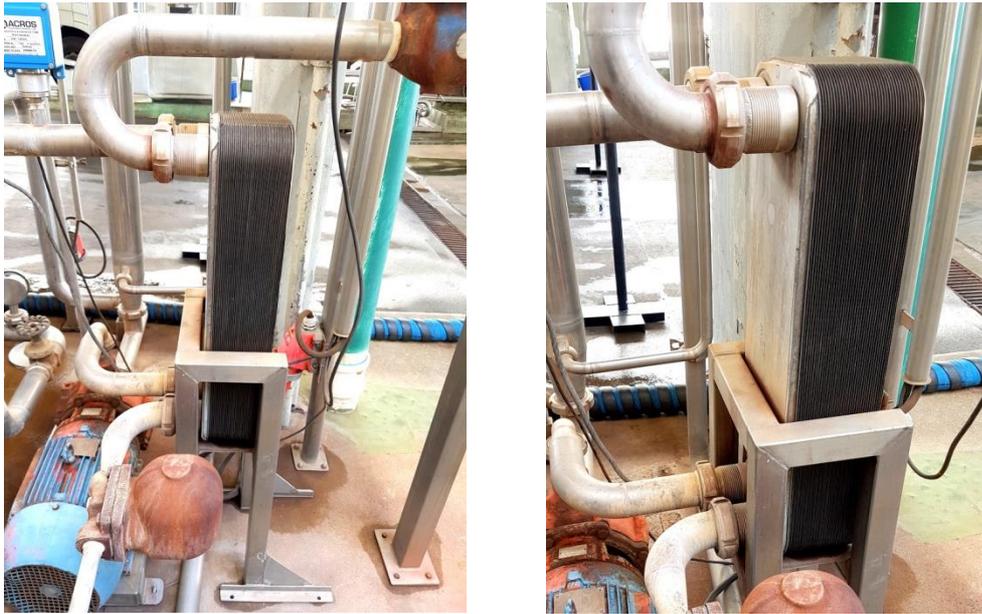


Figura 5.7: Trocador de Calor Brasado CB76-40H da Alfa Laval

O modelo é composto por 40 placas finas e rugosas que, estão posicionadas muito próximas umas das outras, cujas superfícies realizam a troca de calor. Entre as placas encontram-se canais que permitem a passagem dos fluidos de modo alternado, sem que eles se misturem, em sentido contra-corrente. Como observado na figura 5.8, esse modelo possui 4 cavidades externas em que duas são reservadas à entrada dos fluidos e as demais são destinadas à saída dos fluidos.

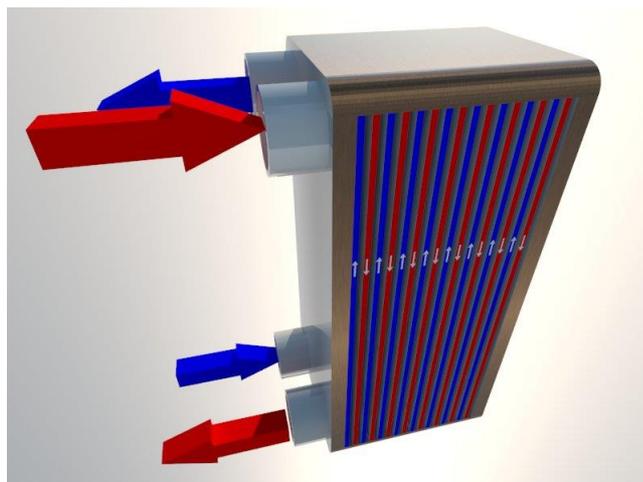


Figura 5.8: Entrada e saída dos fluidos do trocador CB76-40H da Alfa Laval

No caso do trocador de calor brasado, os fluidos que realizam a troca de calor são: o vapor e a água. O vapor é o fluido quente que, entra pela cavidade superior do trocador, circula

alternadamente por entre as placas, perdendo calor, e por fim, sai do sistema pelo mesmo lado com temperatura reduzida. A água por sua vez, é o fluido frio que, entra pelo tubo inferior e, assim como o vapor, circula alternadamente por entre as placas, porém em um canal distinto de onde se escoo o fluido quente. Dessa maneira, o calor é transferido pelas placas, do vapor para a água, e assim, sai pelo mesmo lado em um tudo localizado na extremidade superior.

*Tabela 5.1: Relação das especificidades do Trocador de Calor Brasado*

<b>Fluido</b>	<b>Lado Quente</b>	<b>Lado Frio</b>	<b>Unidade</b>
	<b>Vapor</b>	<b>Água</b>	
<b>Densidade</b>	1,596	971,6	$Kg/m^3$
<b>Capacidade de Calor Específico</b>	2,24	4,18	$KJ/Kg.K$
<b>Condutividade Termal</b>	0,0270	0,669	$W/m.K$
<b>Viscosidade de Entrada</b>	0,0135	0,370	$cP$
<b>Viscosidade de Saída</b>	0,0135	0,341	$cP$
<b>Taxa de Vazão Mássica</b>	389,3	30000	$Kg/h$
<b>Temperatura de Entrada</b>	133,6	76,3	$^{\circ}C$
<b>Temperatura de Saída</b>	133,5	83,0	$^{\circ}C$
<b>Perda de Carga</b>	1,28	255	$KPa$
<b>Calor Trocado</b>	233,6	-	$KW$
<b>L.M.T.D.</b>	53,9	-	$K$
<b>Área de Transferência de Calor</b>	3,80	-	$m^2$

A tabela 5.1 apresenta os parâmetros fornecidos, constando algumas das variáveis referentes ao funcionamento do trocador de calor brasado.

#### 4.2.2. Pasteurizador

O pasteurizador utilizado para realizar a segunda etapa do processo de troca de calor, é o pasteurizador APV SR26BS.

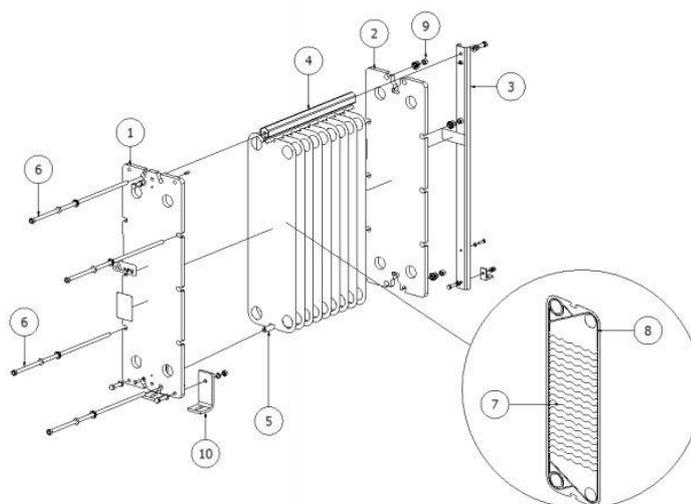


Figura 5.9: Detalhes do Pasteurizador  
Fonte: SPX FLOW, 2012.

O permutador de calor é composto pelos seguintes elementos:

- 1- Placa frontal – cuja função é a proteção e para apertar as placas;
- 2- Placa de pressão – sua função assim como a frontal é a proteção e para apertar as placas;
- 3- Suporte final – serve de apoio para apoiar as barras;
- 4- Barra superior – serve de sustentação para as placas;
- 5- Barra inferior – serve como guia para as placas;
- 6- Barras de pressão – são utilizadas para apertar todas as placas do sistema;
- 7- Placa de fluxo – local onde se escoo o fluido para a realização da troca de calor;
- 8- Junta de fluxo – junta delimitadora d fluxo do fluido;
- 9- Porca – sua função é apertar e unir as placas, fixando-as na barra;
- 10- Placa base – fixa o trocador de calor na base.

O pasteurizador estudado é composto por 49 placas metálicas de fluxo, com distância média de 0.1435m entre si. Cada placa apresenta rugosidade formando-se canais que auxiliam no escoamento e na troca de calor do fluido com a placa. Cada placa possui quatro orifícios, sendo dois de entrada e dois de saída. Quando colocadas apropriadamente, as placas são vedadas com a ajuda da junta de fluxo que, propicia para que não haja elevada perda do calor para o ambiente.



Figura 5.10: Pasteurizador APV SR26BS

Nesse contexto, assim como no trocador de calor brasado, o pasteurizador possui 4 orifícios.

Tabela 5.2: Relação das especificidades do Pasteurizador

Fluido	Lado Quente	Lado Frio	Unidade
	Água	Soro	
Densidade	0,972	1,000	Kg/L
Calor Específico	1,002	0,971	Kcal/Kg. °C
Condutividade Térmica	0,575	0,562	Kcal/h. °C. m
Viscosidade de Entrada	0,34	0,80	cP
Viscosidade de Saída	0,37	0,68	cP
Taxa de Vazão Volumétrica	30000	20000	L/h
Temperatura de Entrada	83,00	70,00	°C
Temperatura de Saída	76,3	80,00	°C
Perda de Carga	0,58	0,30	bar
U de Projeto	5383,7		Kcal/h.m <sup>2</sup> . °C
Número de Placas	49		-
Área de Transferência de Calor	8,08		m <sup>2</sup>

A tabela 5.2 apresenta os parâmetros fornecidos, constando algumas das variáveis referentes ao funcionamento do pasteurizador.

#### 4.3. SISTEMA DE TROCA DE CALOR

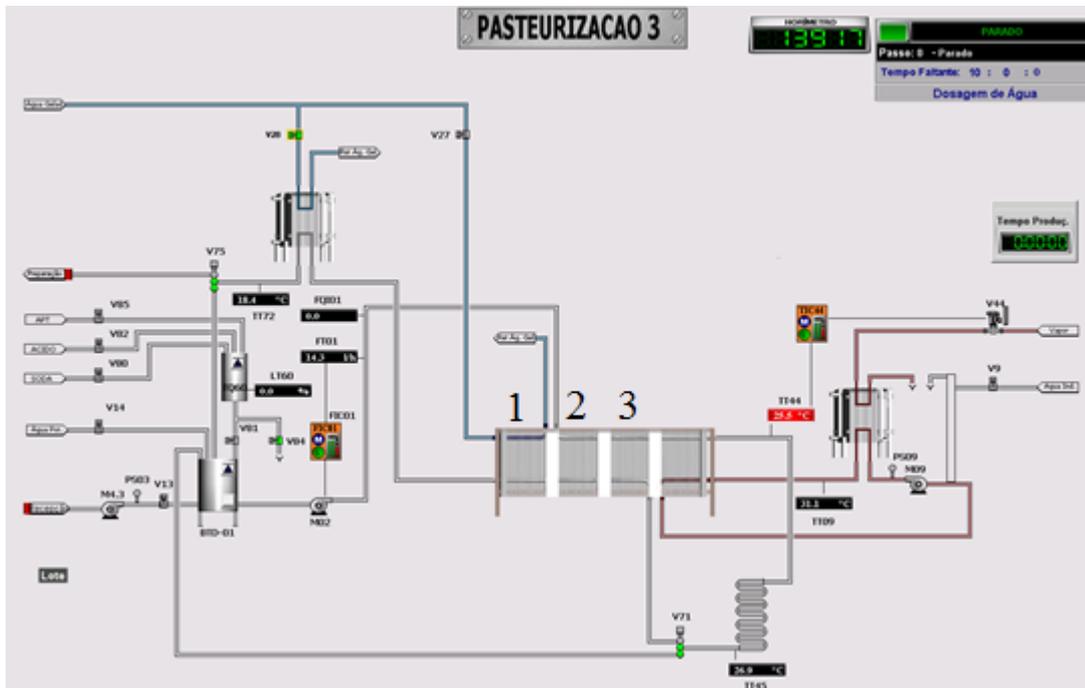


Figura 3.1: Processo Pasteurização 3

A figura 3.1 representa o esquema do processo de troca de calor, no Pasteurizador 3, que envolvem os trocadores de calor brasado e o pasteurizador.

À princípio têm-se a recepção do produto que é bombeada pelo motor M4.3. Assim que o produto é bombeado pela tubulação, o sensor de pressão PS03 faz a leitura da pressão do mesmo. Em seguida, verifica-se, através do sensor de nível, se o soro contido dentro tanque atingiu o volume máximo de armazenamento. Caso a quantidade máxima tenha sido alcançada, a válvula V13 se mantém fechada, caso contrário, a válvula é aberta.

À medida em que o tanque é preenchido, o motor M02 é acionado, transportando o soro pelos segmentos 2, 3 e, posteriormente pelo pasteurizador.

Paralelamente à esse processo, tem-se o TIC44 (Indicador Controlador de Temperatura) que verifica se a temperatura de saída do produto do pasteurizador, através do transmissor de temperatura TT44 está acima ou abaixo da temperatura de  $75^{\circ}\text{C}$ . Se o valor for superior à esse limite, a válvula de vapor V44 se mantém fechada. Se o valor for inferior à esse limite, a

válvula V44 se abre, gradualmente, transportando o vapor, proveniente da caldeira, pela tubulação e passando pelo trocador de calor brasado.

O trocador de calor da Alfa Laval, é o equipamento que realiza a troca de calor entre o vapor e a água, nesse processo. Assim, enquanto o vapor circula de um lado do trocador, a água circula em sentido contra corrente ao vapor, impulsionada pelo motor M09 e posteriormente encaminhada ao pasteurizador, para realizar a troca de calor com o soro.

O soro, após passar pelo trocador de calor à placas, duas situações podem ocorrer. Se o sensor de temperatura TT45 apontar que a temperatura lida possui valor inferior à temperatura de 75°C, a válvula V71 libera passagem para que o soro retorne ao tanque, na qual o soro foi inicialmente depositado, para que este seja aquecido novamente e atinja a temperatura mínima. Caso o sensor TT45 aponte um valor superior à temperatura limite de 75°C, e que este valor esteja dentro de um limite aceitável, a válvula V71 libera passagem para que esse produto circule pelas partições 3,2 e 1, e realize troca de calor com o produto nos componentes 3 e 2, e com a água gelada em 1.

O soro segue em direção ao trocador de calor, na qual passa por um resfriamento. Se o sensor de temperatura TT72 indicar que a temperatura inferior à 75°C graus, o soro retorna ao tanque. Caso a temperatura indique um valor superior à 75°C graus, e dentro de um limite especificado, a válvula V75 direciona o produto para a preparação, que representa a etapa seguinte.

## V. TRANSFERÊNCIA DE CALOR GLOBAL

A taxa de transferência de calor global é determinado à partir do coeficiente global de transferência térmica ( $U$ ), a área da superfície em que se ocorre a troca térmica ( $A$ ) e a diferença de temperatura média logarítmica ( $DTML$ ).

É necessário que, inicialmente, se conheça o arranjo da corrente.

### 5.1. Arranjos de Corrente

São definidos dois tipos distintos de arranjo de correntes, sendo eles, o arranjo de corrente em paralelo e o arranjo de corrente em contra-corrente.

#### 5.1.1. Corrente em Paralelo

No arranjo de corrente em paralelo, o fluido quente possui o mesmo sentido que o fluido frio.

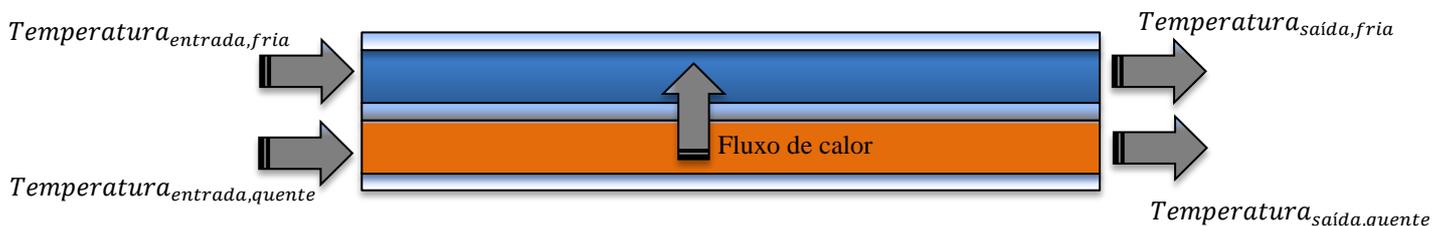


Figura 6.1: Ilustração da troca de calor entre fluidos de temperaturas distintas

O comportamento das temperaturas envolvidas é mostrada na figura 6.2.

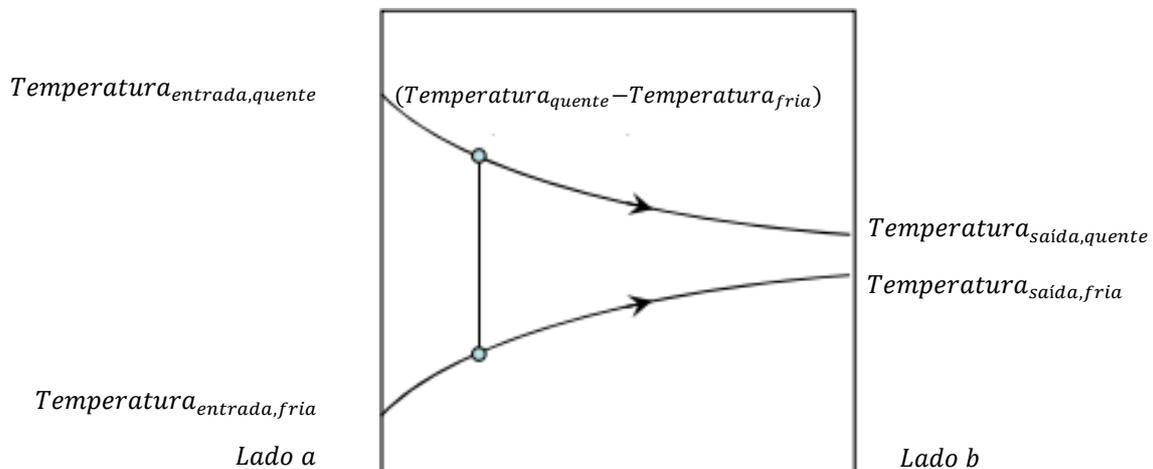


Figura 6.2: Comportamento das temperaturas para fluidos de corrente em paralelo

Observa-se que a temperatura de saída do fluido quente será superior à temperatura de saída do fluido frio e que, a relação da diferença de temperatura entre os dois fluidos é decrescente ao decorrer da troca de calor. Ou seja:

$$Temperatura_{saída,quente} > Temperatura_{saída,fria}$$

$$Temperatura_{quente} - Temperatura_{fria} \rightarrow decrescente$$

Pode-se então relacionar as temperaturas da seguinte maneira:

$$\Delta T_a = Temperatura_{entrada,quente} - Temperatura_{entrada,fria} \quad (1)$$

$$\Delta T_b = Temperatura_{saída,quente} - Temperatura_{saída,fria} \quad (2)$$

### 5.1.2. Arranjo em Contra-Corrente

No modelo de arranjo contra-corrente, o fluido quente possui seu sentido de escoamento oposto ao fluido frio.

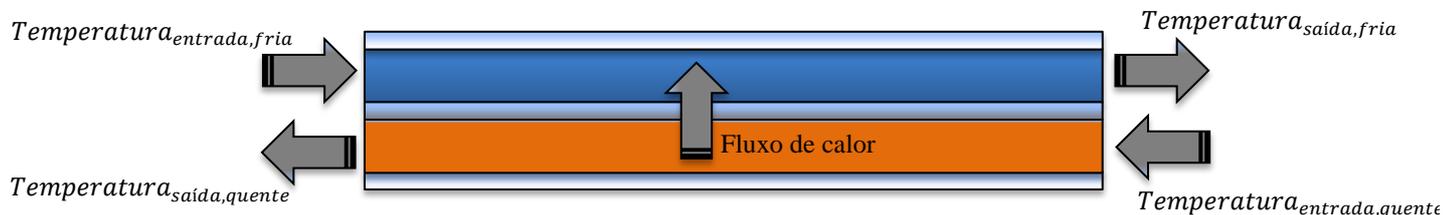


Figura 6.3: Ilustração da troca de calor entre fluidos de temperaturas distintas em contra-corrente

As temperaturas se comportam proporcionalmente, demonstradas na figura 6.4.

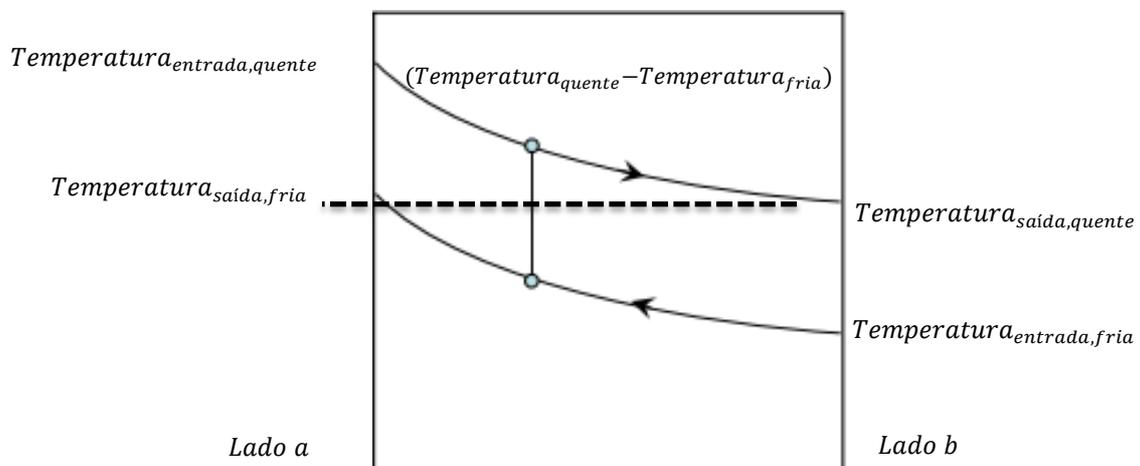


Figura 6.4: Comportamento das temperaturas para fluidos em contra-corrente

No modelo em que o arranjo é contra-corrente, a temperatura de saída do fluido quente pode ser inferior à temperatura de saída do fluido frio. E, ainda, pode-se averiguar que a diferença entre a temperatura do fluido quente e a temperatura do fluido frio apresentam uma certa proporcionalidade. Assim:

$Temperatura_{saída,quente}$  pode ser  $> Temperatura_{saída,quente}$

$Temperatura_{quente} - Temperatura_{fria} = constante$

Pode-se associar as temperaturas do seguinte modo:

$$\Delta T_a = Temperatura_{entrada,quente} - Temperatura_{saída,fria} \quad (3)$$

$$\Delta T_b = Temperatura_{saída,quente} - Temperatura_{entrada,fria} \quad (4)$$

## 5.2.DTML

DTML (Diferença de Temperatura Média Logarítmica), ou ainda, LMTD (*Logarithmic Mean Temperature Difference*), representa a equação que relaciona as temperaturas de entrada e saída do trocador de calor, na qual seu comportamento é não linear. A equação, de forma geral, é dada por:

$$DTML = \frac{\Delta T_a - \Delta T_b}{\ln \frac{\Delta T_a}{\Delta T_b}} \quad (5)$$

Para a configuração de correntes paralelas:

$$DTML = \frac{(Temp_{ent,quente} - Temp_{ent,fria}) - (Temp_{saída,quente} - Temp_{saída,fria})}{\ln \left( \frac{(Temp_{ent,quente} - Temp_{ent,fria})}{(Temp_{saída,quente} - Temp_{saída,fria})} \right)} \quad (6)$$

Para a configuração contra-corrente:

$$DTML = \frac{(Temp_{ent,quente} - Temp_{saída,fria}) - (Temp_{saída,quente} - Temp_{ent,fria})}{\ln \left( \frac{(Temp_{ent,quente} - Temp_{saída,fria})}{(Temp_{saída,quente} - Temp_{ent,fria})} \right)} \quad (7)$$

### 5.3. Coeficiente Global de Transferência Térmica

O coeficiente global de transferência de calor é dado em  $W/m^2 \cdot ^\circ C$ . Esse coeficiente (NHAMBIU, 2011) representa a resistência térmica existente que se opõem a transferência de calor que ocorre entre o fluido quente e o fluido frio.

Usualmente, as áreas das paredes, interna e externa ( $A_i \neq A_e$ ), se diferem. Desse modo, o coeficiente global de transferência de calor da parede interna é diferente do coeficiente da superfície externa  $U_i \neq U_e$ . No entanto, se as áreas forem iguais, os coeficientes teram o mesmo valor, ou seja,  $U_i = U_e$ .

Tabela 6.1: Coeficiente Global de Transferência de Calor

Característica do Trocador de Calor	U ( $W/m^2 \cdot ^\circ C$ )
Trocador de calor de água para água	850-1700
Trocador de calor de água para óleo	100-350
Trocador de calor de água para gasolina (ou querosene)	300-1000
Aquecedores de água de alimentação tratada	1000-8500
Condensadores de vapor	1000-6000
Condensadores de Freon	300-1000
Condensadores de Álcool	250-700

No presente trabalho, a informação relacionada ao coeficiente global de transferência de calor, foi concedida pelos fornecedores dos equipamentos de troca de calor.

### 5.4. Taxa de Transferência de Calor

A taxa de transferência de calor é calculada com base nos elementos citados: área ( $A$ ), Diferença de Temperatura Média Logarítmica ( $DTML$ ), e coeficiente global de transferência de calor ( $U$ ).

$$Q = U \cdot A \cdot DTML \quad (8)$$

A unidade correspondente à taxa de transferência é dada em KW.

## VI. MODELAGEM MATEMÁTICA

### 6.1. Introdução a Modelagem Matemática

De acordo com Silvares (2012), modelagem matemática pode ser descrita como um conjunto de procedimentos cuja finalidade é a obtenção da representação matemática de modelos reais. A descrição matemática de um sistema real tem expressiva importância para diversas áreas de estudos, como a biologia, sociologia e engenharia. Nesse contexto, a modelagem é aplicável à distintos problemas e processos. Permitindo, assim, que o estudo seja conduzido de modo a se compreender de maneira mais clara o funcionamento do fenômeno em questão.

A representação matemática de um sistema por modelagem, apresenta uma caracterização matemática aproximada do modelo de referência em questão. Desse modo, existem inúmeras maneiras de se equacionar um dado problema, visto que cada um adota uma metodologia própria e, considera as características que se julga mais importantes.

Lindsay (1920) (PORTNOI, 1999) descreve que Engenharia é a ação em termos de execução, de maneira a assegurar a segurança e economia, à partir de leis do meio científico que regem os elementos da Natureza de modo a promover benefícios aos humanos.

Dessa maneira, a modelagem é a base para o melhor entendimento do que ocorre na natureza para que se possa copiá-la e/ou adaptá-la para o convívio em harmonia do meio natural com o meio modificado, afim de se obter segurança, progresso e comodidade para que, essa interferência ocasione efeitos menos nocivos ao ambiente e aos seres humanos.

### 6.2. Modelagem de um Trocador de Calor em placas:

Uma das modalidades de energia conhecida é o Calor, representado por  $Q$ . O calor pode ser descrito como o fluxo de energia que ocorre nos limites do sistema, na qual há diferença de calor entre os corpos, podendo ocorrer por condução, convecção e irradiação (MAZZUCCO, 2013).

Para a modelagem de um modelo matemático simplificado, assumiu-se que:

- As propriedades para a realização do transporte dos fluidos não apresentam alteração com a mudança de temperatura;
- Não ocorre a mudança de fase dos fluidos estudados para o caso em questão;
- Despreza-se as variações das energias cinética e potencial. (GARCIA, 2015)

No processo de troca térmica, algumas convenções também foram adotadas:

- Ocorrência de transferência de energia por condução nas paredes das placas;
- Ocorrência de transferência de energia por convecção entre o fluido quente e a parede da placa a qual atinge e;
- Ocorrência de transferência de energia por convecção entre o produto (fluido frio) e a superfície da placa a qual toca.

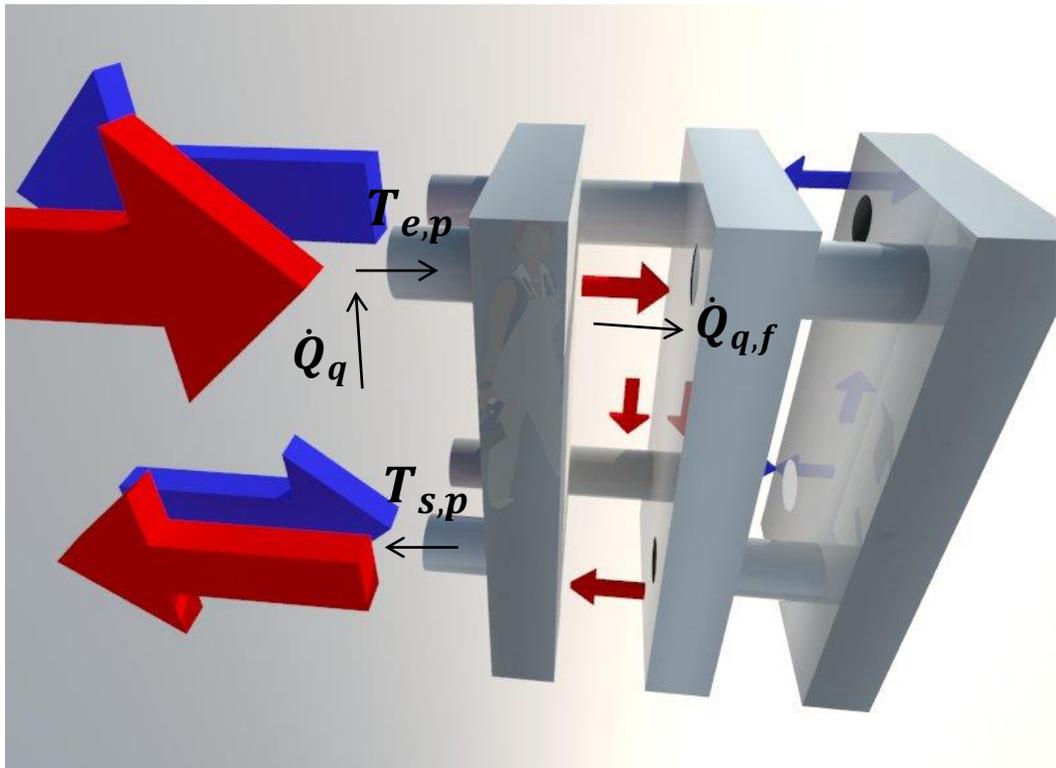


Figura 7.1: Esquemática da troca de calor no feixe tubular e entre as placas

No presente trabalho, a proposta da modelagem simplificada do sistema geral de troca de calor foi baseada à partir do projeto de mestrado “Desenvolvimento de Modelo Matemático de Troca de Calor Tipo Casco-Tubos”, idealizado por Andrea Cristina Esteves.

A modelagem matemática dos trocadores de calor foi obtida por meio do balanço global de energia aplicada ao volume de controle com relação às placas de troca de calor.

Assim, por meio da 1ª Lei da Termodinâmica, sabendo-se que a variação de energia em um sistema fechado é equivalente ao calor fornecido a esse sistema somado ao trabalho realizado pelo mesmo (MAZZUCCO, 2013).

Sendo assim,

$$[E_2 - E_1] = Q_{1,2} - W_{1,2} \quad (9)$$

Como anteriormente citado, considerando-se que não haja trabalho, a nova fórmula é dada por:

$$[E_2 - E_1] = Q_{1,2} \quad (10)$$

Sabendo-se, primeiramente, que ocorre condução de calor entre as placas e, considerando-se que a parede da placa seja plana, sendo esta submetida a uma diferença de temperatura ([http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro\\_do\\_petroleo/transferencia\\_calor.pdf](http://www.tecnicodepetroleo.ufpr.br/apostilas/engenheiro_do_petroleo/transferencia_calor.pdf)), o fluxo de calor que atravessa a placa plana é, de maneira geral, descrita por:

$$\dot{Q} = \frac{k \cdot A}{L} \cdot \Delta T \left[ \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right] \quad (11)$$

Sendo:

$\dot{Q}$  = o fluxo de calor [kcal/h];

k = a condutividade térmica do material [Kcal/h . m . °C];

A = a área transversal [m<sup>2</sup>];

L = a espessura [m];

$\Delta T$  = a diferença entre as temperaturas [°C].

No entanto, a mesma não pôde ser utilizada pela limitação de informações disponibilizadas pelo fabricante.

Houve a necessidade de se adaptar a fórmula anterior para que se adequassem aos dados fornecidos. Assim:

$$\dot{Q} = \frac{k \cdot A}{L} \cdot \Delta T = \rho \cdot F \cdot c \cdot \Delta T \left[ \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \right] \quad (12)$$

Sendo:

$\rho$  = a densidade do líquido [Kg/m<sup>3</sup>];

F = a vazão volumétrica [m<sup>3</sup>/h];

c = o calor específico [Kcal/Kg].

Assim, considerando-se que os trocadores apresentam um comportamento adiabático, ou seja, não ocorre troca de calor com o meio externo (SCHULZ, 2009), o balanço global de energia simplificado que descreve a figura acima, pode ser representado pela equação.

$$\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q} \cdot [T_{e,p}(t) - T_{s,p}(t)] - \dot{Q}_{Q,F}(t) + \dot{Q}_Q(t) = \overline{\rho_Q} \cdot V_Q \cdot \overline{c_Q} \frac{dT_{s,p}}{dt} \quad (13)$$

Sendo :

- $\rho_Q$  , a densidade do fluido quente que percorre o caminho, dada em Kg/m<sup>3</sup>;
- $F_Q$  , a vazão do fluido quente, dada em m<sup>3</sup>/h;
- $c_Q$  , o calor específico do fluido que flui no lado quente, dado em kcal/Kg.°C;
- $T_{e,p}$  , a temperatura de entrada do fluido quente nas placas, dada em °C;
- $T_{s,p}$  , a temperatura de saída do fluido quente nas placas, dada em °C;
- $\dot{Q}_{Q,F}$  , fluxo de calor da placa quente para a parede fria, dada em Kcal/h;
- $\dot{Q}_Q$  , fluxo de calor da água de vapor, dado em Kcal/h;
- $V_Q$  , volume de líquido ocupado pelo fluido quente, dado em m<sup>3</sup>.

A mesma equação, quando em estado estacionário, ou seja, **em regime permanente**, pode ser reproduzida pela fórmula abaixo:

$$\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q} \cdot [T_{e,p_{ee}}(t) - T_{s,p_{ee}}(t)] - \dot{Q}_{Q,F_{ee}}(t) + \dot{Q}_{Q_{ee}}(t) = 0 \quad (14)$$

Sendo:

- $T_{e,p_{ee}}$  , a temperatura de entrada do fluido quente nas placas em estado estacionário, dada em °C;
- $T_{s,p_{ee}}$  , a temperatura de saída do fluido quente nas placas em estado estacionário, dada em °C;
- $\dot{Q}_{Q,F_{ee}}$  , fluxo de calor da placa quente para a parede fria em estado estacionário, dada em Kcal/h;
- $\dot{Q}_{Q_{ee}}$  , fluxo de calor da água de vapor em estado estacionário, dado em Kcal/h.

Antes de realizar a aplicação da transformada de Laplace, utiliza-se o método VARIÁVEIS DESVIO, assim, faz-se a subtração das variáveis da equação (13) pela equação (14), na qual esta última se encontra em estado estacionário (ESSEL, 2016). Então, tem-se que:

$$\begin{aligned} \overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q} \cdot \left\{ [T_{e,p}(t) - T_{s,p}(t)] - [T_{e,p_{ee}}(t) - T_{s,p_{ee}}(t)] \right\} - \dot{Q}_{Q,F}(t) - \\ [-\dot{Q}_{Q,F_{ee}}(t)] + \dot{Q}_Q(t) - \dot{Q}_{Q_{ee}}(t) = \overline{\rho_Q} \cdot V_Q \cdot \overline{c_Q} \frac{dT_{s,p}}{dt} \\ \overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q} \cdot [T_{e,p}^*(t) - T_{s,p}^*(t)] - \dot{Q}_{Q,F}^*(t) + \dot{Q}_Q^*(t) = \overline{\rho_Q} \cdot V_Q \cdot \overline{c_Q} \frac{dT_{s,p}^*}{dt} \end{aligned} \quad (15)$$

Dividindo-se a equação (3) pelo termo  $\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q}$ , tem-se que:

$$T_{e,p}^*(t) - T_{s,p}^*(t) \frac{-\dot{Q}_{Q,F}^*(t) + \dot{Q}_Q^*(t)}{\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q}} = \frac{V_Q}{\overline{F_Q}} \frac{dT_{s,p}^*}{dt} \quad (16)$$

Como:

$$\frac{V_Q}{\overline{F_Q}} = \frac{m^3}{m^3/h} = h = T_Q \quad (17)$$

Sendo:

- $T_Q$ , o tempo do processo, relativo ao comportamento dinâmico da temperatura na região quente.

Substituindo essa nova variável na equação (16):

$$T_{e,p}^*(t) - T_{s,p}^*(t) \frac{-\dot{Q}_{Q,F}^*(t) + \dot{Q}_Q^*(t)}{\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q}} = T_Q \frac{dT_{s,p}^*}{dt} \quad (18)$$

Reorganizando:

$$T_Q \frac{dT_{s,p}^*}{dt} + T_{s,p}^*(t) = T_{e,p}^*(t) \frac{-\dot{Q}_{Q,F}^*(t) + \dot{Q}_Q^*(t)}{\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q}} \quad (19)$$

Assumindo-se que  $\dot{Q}_{Q,F}^*$  e  $\dot{Q}_Q^*$  apresentam valores nulos (porque):

$$T_Q \frac{dT_{s,p}^*}{dt} + T_{s,p}^*(t) = T_{e,p}^*(t) \quad (20)$$

Observa-se que dessa forma as temperaturas de entrada e saída, referentes ao fluido quente, estão relacionados diretamente. Dessa maneira, aplicando-se a Transformada de Laplace em ambos os lados da equação (20):

$$T_Q \cdot s \cdot T_{s,p}^*(s) + T_{s,p}^*(s) = T_{e,p}^*(s) \quad (21)$$

Colocando  $T_{s,p}^*(s)$  em evidência:

$$T_{s,p}^*(s)(T_Q \cdot s + 1) = T_{e,p}^*(s) \quad (22)$$

Sabendo-se que uma função de transferência, é uma metodologia adotada para se representar plantas industriais e que, seus sinais podem ser descritos tanto na forma de variáveis contínuas ou discretas e, por funções de transferência por meio de transformadas de Laplace (BOJORGE, 2013). A partir da fórmula (22), pode-se relacionar um cociente, a uma resposta ( $Y(s)$ ) e a uma entrada ( $U(s)$ ), denominada função de transferência, que é, geralmente caracterizada por:

$$G(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} \quad (23)$$

Sendo:

- $G(s)$  , é a função de transferência;
- $Y(s)$  , é a função referente à resposta ao sistema;
- $U(s)$  , é a função referente ao sinal de entrada.

Visto que a função de entrada, para o caso em estudo, é  $T_{e,p}^*(s)$ , a função de saída é dada por  $T_{s,p}^*(s)$ , então, têm-se que a função de transferência é representada por  $(T_Q \cdot s + 1)$ .

Assim, podemos denotá-la:

$$\frac{T_{s,p}^*(s)}{T_{e,p}^*(s)} = \frac{1}{(T_Q \cdot s + 1)} \quad (24)$$

Considerando-se que  $T_{e,p}^*(t)$  e  $\dot{Q}_Q^*(t)$  sejam equivalentes a 0, com base na equação (19) obtem-se:

$$T_Q \frac{dT_{s,p}^*}{dt} + T_{s,p}^*(t) = \frac{-\dot{Q}_{Q,F}^*(t)}{\rho_Q \cdot \bar{F}_Q \cdot c_Q} \quad (25)$$

Então, aplicando-se a Transformada de Laplace:

$$T_Q \cdot s \cdot T_{s,p}^*(s) + T_{s,p}^*(s) = \frac{-\dot{Q}_{Q,F}^*(s)}{\overline{\rho_Q \cdot F_Q \cdot c_Q}} \quad (26)$$

Reorganizando os termos:

$$T_{s,p}^*(s)(T_Q \cdot s + 1) = \frac{-\dot{Q}_{Q,F}^*(s)}{\overline{\rho_Q \cdot F_Q \cdot c_Q}} \quad (27)$$

A partir da equação (27), pode-se reorganizá-la de modo que, obtenha-se uma segunda função de transferência. Desse modo, a equação pode ser relacionada em termos da temperatura de saída  $T_{s,p}^*(s)$  do trocador e, da entrada de calor  $\dot{Q}_{Q,F}^*(s)$ , considerada:

$$-\frac{1}{\overline{\rho_Q \cdot F_Q \cdot c_Q}(T_Q \cdot s + 1)} = \frac{T_{s,p}^*(s)}{\dot{Q}_{Q,F}^*(s)} \quad (28)$$

Ou ainda:

$$\frac{T_{s,p}^*(s)}{\dot{Q}_{Q,F}^*(s)} = -\frac{(\overline{\rho_Q \cdot F_Q \cdot c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} \quad (29)$$

Considerando-se, agora, que  $T_{e,p}^*(t)$  e  $\dot{Q}_{Q,F}^*(t)$  sejam iguais a 0, com base na equação (19), tem-se que:

$$T_Q \frac{dT_{s,p}^*}{dt} + T_{s,p}^*(t) = \frac{\dot{Q}_Q^*(t)}{\overline{\rho_Q \cdot F_Q \cdot c_Q}} \quad (30)$$

A próxima etapa é aplicar a Transformada de Laplace na equação (30):

$$T_Q \cdot s \cdot T_{s,p}^*(s) + T_{s,p}^*(s) = \frac{\dot{Q}_Q^*(s)}{\overline{\rho_Q \cdot F_Q \cdot c_Q}} \quad (31)$$

Pode-se então, reorganizá-la:

$$T_{s,p}^*(s)(T_Q \cdot s + 1) = \frac{\dot{Q}_Q^*(s)}{\overline{\rho_Q \cdot F_Q \cdot c_Q}} \quad (32)$$

A equação anterior é descrita em termos da temperatura de resposta  $T^*_{s,p}(s)$  e do calor fornecido para o trocador  $\dot{Q}^*_q(s)$ . Assim, reescrevendo-a nos padrões de uma função de transferência:

$$\frac{T^*_{s,p}(s)}{\dot{Q}^*_q(s)} = \frac{(\overline{\rho}_Q \cdot \overline{F}_Q \cdot \overline{c}_Q)^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} \quad (33)$$

Após a modelagem das funções de transferência, caracterizadas em (24), (29) e (33), pode-se, pelo princípio da superposição, associá-las utilizando diagrama de blocos:

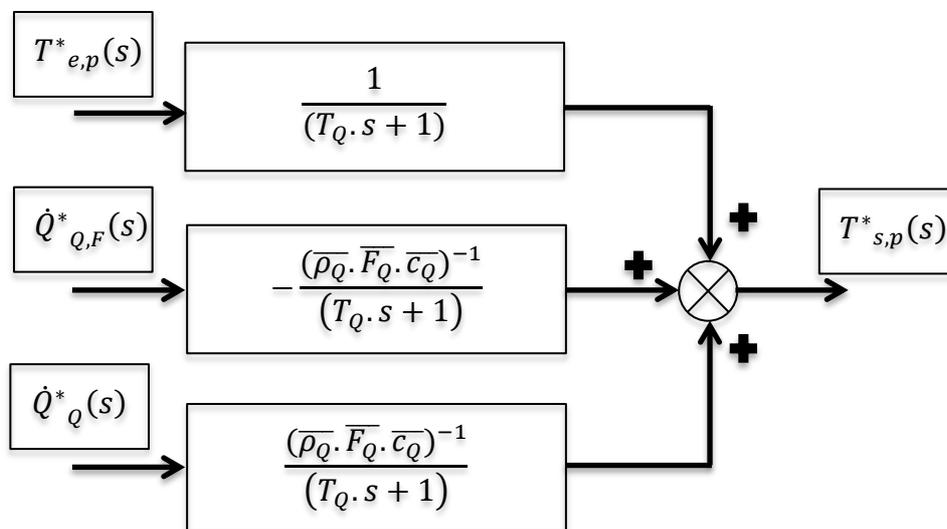


Figura 7.2: Diagrama de Blocos I

Para modelar-se a equação matemática que representa a troca térmica entre as placas, considera-se a figura 7.3.

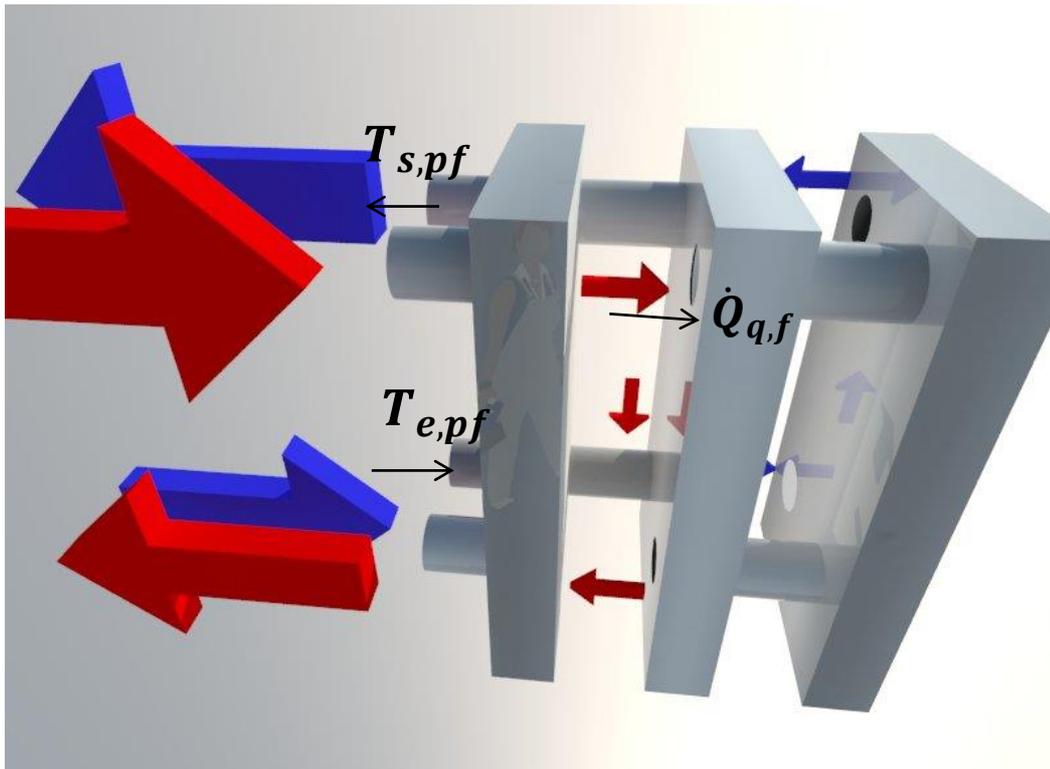


Figura 7.3: Fluxo de calor que escapa pela porção quente

A fórmula que apresenta o balanço global, à partir da determinação do volume de controle ilustrado na figura 7.3, é dada por:

$$\bar{\rho}_F \cdot \bar{F}_F \cdot \bar{c}_F \cdot [T_{e,pf}(t) - T_{s,pf}(t)] + \dot{Q}_{Q,F}(t) = \bar{\rho}_F \cdot V_F \cdot \bar{c}_F \frac{dT_{s,pf}}{dt} \quad (34)$$

Sendo :

- $\rho_F$  , a densidade do fluido de natureza fria que flui, dada em  $\text{Kg}/\text{m}^3$ ;
- $F_F$  , a vazão do fluido frio, dada em  $\text{m}^3/\text{h}$ ;
- $c_F$  , o calor específico do fluido frio que flui no lado frio, dado em  $\text{kcal}/\text{Kg} \cdot ^\circ\text{C}$ ;
- $T_{e,pf}$  , a temperatura de entrada do fluido frio nas placas, dada em  $^\circ\text{C}$ ;
- $T_{s,pf}$  , a temperatura de saída do fluido frio nas placas, dada em  $^\circ\text{C}$ ;
- $V_F$  , volume de líquido ocupado pelo fluido frio, dado em  $\text{m}^3$ .

Considerando-se a premissa de que se encontra em estado estacionário, ou seja:

$$\bar{\rho}_F \cdot V_F \cdot \bar{c}_F \frac{dT_{s,pf}}{dt} = 0 \quad (35)$$

Então:

$$\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F} \cdot [T_{e,pf_{ee}}(t) - T_{s,pf_{ee}}(t)] + \dot{Q}_{Q,F_{ee}}(t) = 0 \quad (36)$$

Sendo:

- $T_{e,pf_{ee}}$ , a temperatura de entrada do fluido frio nas placas em estado estacionário, dada em °C;
- $T_{s,pf_{ee}}$ , a temperatura de saída do fluido frio nas placas em estado estacionário, dada em °C;

Realizando-se a metodologia de VARIÁVEIS DESVIO, realizando dessa forma a subtração da equação (34) pela equação (36):

$$\begin{aligned} \overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F} \cdot [T_{e,pf}(t) - T_{s,pf}(t)] - \left\{ \overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F} \cdot [T_{e,pf_{ee}}(t) - T_{s,pf_{ee}}(t)] \right\} \\ + \dot{Q}_{Q,F}(t) - \dot{Q}_{Q,F_{ee}}(t) = \overline{\rho_F} \cdot V_F \cdot \overline{c_F} \frac{dT_{s,pf}}{dt} \end{aligned} \quad (37)$$

Assim:

$$\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F} \cdot [T^*_{e,pf}(t) - T^*_{s,pf}(t)] + \dot{Q}^*_{Q,F}(t) = \overline{\rho_F} \cdot V_F \cdot \overline{c_F} \frac{dT^*_{s,pf}}{dt} \quad (38)$$

Reorganizando o resultado obtido em (38), divise-se todos os termos por  $\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F}$ :

$$[T^*_{e,pf}(t) - T^*_{s,pf}(t)] + \frac{\dot{Q}^*_{Q,F}(t)}{\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F}} = \frac{V_F}{\overline{F_F}} \cdot \frac{dT^*_{s,pf}}{dt} \quad (39)$$

Sabendo-se que:

$$\frac{V_F}{\overline{F_F}} = \frac{m^3}{m^3/h} = h = T_F \quad (40)$$

Sendo:

- $T_F$ , o tempo do processo, relativo ao comportamento dinâmico da temperatura na região fria.

Substituindo a variável na equação (39):

$$[T^*_{e,pf}(t) - T^*_{s,pf}(t)] + \frac{\dot{Q}^*_{Q,F}(t)}{\rho_F \cdot \bar{F}_F \cdot \bar{C}_F} = T_F \cdot \frac{dT^*_{s,pf}}{dt} \quad (41)$$

Reorganizando-a:

$$T_F \cdot \frac{dT^*_{s,pf}}{dt} + T^*_{s,pf}(t) = \frac{\dot{Q}^*_{Q,F}(t)}{\rho_F \cdot \bar{F}_F \cdot \bar{C}_F} + T^*_{e,pf}(t) \quad (42)$$

Assumindo-se que o calor trocado entre as placas -  $\dot{Q}^*_{Q,F}$  - apresenta valor nulo, obtém-se a seguinte função:

$$T_F \cdot \frac{dT^*_{s,pf}}{dt} + T^*_{s,pf}(t) = T^*_{e,pf}(t) \quad (43)$$

Aplica-se a Transformada de Laplace, obtendo-se assim uma função no domínio da frequência, ou seja, em função da variável  $s$ :

$$T_F \cdot s \cdot T^*_{s,pf}(s) + T^*_{s,pf}(s) = T^*_{e,pf}(s) \quad (44)$$

Reorganizando os termos:

$$T^*_{e,pf}(s) = T^*_{s,pf}(s)(1 + T_F \cdot s) \quad (45)$$

Afim de obter-se uma equação de transferência que relacione o sinal de saída com o sinal de entrada, pode-se reescrever a fórmula (45) da seguinte forma:

$$\frac{T^*_{s,pf}(s)}{T^*_{e,pf}(s)} = \frac{1}{(1 + T_F \cdot s)} \quad (46)$$

Tomando-se como referência a equação (42) e, assumindo que a temperatura de entrada referente ao fluido frio  $T^*_{e,pf}(t)$  é igual a zero:

$$T_F \cdot \frac{dT^*_{s,pf}}{dt} + T^*_{s,pf}(t) = \frac{\dot{Q}^*_{Q,F}(t)}{\rho_F \cdot \bar{F}_F \cdot \bar{C}_F} \quad (47)$$

À partir da equação encontrada em (47), faz-se a Transformada de Laplace:

$$T_F \cdot s \cdot T_{s,pf}^*(s) + T_{s,pf}^*(s) = \frac{\dot{Q}_{Q,F}^*(s)}{\overline{\rho_F \cdot F_F \cdot c_F}} \quad (48)$$

Reorganizando:

$$T_{s,pf}^*(s)(T_F \cdot s + 1) = \frac{\dot{Q}_{Q,F}^*(s)}{\overline{\rho_F \cdot F_F \cdot c_F}} \quad (49)$$

Reordenando-se a fórmula obtida em (49), de maneira que se possa obter uma função de transferência em que se relaciona a saída  $T_{s,pf}^*(s)$  com a entrada  $\dot{Q}_{Q,F}^*(s)$ :

$$\frac{T_{s,pf}^*(s)}{\dot{Q}_{Q,F}^*(s)} = \frac{(\overline{\rho_F \cdot F_F \cdot c_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} \quad (50)$$

Assim, pelo método da Superposição, pode-se reorganizar as equações encontradas (46) e (50), em diagrama de blocos:

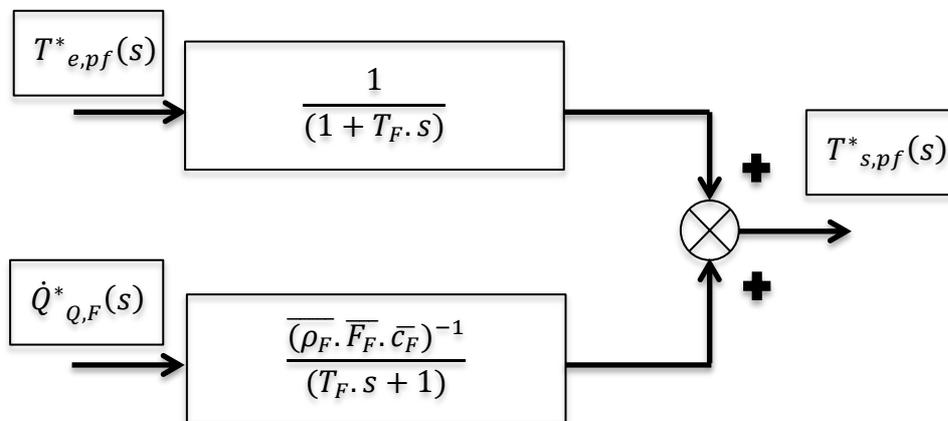


Figura 7.4: Diagrama de Blocos II

Dando continuidade a modelagem matemática do sistema, utiliza-se o método de Kern, apresentado no Capítulo 6, para representar a troca de calor em um sistema considerando-se o deslocamento dos fluidos. Visto que ambos os trocadores estudados apresentam fluidez de contra-corrente (*counter-flow*) em que o sentido da entrada e saída do fluido quente denota sentido oposto à entrada e à saída do fluido frio, o método adotado utilizado foi o método da Média Logarítmica das Diferenças de Temperatura (MLDT), ou ainda, *Log Mean Temperature Difference* (LMTD) para representar a porção de calor trocado por unidade de tempo entre a placa quente e a placa fria.

$$\dot{Q} = U_D \cdot A_e \cdot (MLTD)$$

Onde:

$\dot{Q}$  – calor trocado por unidade de tempo entre a placa quente e a placa fria;

$U_D$  – coeficiente global de troca térmica;

$A_e$  – área de trocatérmica;

$MLTD$  – diferença média logarítmica entre as temperaturas do fluido, que no caso de fluidos que se deslocam em sentido contra-corrente, é dado pela diferença entre a variação da temperatura máxima e, a variação da temperatura mínima, dividido pelo logaritmo da razão entre a variação da temperatura máxima e, a variação da temperatura mínima.

Sendo:

$$MLDT = \frac{\Delta T_{m\acute{a}x} - \Delta T_{m\acute{i}n}}{\ln\left(\frac{\Delta T_{m\acute{a}x}}{\Delta T_{m\acute{i}n}}\right)}$$

Desse modo, agrupando-se os resultados obtidos até o momento em um diagrama de blocos:

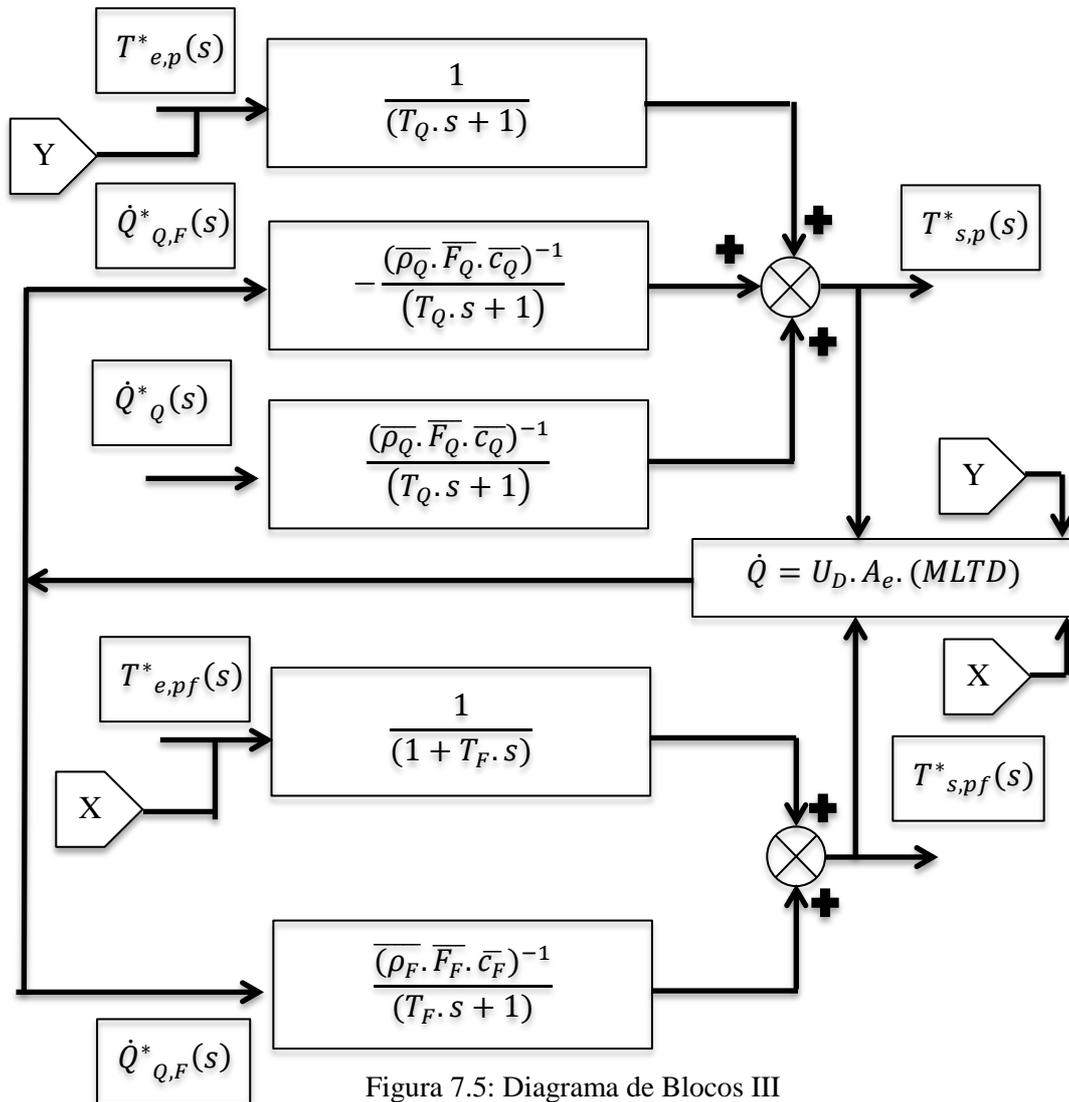


Figura 7.5: Diagrama de Blocos III

Tem-se assim representado o módulo  $\dot{Q}$ , que utiliza os valores das temperaturas de saída, juntamente com as temperaturas de entrada, para realizar o cálculo do calor trocado por unidade de tempo.

### 6.3. Cálculo dos trocadores de calor

Os trocadores de calor apresentados no estudo, CB76-40H e APV SR26BS, apresentam similaridades de funcionamento. Nesse contexto, adotou-se o mesmo procedimento de cálculo para ambos.

#### 6.3.1. Cálculo do trocador de calor APV SR26BS

O permutador de calor APV SR26BS, como visto anteriormente possui canais que conduzem o fluido quente e canais que conduzem o fluido frio, sem que esses se misturem. Nesse sentido, a análise do processo pode ser realizada separando-os em lado quente e lado frio. A troca de calor ocorre da água para o soro.

### 6.3.1.1.Lado quente

#### 6.3.1.1.1. Primeira função

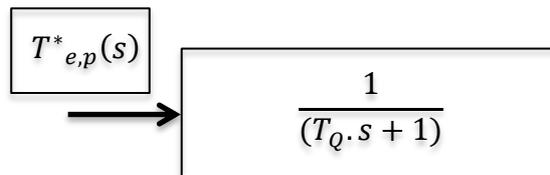


Figura 7.6: Diagrama de Blocos IV

Sabendo-se que a temperatura de entrada do líquido quente na placa é representada por  $T^*_{e,p}(s)$  e que,  $T_Q$  é o tempo do processo, relativo ao comportamento dinâmico da temperatura na região quente. Tem-se representado, na figura 7.6 que a equação que representa a equação de transferência:

$$\frac{1}{T_Q \cdot s + 1} \quad (51)$$

Visto que  $T_Q$  pode ser obtido à partir do volume do fluido quente armazenado ( $V_Q$ ), desconsiderando-se o volume ocupado pelas placas e o volume do líquido correspondente ao armazenamento de líquido frio e; da vazão no canal quente ( $F_Q$ ), tem-se que:

$$T_Q = \frac{V_Q}{F_Q} \quad (52)$$

Desse modo:

$$T_Q = \frac{\text{Área}_{placa} \cdot [\text{Largura}_{total} - (\text{Largura}_{placa} \cdot \text{Núm Placas}_{total}) - \text{Largura}_{frio}]}{F_Q}$$

$$T_Q = \frac{8,08[m^2] \cdot [0,144[m] - (0,0005[m] \cdot 49) - (0,00249[m] \cdot 24)]}{30000 \left[ \frac{L}{h} \right]}$$

$$T_Q = \frac{8,08 \cdot 0,05975 [m^3]}{30000 \left[\frac{L}{h}\right]} = \frac{482,78[L]}{30000 \left[\frac{L}{h}\right]} = 0,0160899h \cong 0,0161h$$

Sendo:  $T_Q$  o tempo em horas, do comportamento dinâmico da temperatura nas placas de temperatura elevada. Assim:

$$\frac{1}{T_Q \cdot s + 1} = \frac{1}{0,0161s + 1} \quad (53)$$

### 6.3.1.1.2. Segunda função

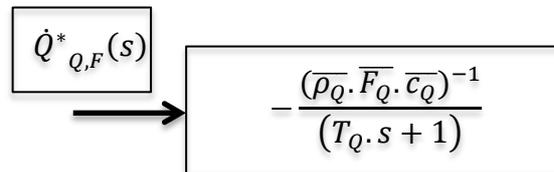


Figura 7.7: Diagrama de Blocos V

Para a entrada  $\dot{Q}^*_{Q,F}(s)$ , sendo esta o fluxo de calor da placa quente para a parede fria, tem-se que:

$$\begin{aligned} -\frac{(\bar{\rho}_Q \cdot \bar{F}_Q \cdot \bar{c}_Q)^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{-\left(0,972 \left[\frac{Kg}{L}\right] \cdot 30000 \left[\frac{L}{h}\right] \cdot 1,002 \left[\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}\right]\right)^{-1}}{0,0161s + 1} \\ -\frac{(\bar{\rho}_Q \cdot \bar{F}_Q \cdot \bar{c}_Q)^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{-\left(29218,32 \left[\frac{Kcal}{h^{\circ}C}\right]\right)^{-1}}{0,0161s + 1} \\ -\frac{(\bar{\rho}_Q \cdot \bar{F}_Q \cdot \bar{c}_Q)^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{-0,0000342251 \left[\frac{h^{\circ}C}{Kcal}\right]}{0,0161s + 1} \end{aligned} \quad (54)$$

### 6.3.1.1.3. Terceira função

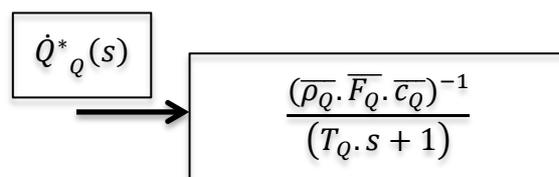


Figura 7.8: Diagrama de Blocos VI

Sendo a entrada, na terceira função, dada por  $\dot{Q}_Q$ , sendo este o fluxo de calor da água de vapor, tem-se que:

$$\begin{aligned} \frac{(\overline{\rho}_Q \cdot \overline{F}_Q \cdot \overline{c}_Q)^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{\left(0,972 \left[\frac{Kg}{L}\right] \cdot 30000 \left[\frac{L}{h}\right] \cdot 1,002 \left[\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}\right]\right)^{-1}}{0,0161s + 1} \\ \frac{(\overline{\rho}_Q \cdot \overline{F}_Q \cdot \overline{c}_Q)^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{\left(29218,32 \left[\frac{Kcal}{h^{\circ}C}\right]\right)^{-1}}{0,0161s + 1} \\ \frac{(\overline{\rho}_Q \cdot \overline{F}_Q \cdot \overline{c}_Q)^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{0,0000342251 \left[\frac{h^{\circ}C}{Kcal}\right]}{0,0161s + 1} \end{aligned} \quad (55)$$

### 6.3.1.2.Lado frio

O lado frio corresponde aos canais em que o líquido frio flui no trocador de calor.

#### 6.3.1.2.1. Primeira função

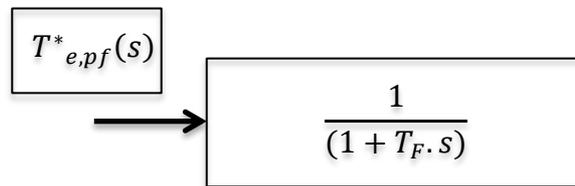


Figura 7.9: Diagrama de Blocos VII

Visto que  $T_{e,pf}$  é a temperatura de entrada do fluido frio nas placas, tem-se se que a função que a relaciona é dada por:

$$\frac{1}{(1 + T_F \cdot s)} \quad (56)$$

Sabendo-se que  $T_F$  é o tempo do processo, relativo ao comportamento dinâmico da temperatura na região fria e, que este pode ser encontrado fazendo-se:

$$T_F = \frac{V_F}{F_F} \quad (57)$$

Como  $V_F$  corresponde ao volume de líquido ocupado pelo fluido frio, e  $F_F$  sua vazão. Com base nos dados disponibilizados:

$$T_F = \frac{0,00249[m] \cdot 24 \cdot 8,08[m^2]}{20000 \left[\frac{L}{h}\right]} = \frac{0,4828608[m^3]}{20000 \left[\frac{L}{h}\right]}$$

$$T_F = \frac{482,8608 [L]}{20000 \left[\frac{L}{h}\right]}$$

$$T_F = 0,02414304[h]$$

Desse modo:

$$\frac{1}{(1 + T_F \cdot s)} = \frac{1}{1 + 0,02414304[h]s} \quad (58)$$

### 6.3.1.2.2. Segunda função

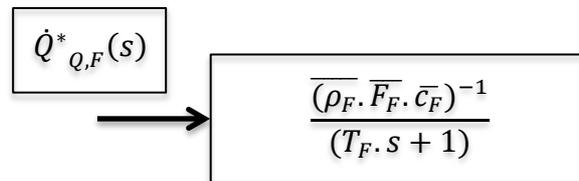


Figura 7.10: Diagrama de Blocos VIII

Sendo  $\dot{Q}_{Q,F}$  o fluxo de calor da placa quente para a parede fria, a função que correspondente é dada por:

$$\frac{(\overline{\rho_F \cdot F_F \cdot \bar{c}_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} = \frac{\left(1,000 \left[\frac{Kg}{L}\right] \cdot 20000 \left[\frac{L}{h}\right] \cdot 0,971 \left[\frac{Kcal}{Kg^{\circ}C}\right]\right)^{-1}}{0,02414304s[h] + 1}$$

$$\frac{(\overline{\rho_F \cdot F_F \cdot \bar{c}_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} = \frac{\left(19420 \left[\frac{Kcal}{h^{\circ}C}\right]\right)^{-1}}{0,02414304s[h] + 1}$$

$$\frac{(\overline{\rho_F \cdot F_F \cdot \bar{c}_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} = \frac{\left(0,000051493306 \left[\frac{Kcal}{h^{\circ}C}\right]\right)^{-1}}{0,02414304s[h] + 1} \quad (59)$$

Tabela 7.1: Tabela com configurações estruturais e de capacidade

Parâmetro	Valor	Unidade
Área	8.08	m <sup>2</sup>
Largura das Placas + Espaço	0.144	m
Largura da Placa unitária	0.0005	m
Volume total	1,16352	m <sup>3</sup>
Volume das Placas	0,19796	m <sup>3</sup>
Volume total – Volume das Placas	0,96556	m <sup>3</sup>
Volume da região quente	0,48278	m <sup>3</sup>
Volume da região fria	0,24139	m <sup>3</sup>

Número total de Placas                      49

### 6.3.2. Cálculo do trocador de calor CB76-40H

O trocador de calor brasado CB76-40H, da alfa laval, assim como o pasteurizador, realiza a troca de calor por meio de placas entre o líquido quente e frio em sentido contra-corrente. Diferentemente do trocador de calor APV SR26BS, a troca de calor ocorre de água para água. Embora haja características distintas, adotou-se a mesma modelagem matemática para o presente modelo.

#### 6.3.2.1.Lado quente

##### 6.3.2.1.1. Primeira função

Equivalente ao pasteurizador, a equação utilizada, tem como entrada  $T_{e,p}^*(s)$  e é descrita por:

$$\frac{1}{T_Q \cdot s + 1}$$

Sabe-se que:

$$T_Q = \frac{V_Q}{F_Q}$$

Não foi informado pelo fornecedor, o valor padrão assumido pela vazão volumétrica. No entanto, sabe-se que a vazão mássica total fornecida é de  $389,3 \text{ Kg/h}$ , que a densidade do vapor fornecido é de  $1,596 \text{ Kg/m}^3$  e, que o volume ocupado pelo fluido quente é de  $0,011515 \text{ m}^3$ . Nesse contexto, como:

$$D = \frac{m}{V} \quad (60)$$

Sendo:

- $D$  , a densidade, dada em  $\text{Kg/m}^3$  ;
- $m$  , a massa, dada em  $\text{Kg}$ ;
- $V$  , o volume, dado em  $\text{m}^3$ .

Pode-se declarar que:

$$\begin{aligned} m &= D \cdot V \\ m &= 1,596 \left[ \frac{\text{Kg}}{\text{m}^3} \right] \cdot 0,011515 [\text{m}^3] \\ m &= 0,01837794 [\text{Kg}] \end{aligned}$$

Como a massa que flui pelo sistema é de  $389,9 \text{ Kg}$  em  $1 \text{ h}$ , para se verificar em quanto tempo ocorre a passagem de  $0,01837794 \text{ Kg}$ , faz-se:

$$\begin{aligned} &389,9 \text{ Kg} - 1 \text{ h} \\ &0,01837794 \text{ Kg} - x \text{ h} \\ x &= \frac{0,01837794 [\text{Kg}]}{389,9 [\text{Kg}]} [\text{h}] \\ x &= 0,00004721 [\text{h}] \end{aligned}$$

Sendo a vazão volumétrica dada por:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (61)$$

Sendo:

- $Q$  , a vazão volumétrica, dada em  $m^3/h$  ;
- $t$  , o tempo, dado em  $h$ .

Assim:

$$Q = \frac{0,011515 [m^3]}{0,00004721 [h]} = 243,96 [m^3/h]$$

Visto que:

$$T_Q = \frac{V_Q}{F_Q}$$

Assim, pode-se resolver que:

$$T_Q = \frac{0,011515[m^3]}{243,96 [m^3/h]} = 0,00004721 [h]$$

Substituindo o valor encontrado na equação que apresenta a equação de transferência:

$$\frac{1}{T_Q \cdot s + 1} = \frac{1}{0,00004721 [h]s + 1} \quad (62)$$

### 6.3.2.1.2. Segunda função

Tendo o fluxo de calor da placa quente para a parede fria ( $\dot{Q}^*_{Q,F}(s)$ ) como entrada:

$$\begin{aligned} -\frac{(\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{-\left(1,596 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \cdot 389,3 \left[\frac{Kg}{h}\right] \cdot 2,24 \left[\frac{KJ}{Kg \cdot K}\right]\right)^{-1}}{0,00004721 [h]s + 1} \\ -\frac{(\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{-\left(1,596 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \cdot 243,92 \left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot 0,535015 \left[\frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}\right]\right)^{-1}}{0,00004721 [h]s + 1} \\ -\frac{(\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{-\left(208,279 \left[\frac{Kcal}{h^\circ C}\right]\right)^{-1}}{0,00004721 [h]s + 1} \\ -\frac{(\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{-0,00480 \left[\frac{h^\circ C}{Kcal}\right]}{0,00004721 [h]s + 1} \end{aligned} \quad (63)$$

### 6.3.2.1.3. Terceira Função

A terceira função modelada, na qual tem-se como entrada o fluxo de calor de vapor, é dada por:

$$\begin{aligned} \frac{(\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{\left(1,596 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \cdot 389,3 \left[\frac{Kg}{h}\right] \cdot 2,24 \left[\frac{KJ}{Kg \cdot K}\right]\right)^{-1}}{0,0161s + 1} \\ \frac{(\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{\left(1,596 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \cdot 243,92 \left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot 0,535015 \left[\frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}\right]\right)^{-1}}{0,00004721 [h]s + 1} \\ \frac{(\overline{\rho_Q} \cdot \overline{F_Q} \cdot \overline{c_Q})^{-1}}{(T_Q \cdot s + 1)} &= \frac{0,00480 \left[\frac{h^\circ C}{Kcal}\right]}{0,00004721 [h]s + 1} \end{aligned} \quad (64)$$

### 6.3.2.2.Lado frio

#### 6.3.2.2.1. Primeira Função

A equação utilizada, que tem como entrada  $T^*_{e,pf}$ , é descrita por:

$$\frac{1}{T_F \cdot s + 1}$$

Sendo:

$$T_F = \frac{V_F}{F_F}$$

Verificou-se que não foi informado, o valor padrão assumido pela vazão volumétrica. Sabendo-se que a vazão mássica total fornecida é de 30.000 Kg/h, que a densidade do produto fornecido é de 971,6 Kg/m<sup>3</sup> e, que o volume ocupado pelo fluido quente é de 0,011515 m<sup>3</sup>. Assim:

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

$$m = 971,6 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \cdot 0,011515 [m^3]$$

$$m = 11,187974 [Kg]$$

Como a massa que flui pelo sistema é de 30.000 Kg em 1 h, para se verificar em quanto tempo ocorre a passagem de 11,187974 Kg, faz-se:

$$\begin{aligned} & 30.000 \text{ Kg} - 1 \text{ h} \\ & 11,187974 \text{ Kg} - x \text{ h} \\ x &= \frac{11,187974 \text{ [Kg]}}{30.000 \text{ [Kg]}} [h] \\ x &= 0,0003729 [h] \end{aligned}$$

Sendo a vazão volumétrica dada por:

$$Q = \frac{V}{t}$$

Assim:

$$Q = \frac{0,011515 [m^3]}{0,0003729 [h]} = 30,8796 [m^3/h]$$

Visto que:

$$T_F = \frac{V_F}{F_F}$$

Assim, pode-se resolver que:

$$T_Q = \frac{0,011515 [m^3]}{30,8796 [m^3/h]} = 0,0003729 [h]$$

Substituindo o valor encontrado na equação que apresenta a equação de transferência:

$$\frac{1}{T_Q \cdot s + 1} = \frac{1}{0,0003729 [h]s + 1} \quad (65)$$

#### 6.3.2.2.2. Segunda Função

Como  $\dot{Q}_{Q,F}$  representa o fluxo de calor da placa quente para a parede fria, a função correspondente é dada por:

$$\frac{(\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} = \frac{\left(971,6 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \cdot 30000 \left[\frac{Kg}{h}\right] \cdot 4,18 \left[\frac{KJ}{Kg \cdot K}\right]\right)^{-1}}{0,0003729 [h]s + 1}$$

$$\frac{(\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} = \frac{\left(971,6 \left[\frac{Kg}{m^3}\right] \cdot 30,8769 \left[\frac{m^3}{h}\right] \cdot 0,998376 \left[\frac{Kcal}{Kg \cdot ^\circ C}\right]\right)^{-1}}{0,0003729 [h]s + 1}$$

$$\frac{(\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} = \frac{\left(29951,28 \left[\frac{Kcal}{h^\circ C}\right]\right)^{-1}}{0,0003729 [h]s + 1}$$

$$\frac{(\overline{\rho_F} \cdot \overline{F_F} \cdot \overline{c_F})^{-1}}{(T_F \cdot s + 1)} = \frac{\left(0,000033389 \left[\frac{Kcal}{h^\circ C}\right]\right)^{-1}}{0,0003729 [h]s + 1} \quad (66)$$

## VII. SIMULAÇÃO DOS TROCADORES DE CALOR A PLACAS

Como visto anteriormente, foi utilizada uma abordagem simplificada, desconsiderando-se a perda de calor, supondo que as propriedades físicas e químicas não se alteram e, que o coeficiente global de troca térmica se mantenha inalterável durante o processo de cada trocador. Adicionalmente, considerou-se a uniformidade da distribuição pelos canais.

Realizada a modelagem matemática, sua transcrição fora processada pelo *Simulink* afim de avaliar o desempenho térmico modificando-se as variáveis PID do controlador utilizado.

Foram realizados inúmeros testes, verificando-se um resultado aproximado comparado ao resultado desejado.

### 7.1. Modelo no *Simulink*

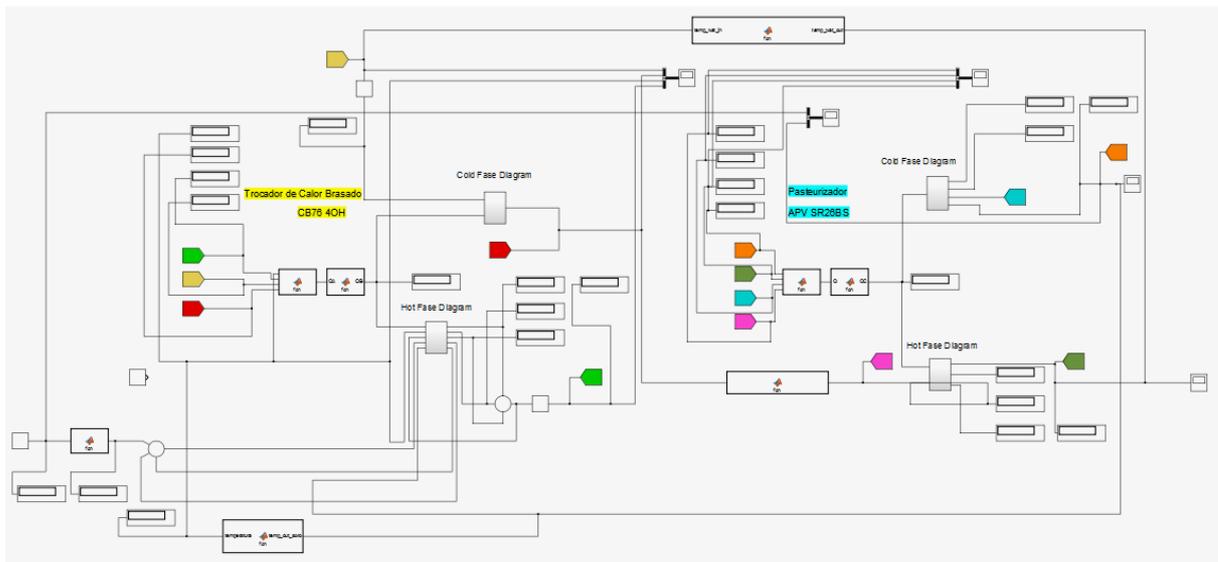


Figura8.1: Sistema de Trocadores de Calor no *Simulink*

A figura 8.1 apresenta o modelo simplificado geral dos trocadores de calor e como se relacionam junto com o restante dos componentes do sistema.

## **VIII. VALIDAÇÃO EXPERIMENTAL**

### **8.1.Introdução**

Os testes foram realizados utilizando-se os parâmetros e os valores no Capítulo 7, considerando-se a modelagem matemática simples do trocador de calor à placas (pasteurizador) cujo modelo é APV SR26BS e, do trocador de calor brasado CB76-40H, desconsiderando-se as perdas de calor para o ambiente e, o processo de resfriamento.

A primeira etapa deste processo procedeu-se por meio de simulações utilizando-se o *Simulink* afim de converter as variáveis envolvidas no processo, visto que apresentam dependência entre si.

A etapa seguinte consistiu em verificar se após a conversão, os sinais de entrada e saída correspondiam aos valores reais analisados.

Na terceira etapa variaram-se os parâmetros: Proporcional, Integral e Derivativo, afim de se verificar a semelhança com o processo real e, analisar qual os melhores valores a serem utilizados para cada um.

### **8.2.Conversão de variáveis**

No decorrer do processo de modelagem, cada dispositivo possui uma entrada e uma saída que deve se relacionar de modo a se comunicar com outra entrada ou saída do dispositivo seguinte. Essa conversão é necessária para que o valor mostrado pelo equipamento, como o termostato, possa fornecer a informação necessária para que o controlador possa receber os dados e para que possa permitir a atuação.

### **8.3.Estimação dos valores para os parâmetros PID**

Ao instalar os trocadores de calor, os parâmetros foram pré fixados sem a realização de estudos prévios pela equipe de montagem, composta por funcionários da empresa que forneceu o equipamento. Nesse contexto, os parâmetros escolhidos durante a instalação, na maioria das vezes, não atendem plenamente o que realmente se espera de um equipamento de elevado custo.

Quando o parâmetro não apresenta valores ideais, perde-se em termos da funcionalidade e eficiência máxima do equipamento, o que pode resultar em danos ao equipamento, frequente manutenção e consumo elevado de energia elétrica.

Para isso, é necessário que haja um estudo para que possa realizar simulações e testes afim de evitar gastos desnecessários. Visto que, em larga escala, como ocorre em uma indústria, apresenta um gasto significativo. E adicionalmente, validar os resultados encontrados.

Inúmeros testes foram realizados, variando-se os ganhos ( $K_p$ ,  $K_i$ ,  $k_d$ ) para avaliar o comportamento da saída.

## 8.4. Resultados

### 8.4.1. Resultados Coletados Utilizando Controle PI

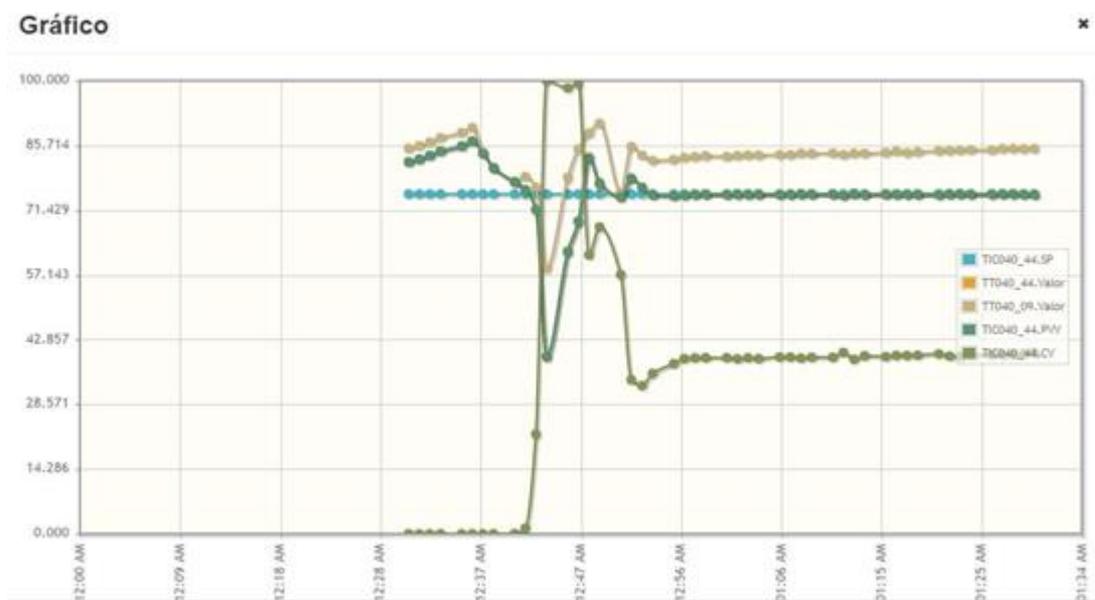


Figura 9.1: Resultado coletado da resposta utilizando o Controle PI

O gráfico 9.1 representa o comportamento dos dados reais processados pelo controlador no momento em que ocorre a recepção do soro de leite, à 00:42, no processo denominado Pasteurizador 3.

Nesse sistema pode-se verificar que o *Setpoint* foi definido em aproximadamente 75°C. No início da recepção do soro, pode-se observar que o controlador registrou a temperatura de aproximadamente 38°C. Ao constatar que a temperatura do mesmo está inferior ao *Setpoint*, a válvula do vapor se abriu em 100%, ocorrendo a troca de calor. À medida em que a

temperatura do produto se estabiliza, à 00:54, a válvula do vapor foi se fechando e se estabilizou em aproximadamente 39% de abertura.

Desse modo, a estabilização da temperatura do soro foi concluída em aproximadamente 12 minutos.

#### 8.4.2. Resultados simulados pelo *Simulink*

Tabela 9.1: Tabela de testes de parâmetros no *Simulink*

Série	APV SR26BS				CB76-40H				Parâmetros		
	Lado Quente		Lado Frio		Lado Quente		Lado Frio		$K_p$	$K_i$	$K_d$
	Entrada de Água	Saída de Água	Entrada do Produto	Saída do Produto	Entrada de Vapor	Saída de Vapor	Entrada de Água	Saída de Água			
<b>A</b>	82.11	77.88	50	75.13	133.3	130.2	76.3	82.11	5	1	0
<b>B</b>	82.11	73.89	50	80.13	133.3	130.2	76.3	82.11	5	2	1

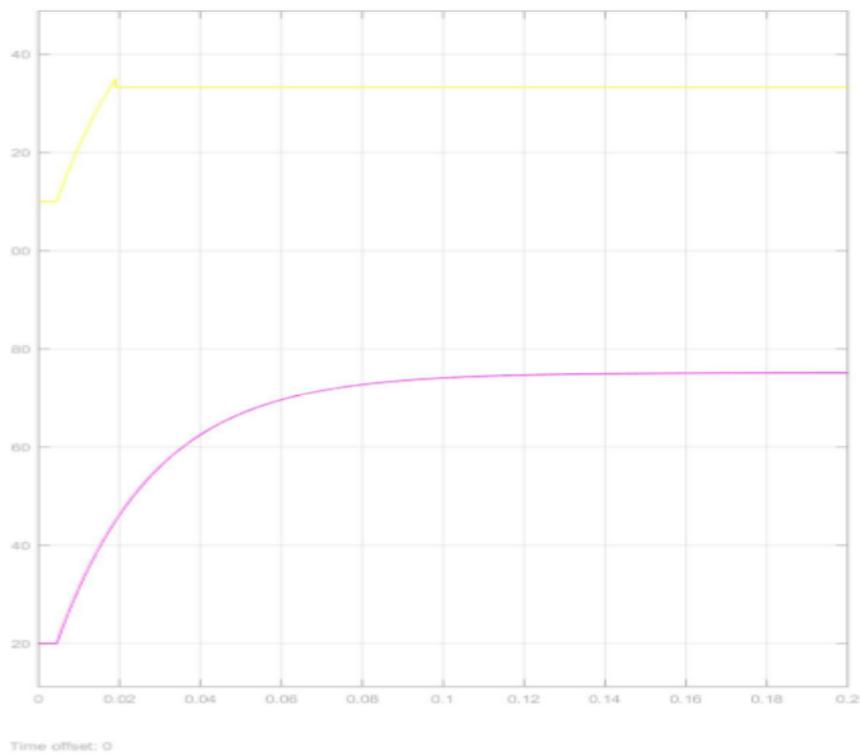


Figura 9.2: Teste no *Simulink* utilizando os parâmetros da série A

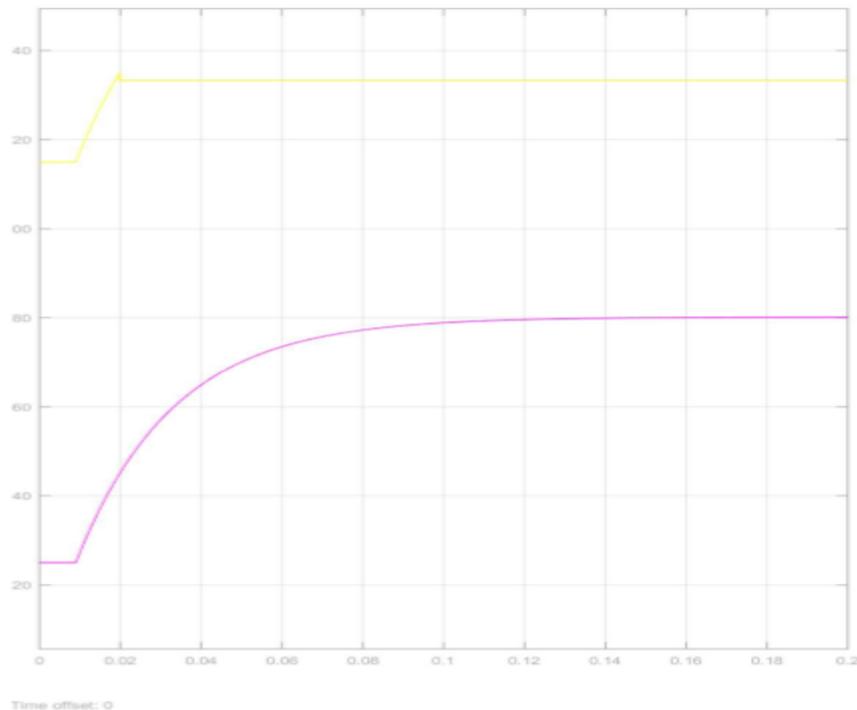


Figura 9.3: Teste no *Simulink* utilizando os parâmetros da série B

O primeiro gráfico, apresenta o comportamento das temperaturas da entrada e da saída, dos fluidos vapor e soro, respectivamente, do processo de troca de calor, utilizando-se os parâmetros da série A da tabela 9.1.

Sabendo-se que o *Setpoint* é de 75°C, o tempo gasto para alcançar esse resultado foi de 0,14 segundos. Embora possa representar um resultado de relevante qualidade, quanto ao tempo de acomodação, não representa a realidade.

Isso ocorreu pois o *Simulink* apresentou limitações quanto ao longo tempo de simulação gasto para testar os parâmetros PID. Sendo que, a simulação apresentou erros na tentativa de acelerar o processo e, cada 0,1 segundo de simulação representou aproximadamente 10 minutos do tempo real.

A figura 9.3 representa a simulação no *Simulink* da série B da tabela 9.1. Sendo, o *Setpoint* estabelecido em 75°C, observa-se que o resultado não atendeu à esse requisito.

#### 8.4.3. Resultados Coletados Utilizando Controle PID

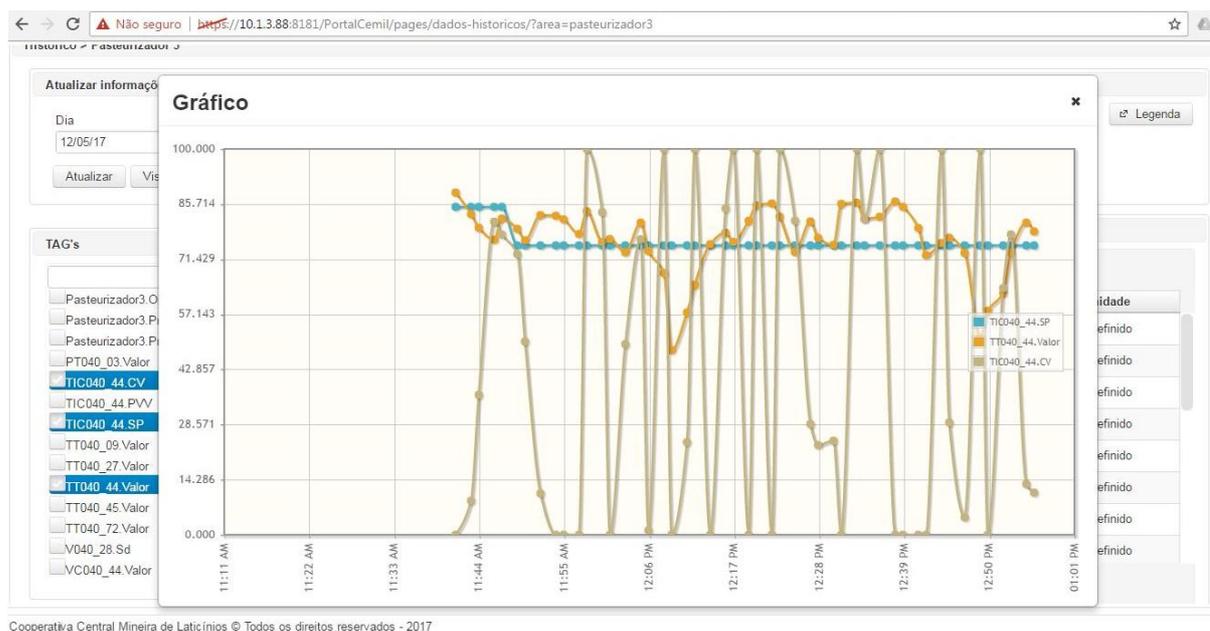


Figura 9.4: Teste real insatisfatório

O primeiro teste, realizado na indústria CEMIL, foi efetivado com base nos testes simulados no *Simulink*.

No momento de realizar o teste na empresa, foi constatado que não haveria recepção do soro cru durante o dia. Embora a água não tenha as mesmas especificidades do soro, a mesma foi utilizada para fins de se efetivar o teste.

Como observado na figura 9.4, para a primeira série de parâmetro selecionada, como retratada na tabela... tem-se que, entre 11:49 e 12:09, no período da manhã, deu-se início à recepção do produto. Nesse instante, o *Setpoint* está configurado em 75°C. No período em que esses parâmetros foram utilizados, nota-se uma variação constante nos resultados da temperatura na saída que variou em 35 unidades da medida, sendo a temperatura mínima 47°C a 82°C. Além disso, é possível perceber que a abertura da válvula sofreu bruscas alterações, abrindo e fechando inúmeras vezes de 100% à 0%. Com o decaimento inesperado da temperatura, decidiu-se que a troca dos parâmetros seria a melhor opção.

Entre 12:09 e 12:30, foi realizado o teste para a segunda série de parâmetros escolhido. Observa-se que nesse período, a válvula apresentou elevada variação de abertura e fechamento e que, embora o resultado tenha sido melhor que o encontrado anteriormente, ainda não atendeu às características desejadas.

Entre 12:30 e 12:41, uma terceira série fora adotada para realizar o teste. Assim, como observado no teste anterior, nesse experimento, o sistema indicou irregularidades na abertura e fechamento da válvula, provocando variações na temperatura de saída do produto.

Na última série de testes realizada, utilizando o método mencionado, ocorreu entre 12:41 e 13:00. Nos cinco primeiros minutos, acreditava-se que os resultados seriam considerados. Porém, nos minutos seguintes, houve um decréscimo indesejado da temperatura.

Os resultados encontrados foram indesejados pois, não apresentam melhora em termos do alcance do *Setpoint* com período inferior à 12 minutos e, não apresentam estabilidade.

Nesse contexto, um segundo método foi adotado.

Visto que os parâmetros já adotados pela empresa apresentavam bons resultados, decidiu-se variar alguns desses parâmetros, e assim analisar o efeito exercido pela troca.

Baseado nos conceitos básicos de controle, as seguintes decisões foram tomadas:

- Como anteriormente mencionado, como o resultado utilizado pela empresa já era considerado satisfatório, a primeira opção adotada foi de se manter o parâmetro de ganho proporcional em cinco;
- A segunda decisão tomada correspondeu à alteração do parâmetro integrativo. Sabendo-se que, ao aumentar a parcela integrativa ocasiona em uma resposta mais rápida, alcançando o *Setpoint* mais rapidamente; em uma resposta mais suscetível à instabilidade e à um *Overshoot* maior; decidiu-se por uma variação de 20% sobre o valor já utilizado, ou seja, com o valor de 1.2;
- A terceira, e última, decisão definida foi que, para compensar a possível instabilidade que poderia ocorrer devido ao aumento do parâmetro integrativo, a parcela derivativa deveria ser acrescida para 0.2. Desse modo, ao elevar a parte derivativa, o sistema torna-se mais lento e com menos *Overshoot*.

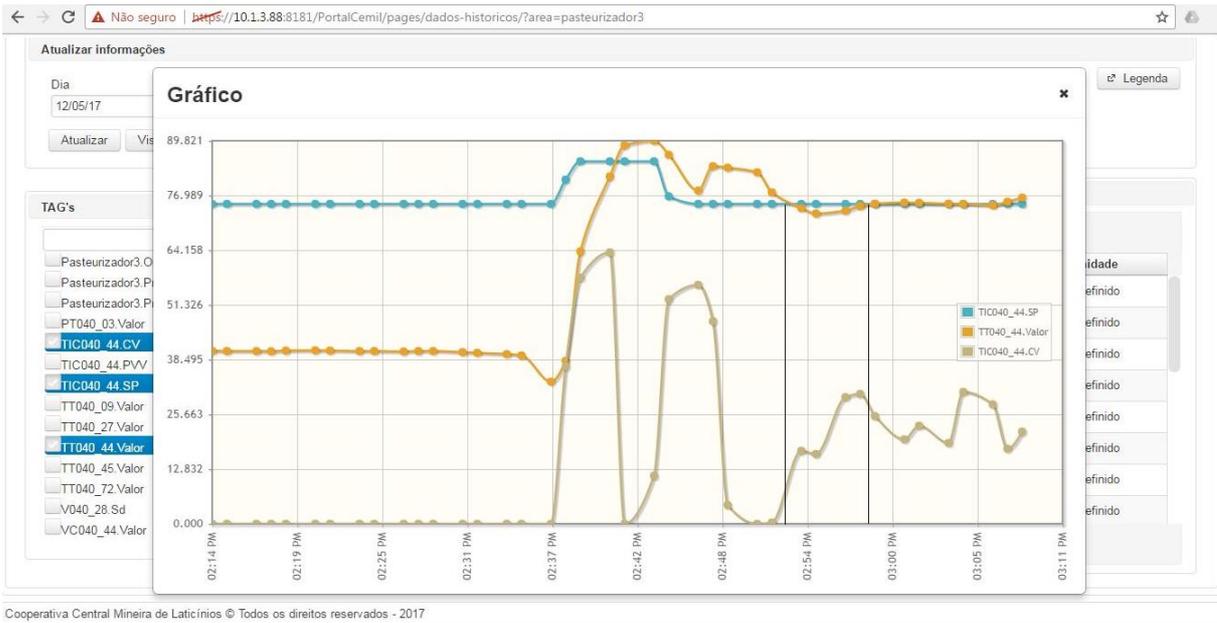


Figura 9.5: Teste real satisfatório



Figura 9.6: Dados coletados do teste satisfatório

A figura 9.5 apresenta o resultado gerado ao utilizar os parâmetros:

Tabela 9.1: Tabela dos parâmetros  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  encontrados

$K_p$	$K_i$	$K_d$
5	1.2	0.2

Após os processos de esterilização, resfriamento e estabilização, iniciou-se a circulação da água no sistema. Às 14:52, deu-se início à produção e ao processo de troca de calor. Às 14:58, houve o início do período de estabilidade do processo em que, a válvula de vapor apresentou aberturas e fechamentos intermediários para que o mesmo se mantivesse constante.

### **8.5.Discussão**

Embora a modelagem seja considerada simplificada, inúmeros problemas foram encontrados no decorrer da implementação e teste do mesmo.

O primeiro empecilho encontrado foi a obtenção dos dados, mínimos, necessários para a modelagem das equações.

Outro problema detectado foi a limitação do software em termos de tempo de processamento. O tempo da simulação foi elevado para cada teste, sendo necessário realizar modificações para que o sistema obtivesse uma resposta mais rápida em um menor intervalo de tempo. O que não condiz com o que ocorre na realidade.

Posteriormente, a temperatura de entrada do produto, teve que ser ajustada para que obtivesse o comportamento geral o mais próximo da realidade.

Devido à complexidade do sistema, ilustrado pela figura 3.1 no Capítulo 3, foram desconsiderados o processo de resfriamento e as perdas de calor.

Considerando as dificuldades listadas, os resultados coletados da simulação por *Simulink* foram considerados bons quando comparados com os resultados do processo real no Pasteurizador 3.

## **IX. CONCLUSÕES**

### **9.1.Considerações gerais**

No capítulo 4, verifica-se que o controle adotado foi o Controle Proporcional-Integral e, que embora apresente um resultado considerado satisfatório por ocorrer de fato a estabilização, o tempo transitório, no entanto, foi julgado indesejado.

Assim, após a realização dos estudos e testes, com base nos conteúdos lecionados em sala de aula, foi possível encontrar um resultado que atendesse o propósito do estudo.

### **9.2.Contribuições desta pesquisa**

A presente pesquisa foi considerada satisfatória sendo que, o resultado desejado foi alcançado. A estabilidade do *Setpoint* foi atingida em aproximadamente seis minutos, utilizando o Controle Proporcional-Integral-Derivativo, com variações suaves de abertura e fechamento da válvula de vapor.

O resultado corresponde à metade do tempo que era gasto ao se utilizar o Controle Proporcional-Integral.

Nesses termos, pode-se concluir que todas as proposições iniciais foram atendidas e respondidas:

- A modelagem atendeu o propósito de se simular o processo de troca de calor no processo de tratamento do soro cru afim de se eliminar os organismos indesejados;
- Verificou-se que o uso do Controle PID, utilizando-se todos os parâmetros apresentou uma solução melhor do que a que se utilizava antes da pesquisa.

### **9.3.Considerações finais**

Para pesquisas futuras sugere-se que seja modelado o processo de refrigeração. O presente trabalho não inclui tal processo visto que o tempo disponibilizado, assim como as informações atribuídas eram insuficientes.

Adicionalmente pode-se implantar a inclusão da válvula de vapor para que a mesma possa ser monitorada e testada.

Sugere-se uma abordagem diferente para a modelagem matemática para o sistema de troca de calor visto que, a metodologia apresentada nesse estudo é uma adaptação da modelagem de um sistema de troca de calor à tubos.

## REFERÊNCIAS

ALFA LAVAL. **Brazed Plate Heat Exchanger**. Disponível em: <[http://alfalaval.si/uploads/gia/public/document/103-giaflex\\_cb76\\_cbh76\\_sl.pdf](http://alfalaval.si/uploads/gia/public/document/103-giaflex_cb76_cbh76_sl.pdf)>. Acesso em 02 fev. 2017.

ALFA LAVAL. **CB**. [S.l.]: [20-?]. Disponível em: <<http://www.alfalaval.com.br/produtos/heat-transfer/plate-heat-exchangers/Brazed-plate-heat-exchangers/CB/>>. Acesso em: 01 abr. 2017.

ALLBIZ. **Trocadores de Calor Aletado**. Disponível em: <<http://joinville-sc.all.biz/trocadores-de-calor-aletado-g40110#.WQ6EW4WcFjo>>. Acesso em: 03 out. 2016.

ALLBIZ. **Trocador de Calor à Placas**. Disponível em: <<http://goiania-go.all.biz/trocador-de-calor-placas-g96242#.WifJFhsrLIU>>. Acesso em: 02 mar. 2017.

ALLEN-BRADLEY. **ControlLogix Programmable Automation Controllers**. Milwaukee: Rockwell Automation, 2014. Disponível em: <[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/1756-pp015\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/1756-pp015_-en-p.pdf)>. Acesso em: 01 nov. 2016.

ALMEIDA, Jorge Alberto. **Equipamentos de Troca Térmica**. [Rio Grande]: FURG, [20-?]. Disponível em: <<http://termo.furg.br/JAA/EqTer/CAP2.pdf>>. Acesso em: 30 out. 2016.

BRUSAMARELLO, Valner. **Introdução de Transdutores**. [Porto Alegre]: UFRGS, [20-?]. Disponível em: <<https://chasqueweb.ufrgs.br/~valner.brusamarello/eleinst/ufrgs6.pdf>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

CURZEL, Jeferson Luiz. **Atuadores Industriais**. [Joinville]: 2010. Disponível em: <<http://www.joinville.ifsc.edu.br/~jlcurzel/CLP/2%20-%20Atuadores%20Industriais/ATUADORES%20INDUSTRIAIS.pdf>>. Acesso em: 10 out. 2016.

ESSEL. **Modelos de Sistemas Dinâmicos**. [S.l.]: 2016. Disponível em: <<http://essel.com.br/cursos/material/05/scap11.pdf>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

FERNANDES, Flávia. **Fundamentos Teóricos de Trocadores de Calor**. Disponível em: <<http://docslide.com.br/documents/fundamentos-teoricos-de-trocadores-de-calor.html>>. Acesso em: 02 fev. 2017.

GOMES, Maria Helena Rodrigues. **Apostila de Mecânica dos Fluidos**. Juiz de Fora: [s.n.], 2012. Disponível em: <<http://www.ufjf.br/engsanitariaeambiental/files/2012/09/Apostila-de-Mecânica-dos-Fluidos.pdf>>. Acesso em: 19 dez. 2016.

INANOV, V. L. **Heat Exchangers**. [S.l.]: EOLSS, 2010. Disponível em: <<https://www.eolss.net/Sample-Chapters/C08/E3-11-04-10.pdf>>. Acesso em: 10 jan. 2017.

MAHAN'S THERMAL PRODUCTS. **The Evolution of Heat Exchangers**. [S.l.]: 2016. Disponível em: <<http://mahans.com/the-evolution-of-heat-exchangers/>>. Acesso em: 13 mar. 2017.

MARTÍNEZ, Isidoro. **Heat Exchangers**. [Madrid]: Universidad Politécnica de Madrid, 1995-2017. Disponível em: <<http://webserver.dmt.upm.es/~isidoro/bk3/c12/Heat%20exchangers.pdf>>. Acesso em: 05 out. 2016.

MAZZUCCO, Marcos Marcelino. **Introdução aos Balanços de Massa e Energia**. Tubarão: [s.n.], 2013. Disponível em: <[http://www.eqm.unisul.br/prof/marcos/cursos/bme/Introducao\\_Balancos\\_Massa\\_e\\_energia.pdf](http://www.eqm.unisul.br/prof/marcos/cursos/bme/Introducao_Balancos_Massa_e_energia.pdf)>. Acesso em: 10 mar. 2017.

NATIONAL INSTRUMENTS. **Explicando a Teoria PID**. [S.l.: s.n.], 2011. Disponível em: <<http://www.ni.com/white-paper/3782/pt/>>. Acesso em: 17 set. 2016.

NEX INSTRUMENT. **1756 ControlLogix Controllers Specifications**. Milwaukee: Rockwell Automation, 2011. Disponível em: <<https://www.nexinstrument.com/assets/images/datasheet/Allen-Bradley/PLC%20CPU/1756%20ControlLogix%20Controllers.pdf>>. Acesso em: 19 mai. 2016.

NHAMBIU, Jorge. **Transmissão de Calor**. [S.l.]: Universidade Eduardo Mondlane, 2011. Disponível em: <[http://nhambiu.uem.mz/wp-content/uploads/2011/05/aula\\_29.pdf](http://nhambiu.uem.mz/wp-content/uploads/2011/05/aula_29.pdf)>. Acesso em: 23 jan. 2017.

NOVUS. **Controle PID Básico**. [S.l.]: 2003. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/artigopidbasico.pdf>> . Acesso em: 13 set. 2016.

PEZZIN, Max. **Sistemas de Controle I**. Natal: Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2003. Disponível em: <[http://www.netsoft.inf.br/aulas/7\\_EAC\\_Sistemas\\_Realimentados/8\\_resumo\\_sistemas\\_contr\\_ole.pdf](http://www.netsoft.inf.br/aulas/7_EAC_Sistemas_Realimentados/8_resumo_sistemas_contr_ole.pdf)>. Acesso em: 02 nov. 2016.

PIRES, Andréa; FERNANDES, Bianca; VILELA, Gabriela; SILVA, Janayna; BORGES, Juliana; EMÍLIA, Maria; FALEIROS, Raquel. **Trocadores de Calor**. Disponível em: <<https://www.slideshare.net/janaynasilva52/trocadores-de-calor-68818172>>. Acesso em: 15 fev. 2017.

PORTNOI, Marcos. **O que é Engenharia?** Salvador: UNIFACS, 1999. Disponível em: <<https://www.eecis.udel.edu/~portnoi/academic/academic-files/eng-whatisit.html>>. Acesso em: 13 set. 2016.

PROFELECTRO. **Sensores s Transdutores**. [S.l.]: [20-?]. Disponível em: <<http://www.profelectro.info/sensores-e-transdutores-pt-1-diferenca-entre-sensores-e-transdutores/>>. Acesso em: 10 mar. 2016.

RAMIREZ, Isabel Bojorge Ninoska. **Função de Transferência**. [Rio de Janeiro]: UFF, 2013. Disponível em: <[http://www.professores.uff.br/controldeprocessos-eq/images/stories/Control\\_Aula05\\_1sem2013.pdf](http://www.professores.uff.br/controldeprocessos-eq/images/stories/Control_Aula05_1sem2013.pdf)> . Acesso em: 23 jan. 2017.

ROBERTS, Brian. **Stuart Warren Cramer and his work in Air Conditioning**. [S.l.]: CIBSE Heritage Group, [20-?]. Disponível em: <[http://www.hevac-heritage.org/built\\_environment/pioneers\\_revisited/cramer.pdf](http://www.hevac-heritage.org/built_environment/pioneers_revisited/cramer.pdf)>. Acesso em: 04 abr. 2017.

ROCKWELL AUTOMATION. **ControlLogix Programmable Automation Controllers**. Disponível em: <[http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/1756-pp015\\_-en-p.pdf](http://literature.rockwellautomation.com/idc/groups/literature/documents/pp/1756-pp015_-en-p.pdf)>. Acesso em: 05 mar. 2017.

RÜDIGER, Mogens. **The Culture of Energy**. Newcastle: Cambridge Scholars Publishing, 2008. 279 p. ISBN: 9781443812023.

SCHULZ, Daniel. **Transformação Adiabática**. [Porto Alegre]: UFRGS, 2009. Disponível em: <<http://www.if.ufrgs.br/~dschulz/web/adiabatica.htm>>. Acesso em: 07 out. 2016.

SILVARES, Leonardo. Modelagem Matemática: o que é, para que serve e como fazer. In: Conversando sobre Matemática: Seminários de Ensino e Matemática Básica, 2010, Rio de Janeiro. **Anais eletrônicos** .. Rio de Janeiro: UNIRIO, 2010. Disponível em: <<http://www2.unirio.br/unirio/ccet/matematica/events/palestra-modelagem-matematica-o-que-e-para-que-serve-e-como-fazer>>. Acesso em: 09 jul. 2016.

SOLUÇÕES INDUSTRIAIS. **Trocador de Calor Aletado**. Disponível em: <<http://www.solucoesindustriais.com.br/empresa/maquinas-e-equipamentos/abc-transcalor-refrigeracao/produtos/refrigeracao-ventilacao-e-exaustao/trocador-de-calor-aletado>>. Acesso em: 11 nov. 2017.

SPX FLOW. **Manual de instruções: APV Permutadores de calor de placas com juntas**. Edição 1000E-PT. [S.l.]: SPX Corporation, 2012. Disponível em:

<[http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/PHE\\_Manual\\_1000E\\_PT\\_tcm11-7522.pdf](http://www.spxflow.com/en/assets/pdf/PHE_Manual_1000E_PT_tcm11-7522.pdf)>. Acesso em: 13 dez. 2016.

SWEP. **Trocadores de calor a placas brasadas**. [S.l.]: [20-?]. Disponível em: <<http://www.swep.com.br/tecnologia/trocadores-de-calor-a-placas-brasadas/>>. Acesso em: 10 mar. 2017.

UFMG. **Evolução dos Sistemas de Controle**. [S.l.]: 2002. Disponível em: <<http://www.cpdee.ufmg.br/~seixas/PaginaII/Download/DownloadFiles/HistoriaControladores.PDF.enc>>. Acesso em: 13 dez. 2016.

VENSON, Ivan. **Controladores Lógicos Programáveis – CLP**. [Curitiba]: [20-?]. Disponível em: <<http://www.madeira.ufpr.br/disciplinasivan/AULACLp.pdf>>. Acesso em: 05 ago. 2016.

WESSLER, Maria Fernandes. **Intercambiadores de calor e conceitos básicos**. Disponível em: < <https://fenomenosdetransporte2unisul.wordpress.com/2013/06/page/2/> >. Acesso em: 17 mar. 2017.