CAROLA GEAN CARLA CAVERO GUTIERREZ

**DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA EM
PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO COM TROCADOR
DE CALOR A PLACAS**

São Paulo

2008

CAROLA GEAN CARLA CAVERO GUTIERREZ

DISTRIBUIÇÃO DO TEMPO DE RESIDÊNCIA EM
PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO COM TROCADOR DE
CALOR A PLACAS

Dissertação apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São
Paulo para obtenção do Título de Mestre
em Engenharia.

Área de concentração:
Engenharia Química

Orientador. Prof. Dr.
Jorge Andrey Wilhelms Gut

São Paulo
2008

Cavero Gutierrez, Carola Gean Carla
Distribuição do tempo de residência em processo de pasteurização com trocador de calor a placas / C.G.C. Cavero Gutierrez. -- ed. rev. -- São Paulo, 2008.
97 p.

Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Química.

1. Leite 2. Pasteurização 3. Trocadores de calor 4. Modelagem matemática I. Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Química II. t.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a toda minha família, por todo o amor e apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Agradeço especialmente ao professor Dr. Jorge Andrey Wilhelms Gut, meu orientador, por todos os valiosos ensinamentos, seu otimismo, dedicação e paciência. Muito obrigada!!

À professora Dra. Carmen Cecília Tadini pelas importantes contribuições no desenvolvimento da pesquisa.

A todo o pessoal do LEA - Laboratório de Engenharia de Alimentos da USP- Viviane, Cinthia, Nathalia, Vanessa, Eduardo, Tatiana Matuda, Diana, Helena, Anita e Ivan pela acolhida, por toda a colaboração prestada e os bons momentos compartilhados no transcurso deste tempo.

A meus queridos amigos Manuel, Litzy, Edwin, Tatiana Tribess, e Yoel, pelo carinho, incentivo e amizade.

À FAPESP pelo auxílio financeiro ao projeto e CAPES pela bolsa concedida.

A todos que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho, meus sinceros agradecimentos.

RESUMO

É apresentado um estudo de distribuição do tempo de residência nas etapas de um processo de pasteurização contínuo por trocador de calor a placas (aquecimento, resfriamento, regeneração e retenção). Para o estudo experimental, foi adotada a técnica condutimétrica usando cloreto de sódio em solução aquosa como traçador. Foram verificadas as influências da vazão, da configuração do trocador de calor a placas (número de passes para o arranjo em série) e do tipo de tubo de retenção (tubo em “S” e tubo helicoidal). Modelos de distribuição foram usados para representar o comportamento experimental (dispersão axial, tanques em série, laminar modificado, combinado PFR+CSTR). Este estudo foi aplicado para as condições de pasteurização HTST de leite, visando a futura implementação de uma modelagem matemática rigorosa do processo, para otimização do projeto e operação do processo.

Palavras-chave: Distribuição de tempo de residência. Pasteurização contínua. Trocador de calor a placas. Modelagem matemática.

ABSTRACT

It is presented a study of residence time distribution in the steps of a process of continuous pasteurization by plate heat exchanger (heating, cooling, regeneration and holding). For the experimental study, it was adopted a conductimetric technique using sodium chloride in aqueous solution as a tracer. It was also studied the influence of the flow rate, the configuration of the plate heat exchanger (number of passes in series arrangement) and the type of holding tube ("S"- shaped tube and helicoidal tube). Distribution models were used for representing the experimental behavior (axial dispersion, tank in series, modified laminar, combined PFR+CSTR). This study was applied for the conditions of HTST pasteurization of milk, targeting the future implementation of a rigorous mathematical modeling of the process, which can be applied for the process operation and optimization of the project design.

Keywords: Residence time distribution. Continuous pasteurization. Plate heat exchanger. Mathematical modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Diferentes modelos de trocadores de calor a placas.....	2
Figura 1.2 - Trocador de calor a placas aberto e suas partes principais.....	3
Figura 1.3 - Exemplo de configuração para um PHE com nove placas.....	4
Figura 1.4 - Exemplos de arranjos de passes para um PHE com nove placas.....	4
Figura 1.5 - Esquema de uma unidade de pasteurização HTST destacando as seções do trocador a placas.....	5
Figura 1.6 - Linha de pasteurização de leite com trocador de cinco seções.....	6
Figura 2.1 - Representação esquemática de alguns tipos de injeção que Podem ser utilizados na técnica experimental estímulo – resposta.....	12
Figura 2.2 - Representação esquemática de um estímulo unitário instantâneo e da respectiva resposta.....	13
Figura 2.3 - Curva E ou distribuição do tempo de residência.....	15
Figura 2.4 - Informação útil obtida a partir de um experimento com função pulso do traçador.....	17
Figura 2.5 - Relação entre as curvas E e F	18
Figura 2.6 - Espalhamento do traçador de acordo com o modelo de dispersão.....	20
Figura 2.7 - Modelo de N tanques em série.....	24
Figura 2.8 - Escoamento do fluido de acordo com o modelo de convecção.....	24
Figura 2.9 - Modelo combinado (escoamento pistonado seguido do escoamento mistura perfeita)	26
Figura 2.10 - Comparação da DTR de três modelos diferentes.....	27
Figura 2.11 - Esquema mostrando a dedução da integral de convolução.....	28
Figura 2.12 - Modificação de um sinal de alimentação de traçador, C_{entrada} , passando através de três regiões sucessivas.....	29

Figura 3.1 - Pasteurizador de laboratório ARMIFIELD modelo FT-43 e placas do trocador de calor.....	34
Figura 3.2 - Condutivímetro YSI Modelo 3200.....	35
Figura 3.3 - Célula YSI modelo 3445.....	36
Figura 3.4 - Esquema dos ensaios das curvas de calibração para o traçador.....	37
Figura 3.5 - Exemplo de curvas típicas de DTR para injeção de um traçador em pulso.....	41
Figura 3.6 - Influência da célula do sistema de aquisição na determinação de uma DTR.....	41
Figura 3.7 - Esquema dos ensaios do estudo experimental do comportamento do sistema de aquisição.....	43
Figura 3.8 - Fotografia dos ensaios para o estudo do sistema de aquisição.....	43
Figura 3.9 - Exemplo de dados experimentais do sistema de aquisição com ajuste de dois modelos matemáticos (N tanques em série e dispersão axial Pe).....	44
Figura 3.10 - Esquema dos ensaios experimentais para o estudo do comportamento do tubo de retenção.....	45
Figura 3.11 - Fotografias dos ensaios de DTR nos tubos de retenção 1 e 2.....	45
Figura 3.12 - Exemplo de dados experimentais de um ensaio do tubo de retenção 1 ajustados com convolução aos quatro modelos matemáticos (modelo laminar modificado, modelo de N tanques em série, modelo de dispersão axial e modelo combinado PFR+CSTR).....	46
Figura 3.13 - Fotografia de um ensaio de DTR no trocador de calor a placas.....	47
Figura 3.14 - Fotografia de um ensaio de DTR no pasteurizador Armfield FT 43.....	49
Figura 4.1 - Curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio.....	50
Figura 4.2 - Gráficos de ajuste das equações (3.2), (3.3) e os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 para a construção das curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio.....	51
Figura 4.3 - Paridade dos dados calculados com os dados reais de concentração de cloreto de sódio.....	52

Figura 4.4 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 10 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	56
Figura 4.5 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 15 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	56
Figura 4.6 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 20 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	56
Figura 4.7 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 25 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	57
Figura 4.8 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 30 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	57
Figura 4.9 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 35 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	57
Figura 4.10 - Variação de tempos médios experimentais do sistema de aquisição de dados com a vazão.....	58
Figura 4.11 - Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 1 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.....	61
Figura 4.12 - Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 2 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.....	62
Figura 4.13 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	64
Figura 4.14 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	65
Figura 4.15 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	65
Figura 4.16 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	65
Figura 4.17 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	66

Figura 4.18 -	Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	66
Figura 4.19 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	67
Figura 4.20 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	67
Figura 4.21 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	67
Figura 4.22 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	68
Figura 4.23 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	68
Figura 4.24 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	68
Figura 4.25 -	Variação de tempos médios de residência experimentais com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2.....	69
Figura 4.26 -	Variação do parâmetro n (modelo laminar modificado) com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2.....	71
Figura 4.27 -	Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 1 no modelo laminar modificado.....	72
Figura 4.28 -	Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 2 no modelo laminar modificado.....	72
Figura 4.29 -	Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 2x1.....	74
Figura 4.30 -	Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 4x1.....	74
Figura 4.31 -	Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 6x1.....	75

Figura 4.32 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 8x1.....	75
Figura 4.33 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 10x1.....	76
Figura 4.34 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 12x1.....	76
Figura 4.35 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 14x1.....	77
Figura 4.36 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 16x1.....	77
Figura 4.37 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 18x1.....	78
Figura 4.38 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 4x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.....	79
Figura 4.39 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 10x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.....	79
Figura 4.40 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 16x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.....	79
Figura 4.41 - Análise da influência da configuração do trocador de calor a placas e da vazão nos parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR.....	80
Figura 4.42 - Análise da influência do número de passes para arranjo em série sobre os parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR.....	80

Figura 4.43 - Exemplo da determinação do volume interno para arranjo de passes 2×1.....	82
Figura 4.44 - Principais dimensões (mm) da gaxeta do trocador de calor.....	83
Figura 4.45 - Variação do volume morto dentro do interior do trocador de calor, em função do número de passes.....	84
Figura 4.46 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do pasteurizador aos quatro modelos matemáticos a temperatura constante.....	85
Figura 4.47 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 15 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.....	86
Figura 4.48 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 20 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.....	87
Figura 4.49 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 25 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.....	87
Figura 4.50 - Análise da influência da vazão nos parâmetros $\bar{t}$ e Pe do modelo de dispersão axial para o pasteurizador.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Determinação numérica da convolução de sinais.....	30
Tabela 4.1-	Parâmetros ajustados para as curvas de calibração do traçador cloreto de sódio.....	51
Tabela 4.2-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 10 L/h.....	53
Tabela 4.3-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 15 L/h.....	54
Tabela 4.4-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 20 L/h.....	54
Tabela 4.5-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 25 L/h.....	54
Tabela 4.6-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 30 L/h.....	55
Tabela 4.7-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 35 L/h.....	55
Tabela 4.8-	Valores dos parâmetros do modelo de dispersão axial para o sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro).....	59
Tabela 4.9-	Tempos médios de residência, tempos espaciais e as porcentagens de discrepância para o sistema de aquisição de dados.....	60
Tabela 4.10-	Resumo dos resultados da figura 4.11 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 1.....	63
Tabela 4.11-	Resumo dos resultados da figura 4.12 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 2.....	63
Tabela 4.12-	Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 1.....	70
Tabela 4.13-	Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 2.....	71

Tabela 4.14-	Parâmetros determinados para a equação (4.7). (cálculo do volume interno do trocador de calor).....	82
Tabela 4.15-	Resumo dos resultados da Figura 4.46 dos quatro modelos matemáticos ajustados para o pasteurizador.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Parâmetro de calibração do traçador (S/m)
a, b, c, d	Volumes internos parciais do traçador (m ³)
a_1, a_2, b_1, b_2	Parâmetros ajustados nas curvas de calibração do traçador cloreto de sódio
B	Parâmetro de calibração do traçador (S/m.°C)
c	Concentração (Kg/m ³)
$C(t)$	Concentração de saída do traçador no tempo (Kg/m ³)
D	Coefficiente de dispersão axial (m ² /s)
$D(t)$	Valor- D da cinética térmica (s)
$E(t)$	Função E de distribuição do tempo de residência (1/s)
$E(\theta)$	Função E de distribuição do tempo de residência adimensionalizada
$F(t)$	Função F de distribuição de tempo de residência.
L	Comprimento (m)
m	Parâmetro do modelo laminar modificado
N	Número de iguais tanques de mistura perfeita em série.
n	Expoente do modelo laminar
n/n_o	Redução da concentração de microrganismos
P	Número de passes do fluido dentro do trocador de calor
Pe	Número de Peclet
R^2	Coefficiente de determinação
T	Temperatura (°C)
t, t'	Tempo (s)
T_{ref}	Temperatura de referencia (°C)

$\bar{t}_p$	Tempo médio de residência na região de escoamento pistonado (s)
$\bar{t}_M$	Tempo médio de residência na região de escoamento com mistura perfeita (s)
$\bar{t}$	Tempo médio de residência(s)
Δt	Intervalo de tempo (s)
V	Volume interno do sistema (m ³)
v	Taxa volumétrica de escoamento (m ³ /s)
V_d	Volume da região de estagnação ou volume morto (m ³)
V_m	Volume da região de escoamento com mistura perfeita (m ³)
V_p	Volume da região de escoamento pistonado (m ³)
V_{PHE}	Volume interno do trocador de calor a placas (m ³)
Z	Valor Z da cinética térmica (°C)
$\sum \text{erro}^2$	Somatória das médias do erro quadrático

SÍMBOLOS GREGOS

α_i	Parâmetro da equação (2.18) para $E(\theta)$
α, β, γ	Parâmetro de calibração do traçador
θ	Unidade adimensional de tempo
π	Constante pi ($\pi = 3,1416$)
σ^2	Variância de uma curva do traçador ou função distribuição (s ²)
τ	Tempo espacial (s)

LISTA DE ABREVIATURAS

alog	Função anti logarítmica base 10
ANVISA	Agencia Nacional de Vigilância Sanitária
DRT	Distribuição de tempos de residência
exp	Função exponencial
HTST	Processo de pasteurização alta temperatura curto tempo
log	Função logarítmica base 10
PHE	Trocador de calor a placas
PRF+CST	Associação de um vaso com escoamento pistonado com um vaso de mistura perfeita
UHT	Processo de pasteurização ultra alta temperatura

SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Listra de ilustrações.....	iii
Lista de tabelas.....	ix
Lista de símbolos.....	xi
Lista de abreviaturas.....	xiii
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	10
2.1. Tipos de escoamento.....	10
2.2. Distribuição do tempo de residência (DTR).....	10
2.2.1. <i>Técnica experimental estímulo-resposta.....</i>	<i>12</i>
2.2.2. <i>Traçadores.....</i>	<i>13</i>
2.2.3. <i>Tempo espacial.....</i>	<i>14</i>
2.2.4. <i>Determinação experimental da distribuição de tempos de residência (DTR)</i>	<i>14</i>
2.2.5. <i>Tempo médio da distribuição do tempo de residência.....</i>	<i>16</i>
2.2.6. <i>Função F.....</i>	<i>18</i>
2.2.7. <i>Funções adimensionalizadas.....</i>	<i>19</i>
2.2.8. <i>Efeito ajuste.....</i>	<i>19</i>
2.3. Modelos matemáticos para o escoamento não-ideal.....	20

2.3.1. <i>Modelo de dispersão axial</i>	20
2.3.2. <i>Modelo de N tanques em série</i>	22
2.3.3. <i>Modelo laminar modificado</i>	24
2.3.4. <i>Modelo combinado PFR+CSTR</i>	26
2.4. Convolução	27
2.5. Uso da DTR para cálculo da letalidade em tubo	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS	33
3.1. Materiais e Equipamentos	33
3.2. Reagentes	36
3.3. Metodologia	36
3.3.1. <i>Curvas de calibração para o traçador</i>	36
3.3.2. <i>Distribuição do tempo de residência</i>	39
3.3.3. <i>Distribuição do tempo de residência do sistema de aquisição</i>	42
3.3.4. <i>Distribuição do tempo de residência dos tubos de retenção</i>	44
3.3.5. <i>Distribuição do tempo de residência do sistema do trocador de calor a placas</i>	47
3.3.6. <i>Distribuição do tempo de residência do processo de pasteurização</i>	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. Curvas de calibração do traçador	50
4.2. Distribuição de tempos de residência do sistema de aquisição	52
4.3. Distribuição de tempos de residência dos tubos de retenção	60
4.4. Distribuição de tempos de residência do sistema do trocador de calor a placas	73
4.5. Distribuição de tempos de residência no pasteurizador	84

5. CONCLUSÕES.....	89
6. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS.....	92
ANEXO A - Exemplo de uma planilha de cálculo para obter $E(t)$, $F(t)$, $E(\theta)$ e $\bar{t}$ a partir de dados experimentais.....	97

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A palavra pasteurização é empregada em homenagem a Louis Pasteur, o ilustre cientista francês, que entre 1854 e 1864 deu base científica aos métodos térmicos de conservação. Ele demonstrou experimentalmente que tratamentos térmicos destruíam os tipos indesejáveis de microrganismos que estavam associados à deterioração dos alimentos e que eram causadores de doenças específicas. A aplicação de um método de tratamento térmico específico para o leite foi proposta pela primeira vez por Soxhlet em 1886 na Alemanha (Partridge, 2000).

A pasteurização é um tratamento térmico controlado, no qual o alimento é submetido a um aquecimento por tempo determinado seguido de resfriamento. Este processo busca garantir a segurança microbiológica, aumentar a vida de prateleira e preservar as características sensoriais e nutricionais do alimento (Lewis e Heppell, 2000). No Brasil é obrigatório que todos os derivados laticínios sejam fabricados a partir do leite pasteurizado (ANVISA, resolução - RDC Nº 267, de 25 de setembro de 2003, artigo 4.1.16).

O processo de pasteurização contínua HTST (*high temperature short time*) destina-se ao tratamento térmico de produtos alimentícios líquidos para a redução das células vegetativas, patogênicas e/ou deterioradoras e para a inativação de enzimas indesejadas. Em comparação com a esterilização, a pasteurização é um tratamento térmico brando, onde há um compromisso entre a segurança e a qualidade do produto final. Quando se deseja um tratamento severo para prolongar a vida de prateleira ou eliminar esporos termoresistentes, opta-se pelo processo de esterilização contínua UHT (*ultra high temperature*) (Lewis e Heppell, 2000).

O processamento UHT é também conhecido por “esterilização comercial”, para diferenciá-la de uma esterilização total onde a eliminação de microrganismos é completa. No processo UHT, o produto final não fica totalmente livre de microrganismos. Mesmo assim aqueles que sobrevivem dificilmente se desenvolvem nas condições de armazenamento do produto.

Nos processos de pasteurização HTST de alimentos não muito viscosos é difundido o uso de trocadores de calor a placas para o aquecimento e o resfriamento indireto do produto.

No trocador de calor a placas ou PHE (*plate heat exchanger*) os fluidos escoam por estreitos canais e trocam calor através de finas chapas metálicas. Alguns exemplos de PHEs são mostrados na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Diferentes modelos de trocadores de calor a placas (Armfield, 2007; Danther, 2007)

Os PHEs foram introduzidos comercialmente na década de 30 para atender às exigências de higiene e limpeza das indústrias alimentícias e farmacêuticas, pois eles podem ser facilmente desmontados, limpos e inspecionados. Atualmente os PHEs são extensamente empregados em diversos processos de troca térmica entre líquidos com pressões e temperaturas moderadas (até 1,5 MPa e 150 °C) onde se deseje alta eficiência térmica (Gut e Pinto, 2003a).

Os PHEs são formados basicamente por um pacote de finas placas metálicas prensadas em um pedestal, como mostra a Figura 1.2. O pedestal possui uma placa fixa, uma placa de aperto móvel, barramentos inferior e superior e parafusos de aperto. As placas fixa e de aperto possuem bocais para conexão das tubulações de alimentação e de coleta dos fluidos.

Figura 1.2 - Trocador de calor a placas aberto e suas partes principais (Gut e Pinto, 2003b)

As placas do PHE possuem orifícios nos cantos para a passagem dos fluidos e são seladas nas extremidades por gaxetas (também chamadas de juntas) de material elastomérico. Quando as placas são alinhadas e prensadas no pedestal, forma-se entre elas uma série de canais paralelos de escoamento.

O espaço compreendido entre duas placas é um canal de escoamento. O fluido entra e sai dos canais através dos orifícios nas placas e o seu caminho por dentro do PHE é definido pelo desenho das gaxetas, pelos orifícios abertos e fechados das placas e pela localização das conexões de alimentação. A configuração do PHE define as trajetórias dos fluidos quente e frio dentro do trocador e existe um grande número de possibilidades de configuração.

A distribuição do fluxo pelos canais do PHE é feita na forma de “passes”, compostos por um certo número de “passagens”. Cada vez que o fluxo muda de sentido, muda-se de passe. Na Figura 1.3 é mostrado um exemplo de configuração para um PHE com nove placas, onde é possível observar os orifícios abertos e fechados das placas e também o desenho das gaxetas que definem a direção e o sentido do escoamento em cada canal. No caso deste exemplo têm-se oito canais de escoamento, o fluido quente faz dois passes de duas passagens e o fluido frio faz quatro passes de uma passagem (Gut e Pinto, 2003a).

Figura 1.3 - Exemplo de configuração para um PHE com nove placas (Gut e Pinto, 2003a).

Os números de passes e de passagens definem o “arranjo de passes” do PHE. Para o exemplo na Figura 1.3, o arranjo é $2 \times 2/4 \times 1$ (dois passes de duas passagens por quatro passes de uma passagem). Os tipos de arranjos mais comuns são aqueles em paralelo onde os dois fluidos fazem apenas um passe (arranjo $1 \times n/1 \times m$) e aqueles em série onde os fluxos não sofrem divisões, ou seja, cada passe tem apenas uma passagem (arranjo $n \times 1/m \times 1$). Na Figura 1.4 são mostrados exemplos de arranjos em paralelo e em série para PHEs de nove placas.

Figura 1.4 - Exemplos de arranjos de passes para um PHE com nove placas (Gut e Pinto, 2003b).

De forma geral, os PHEs são utilizados em operações de resfriamento, aquecimento ou de recuperação de calor entre líquidos com temperaturas inferiores a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressões não maiores que 1,5 MPa. Eles são extensivamente usados no processamento de produtos alimentícios como laticínios, sucos e cervejas e também na indústria farmacêutica para esterilização de meios de cultura. A facilidade de

limpeza interna e de controle da temperatura dos PHEs são fundamentais para estes processos industriais.

Em resumo, este tipo de trocador oferece grandes vantagens como a fácil higiene interna, alta eficiência térmica, turbulência induzida no escoamento em baixa velocidade, viabilidade econômica para fabricação em aço inoxidável, boa distribuição de temperatura e construção compacta e modular que permite acomodar várias seções de troca térmica em um mesmo pedestal (Kakaç e Liu, 2002).

Uma das aplicações mais importantes dos PHEs é na pasteurização do leite. Neste processo o PHE é dividido em no mínimo três seções de troca térmica, uma para aquecimento do leite cru até a temperatura de pasteurização, outra para resfriamento do leite pasteurizado até a temperatura de embalagem e uma seção para recuperação de calor. Nesta última seção, designada “regeneração”, o leite cru é pré-aquecido usando o leite quente pasteurizado e a recuperação de calor pode ser superior a 90 %. (Gut e Pinto, 2003a).

A Figura 1.5 mostra, como exemplo, o esquema simplificado de uma unidade de pasteurização HTST e pode-se observar as três seções de troca térmica ocupando o mesmo pedestal do PHE. As grades conectoras são usadas para separar as seções. A Figura 1.6 apresenta um processo industrial de pasteurização de leite com um trocador de calor a placas com cinco seções.

Figura 1.5 - Esquema de uma unidade de pasteurização HTST destacando as seções do trocador a placas (Gut e Pinto, 2003c)

1. Tanque de leite	8. Bomba <i>booster</i>
2. Bomba de alimentação	9. PHE para aquecimento da água
3. Controlador de vazão	10. Seções de regeneração, lado quente
4. Seções de regeneração, lado frio	11. Seções de resfriamento
5. Homogeneizador	12. Válvula diversora de fluxo
6. Seção de Aquecimento	13. Painel de controle
7. Tubo de retenção	

Figura 1.6 - Linha de pasteurização de leite com trocador de cinco seções (Alfa Laval, 2008)

As condições de temperatura e tempo do tratamento térmico nos processos HTST são geralmente definidas tendo como base o microrganismo patogênico mais termoresistente presente no alimento, como por exemplo, *Mycobacterium tuberculosis* para o leite bovino ou *Salmonella senftenberg* para o ovo líquido (Lewis e Heppell, 2000). As condições são definidas de forma a atingir um número desejado de reduções decimais para a população do microrganismo alvo. Por exemplo, para assegurar 12 reduções decimais na população de *Mycobacterium tuberculosis* no leite, realiza-se a sua pasteurização a 72 °C com um tempo de retenção de 15 segundos (Lewis, 1999).

O tubo de retenção do pasteurizador (ver Figuras 1.5 e 1.6) é dimensionado para atender ao tempo de retenção na temperatura de pasteurização desejada. Como a temperatura na saída do tubo deve ter uma variação muito pequena para evitar que

o produto tenha de retornar ao tanque de alimentação (perda de energia e incremento no custo do processamento) ou que ele seja sobre-processado (perda de qualidade), o projeto e o controle do processo são fundamentais (Ibarrola et al., 2002).

A avaliação do grau do tratamento térmico de uma unidade de tratamento térmico pode ser feita de duas formas: 1) teoricamente através da análise do perfil de temperatura versus a distribuição do tempo de residência, ou 2) experimentalmente utilizando integradores de tempo-temperatura (Lewis e Heppell, 2000), que são indicadores de natureza biológica, química ou física, presentes ou formados no alimento durante o processamento com cinética similar àquela do atributo estudado.

Para o correto dimensionamento de uma unidade de pasteurização é fundamental o conhecimento da distribuição do tempo de residência do processo. Normalmente, assume-se que a inativação térmica ocorre apenas dentro do tubo de retenção a uma temperatura constante e com a duração do tempo de retenção mínimo no tubo. Embora irreais, estas condições favorecem a segurança do processo já que desprezam o tratamento térmico que ocorre dentro do trocador de calor, aquele associado às condições não isotérmicas do tubo de retenção e também as partículas mais lentas no sistema. Na prática, tem-se um produto sobre-processado de menor qualidade sensorial e nutricional e com um gasto adicional de energia para aquecimento e resfriamento. Grijspeerdt et al. (2004), por exemplo, analisaram três sistemas de esterilização UHT de leite e verificaram que todos estavam super-dimensionados com respeito à inativação bacteriana. Já Landfeld et al. (2002) analisaram uma unidade pasteurizadora de gema de ovo e constataram que o tempo de retenção estava 48 % acima do valor requerido.

Com a atual valorização de hábitos saudáveis, há uma preocupação crescente com o valor nutricional dos alimentos e com a presença de compostos que melhorem a saúde (van Boekel e Jongen, 1997). Como consequência, valorizaram-se os produtos alimentícios minimamente processados que conservam as características e propriedades do produto natural. Segundo Gould (1996) e Nott e Hall (1999), esta é a atual tendência de desenvolvimento na área de preservação de produtos alimentícios.

Diversos estudos têm sido realizados para quantificar o impacto do processamento industrial sobre as características “saudáveis” dos alimentos, por exemplo, Efigênia

et al. (1997) analisaram a perda de qualidade nutricional do leite pasteurizado no Brasil. Pátkai et al. (1997) reportam que durante a pasteurização de sucos de frutas ocorre a decomposição de cerca de 40 % do agente anti-cancerígeno betamina presente na fruta. Van Boekel e Jongen (1997) ressaltam a necessidade de métodos para medir a atividade biológica de vitaminas, enzimas e outros compostos presentes em alimentos, para otimizar as etapas do processo produtivo visando a melhoria da qualidade do produto. Trabalhos para quantificar a perda de qualidades sensoriais também têm sido desenvolvidos, como por exemplo, os estudos de Lee e Coates (2003) e Jordán et al. (2003) sobre mudanças de cor e perda do aroma, respectivamente, no suco de laranja processado. Outro trabalho realizado por Tribess e Tadini (2001) faz uma comparação dos resultados de suco de laranja submetido a um processo de esterilização UHT em um trocador de calor a placas e do suco de laranja processado com um tratamento térmico HTST e verifica que o suco minimamente processado tem mais aceitação por conservar as características do suco em natura.

De acordo com Grijspeerdt et al. (2003), uma modelagem rigorosa do processo é necessária para que se possa simular e otimizar o tratamento térmico visando determinar condições ótimas de operação para minimizar os efeitos indesejáveis do aquecimento, garantir a qualidade microbiológica do alimento e reduzir os custos operacionais. Para a correta modelagem, são fundamentais modelos térmicos e hidráulicos rigorosos do equipamento, dados de cinética de inativação térmica e de propriedades termo-físicas confiáveis.

Ávila e Silva (1999), em sua revisão sobre a otimização de processamento térmico de alimentos, constata que trabalhos de modelagem e otimização para processos de pasteurização de alimentos líquidos são relativamente escassos, enquanto que muitos trabalhos enfocam a simulação do processamento de alimentos sólidos por condução.

O desenvolvimento de modelos para simular a troca térmica e o escoamento juntamente com as cinéticas de inativação e degradação resultariam em uma excelente ferramenta para otimização destes processos térmicos. Ávila e Silva (1999), recomendam o uso da teoria da distribuição do tempo de residência (DTR) para representar o processamento de alimentos líquidos, que tem características complexas de escoamento.

Neste trabalho, o principal objetivo foi o estudo de distribuição do tempo de residência nas diferentes etapas de um processo de pasteurização com trocador de calor a placas buscando identificar a influência da vazão, tipo de tubo de retenção e, configuração do trocador de calor (número de placas e arranjo de passes). Para o estudo foi empregada a técnica condutimétrica e foram usados modelos de DTR para representar o comportamento observado. A análise de DTR é aplicada nas condições do processo de pasteurização HTST de leite bovino, nas condições de escoamento isotérmico.

Tendo em vista as atuais tendências de melhora da qualidade dos produtos alimentícios pasteurizados e a crescente competitividade entre os seus fabricantes, estima-se que este trabalho contribuirá de forma significativa para o projeto e operação de unidades de pasteurização.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O escoamento de um fluido através de um equipamento numa planta de tratamento térmico contínuo está sujeito às características do equipamento, a vazão de escoamento e às propriedades do fluido como a viscosidade e densidade. Os modos de escoamento ideal no tubo de retenção de pasteurizadores são de dois tipos, escoamento pistonado ou escoamento laminar. Na maioria dos casos, projetam-se equipamentos assumindo um ou outro tipo dependendo do regime de escoamento: turbulento ou laminar (Levenspiel, 2000).

Para caracterizar melhor o desempenho destes equipamentos, inicialmente tem que se investigar a maneira como o fluido escoam pelo dispositivo, em outros termos, a natureza do escoamento ou a macro-mistura.

2.1. Tipos de escoamento

São dois os principais modelos ideais de escoamento citados na literatura: o escoamento de mistura perfeita (*Backmix Flow* ou *Continuous Stirred Tank Reactor - CSTR*) e o escoamento pistonado (*Plug Flow Reactor - PFR*). Escoamentos com comportamentos diferentes podem ser considerados não-ideais (Levenspiel, 2000).

O escoamento pistonado é aquele em que as moléculas do fluido atravessam o equipamento com a mesma velocidade, movendo-se “alinhadas”. Não há mistura por dispersão axial. Já no escoamento de mistura perfeita, as moléculas do fluido se misturam obtendo-se composição homogênea no interior do volume.

Os desvios dos dois modelos de escoamento ideal podem ser causados por fenômenos de escoamento que podem ocorrer no interior dos equipamentos. Alguns fenômenos são descritos a seguir:

- a) Escoamento preferencial – ocorre quando grandes quantidades de elementos do fluido escoam através do equipamento em tempo menor que outros;

- b) Curto circuito – ocorre quando elementos do fluido escoam através do equipamento sem percorrer todo seu interior;
- c) Zonas mortas – são regiões do equipamento isoladas ou inacessíveis, onde o fluido nelas aprisionado não interage com as regiões ativas;
- d) Reciclo – ocorre quando parcelas do fluido são recirculadas para a entrada ou para o interior do equipamento;
- e) Retromistura - ocorre quando parcelas do fluido apresentam movimento na direção contrária ao fluxo principal.

Algumas dessas anomalias do escoamento podem ser detectadas a partir da observação das curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) e da análise de parâmetros calculados a partir dos dados experimentais (Soares, 1985).

2.2. Distribuição do tempo de residência (DTR)

É considerado que um fluido é constituído por uma infinidade de elementos, os mesmos que são expostos a variadas e diversas forças a favor e contrárias ao movimento, então se assume que cada elemento do fluido tem um comportamento definido dentro do sistema que determina a permanência no mesmo (Giácoman, 2003).

O tempo de residência de um elemento de fluido é definido como o tempo decorrido desde a entrada no sistema até a saída do mesmo (Torres e Oliveira, 1998).

Chakrabandhu (2000) apresenta um estudo onde diferentes elementos de um fluido demoram tempos diferentes para percorrer toda a extensão de um sistema de processamento. Ressalta também que a distribuição do tempo de residência de um alimento é essencial para o projeto e para a otimização de sistemas de processamento contínuo. Do ponto de vista da segurança do processo, o conhecimento do tempo de residência mínimo é fundamental para garantir um produto seguro. Do ponto de vista da qualidade do produto, ter uma distribuição mais uniforme do tempo de residência implica em ter um produto mais uniforme.

A distribuição deste tempo para uma corrente de fluido é chamada de distribuição de idade das porções de saída, E (do inglês, *exit*) ou distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido em escoamento (Levenspiel, 2000).

A informação sobre a DTR pode ser obtida através do uso de uma técnica experimental amplamente utilizada, denominada técnica estímulo-resposta.

2.2.1. Técnica experimental estímulo-resposta

A técnica experimental utilizada para estudar a distribuição do tempo de residência de um fluido num equipamento é a conhecida como estímulo-resposta, que consiste em injetar um traçador na entrada do dispositivo e observar as concentrações de traçador nas amostras coletadas na saída deste dispositivo. A injeção é feita de maneira conhecida, que pode ser de diferentes formas: aleatória, pulso, degrau, etc. (Levenspiel, 1986). Estes sinais estão ilustrados na Figura 2.1 onde c é a concentração do traçador e t é o tempo.

Figura 2.1 – Representação esquemática de alguns tipos de injeção que podem ser utilizados na técnica experimental estímulo-resposta (Levenspiel, 1986)

A Figura 2.2 representa esquematicamente o estímulo tipo pulso aplicado à entrada de um dispositivo e a resposta obtida à sua saída.

Figura 2.2 –Representação esquemática de um estímulo unitário instantâneo e da respectiva resposta (Levenspiel, 1986)

2.2.2. Traçadores

O traçador é qualquer produto que, incorporado a uma substância, permite investigar o comportamento desta em um determinado processo físico ou químico.

Os traçadores são utilizados para marcarem fluidos, constituindo importantes ferramentas na obtenção de modelos que representem o escoamento. As principais propriedades para a escolha do traçador ideal são apresentadas a seguir (Akemi, 2005):

- ✓ Comportamento fluidodinâmico idêntico ao da substância que se pretende estudar;
- ✓ Possuir uma característica adicional que permita diferenciá-lo da substância que se pretende estudar;
- ✓ O traçador, ou esta característica adicional que o distingue, não deve existir (se possível) no meio em que o traçador será empregado (baixo *background*);
- ✓ O método de detecção e de medição do traçador deve ser fácil, de alta eficiência e possível de ser realizado através de equipamento simples e de baixo custo;
- ✓ O traçador deve ser conservativo, e as amostras coletadas para posteriores análises em laboratório devem ter volume reduzido para maior facilidade de transporte e manuseio;
- ✓ A composição química do traçador não deve ser tóxica;
- ✓ O traçador deve estar disponível no mercado e ter baixo custo.

2.2.3. Tempo espacial

O tempo espacial do fluido no sistema com escoamento e densidade constantes (onde as vazões de entrada e saída no sistema são iguais) ou tempo teórico de residência é definido como:

$$\tau = \frac{V}{v} \quad \text{eq. (2.1)}$$

Onde:

τ = Tempo espacial (s)

V = Volume interno do sistema (mL)

v = Vazão volumétrica constante (mL/s)

2.2.4. Determinação experimental da distribuição do tempo de residência (DTR)

A distribuição do tempo de residência do fluido E , ou curva E , representa a fração de fluido saindo do sistema em cada tempo e tem unidades de tempo⁻¹.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad \text{eq. (2.2)}$$

Onde:

$C(t)$ = Concentração de saída do traçador no tempo t .

Quando a injeção do traçador é feita pela técnica do pulso, obtém-se diretamente a curva $E(t)$. A curva $E(t)$ tem forma normalizada, ou seja, a área sob a curva é unitária:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad \text{eq. (2.3)}$$

Figura 2.3 –Curva E ou distribuição do tempo de residência (Levenspiel, 2000).

A Figura 2.3 mostra um exemplo de curva E (Levenspiel, 2000).

A curva E é a distribuição mais usada para estudar o escoamento não-ideal.

Como o valor da função $E(t)$ fornece a fração dos elementos da corrente de saída com idade entre t e $t+dt$, que é:

$$E(t)dt$$

então a fração mais nova que a idade t_1 , ou a fração que fica num sistema com um tempo menor que t_1 é:

$$\text{Fração } (t < t_1) = \int_0^{t_1} E(t) dt \quad \text{eq. (2.4)}$$

enquanto que a fração de material mais velha ou aquela que fica com tempo maior que t_1 é:

$$\int_{t_1}^{\infty} E(t) dt = 1 - \int_0^{t_1} E(t) dt \quad \text{eq. (2.5)}$$

2.2.5. Tempo médio da distribuição do tempo de residência

O tempo médio é um importante parâmetro na caracterização da distribuição do tempo de residência (Chakrabandhu, 2000). É representado por $\bar{t}$ e pode ser calculado a partir da curva da concentração pelo tempo $C(t)$ para um experimento realizado com a função pulso, com uma vazão constante, da seguinte forma:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad \text{eq. (2.6)}$$

Se a curva de distribuição só é conhecida em alguns valores discretos, este tempo médio pode ser calculado da seguinte forma:

$$\bar{t} \cong \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad \text{eq. (2.7)}$$

Para a curva de $E(t)$, o tempo médio é dado por:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tE(t)dt \cong \sum_i t_i E(t_i) \Delta t_i \quad \text{eq. (2.8)}$$

Na Figura 2.4 são apresentadas algumas das equações descritas anteriormente para um experimento com função pulso.

Figura 2.4 - Informação útil obtida a partir de um experimento com função pulso do traçador (Levenspiel, 2000)

O espalhamento da distribuição é representado pela variância (σ^2) que é particularmente útil para fazer coincidir as curvas experimentais com uma das famílias das curvas teóricas e é definida como:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^{\infty} (t - \bar{t})^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} = \frac{\int_0^{\infty} t^2 C dt}{\int_0^{\infty} C dt} - (\bar{t})^2 \quad \text{eq. (2.9)}$$

Para valores discretos de tempo, a variância pode ser estimada da seguinte forma:

$$\sigma^2 \cong \frac{\sum_i (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \cong \frac{\sum_i t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} - (\bar{t})^2 \quad \text{eq. (2.10)}$$

Para uma curva $E(t)$, a variância é dada como:

$$\sigma^2 = \int_0^{\infty} t^2 E(t) dt - (\bar{t})^2 \cong \sum_i t_i^2 E(t_i) \Delta t_i - (\bar{t})^2 \quad \text{eq. (2.11)}$$

2.2.6. Função F

Outra forma de expressar a DTR é através da função $F(t)$, definida como função soma ou função acumulativa do tempo de residência que resulta de integrar a curva $E(t)$ no tempo.

$$F(t) = \int_0^t E(t)dt \quad \text{eq. (2.12)}$$

Esta equação representa, diretamente, a fração de fluido que permanece dentro do tanque por um período menor ou igual a t (Levenspiel, 1986). Diferenciando F , obtem-se:

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad \text{eq. (2.13)}$$

Esta relação é apresentada graficamente na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Relação entre as curvas E e F (Levenspiel, 2000)

2.2.7. Funções adimensionalizadas

É conveniente representar o tempo em relação ao tempo médio de residência na forma adimensional, usando a variável tempo adimensional θ . Da mesma forma, a função de distribuição do tempo de residência pode ser representada adimensionalmente $E(\theta)$:

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad \text{eq. (2.14)}$$

$$E(\theta) = \bar{t}E(t) \quad \text{eq. (2.15)}$$

Fazendo uma relação com a equação (2.3) tem-se:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = \int_0^{\infty} E(\theta)d\theta = 1 \quad \text{eq. (2.16)}$$

2.2.8. Efeito ajuste

Um critério razoável para o ajuste dos parâmetros de um modelo matemático de DTR é a minimização do erro quadrático entre valores experimentais e calculados da curva de DTR:

$$\sum \text{erro}^2 = \min \left[\sum_i^n \left(E_{\text{exp},i}(\theta) - E_{\text{modelo},i}(\theta) \right)^2 \right] \quad \text{eq. (2.17)}$$

2.3. Modelos matemáticos para o escoamento não-ideal

Os modelos matemáticos são úteis para representar escoamentos reais, para fazer o aumento de escala e para diagnosticar problemas de escoamento. Tem-se diferentes tipos de modelos, que dependem de quão próximo o escoamento esteja do escoamento pistonado, do escoamento com mistura perfeita ou de algum outro escoamento entre estes dois modos ideais.

2.3.1. Modelo de dispersão axial

Supondo que um pulso ideal de traçador é introduzido no fluido que entra em um vaso, o pulso se espalha à medida que passa através do vaso. Para caracterizar o espalhamento de acordo com este modelo (Figura 2.6) é considerado que um processo parecido com a difusão seja imposto ao escoamento pistonado (Levenspiel, 2000).

Figura 2.6 –Espalhamento do traçador de acordo com o modelo de dispersão (Levenspiel, 2000)

Este modelo é chamado de modelo de dispersão axial. O coeficiente da dispersão D (m^2/s) representa este processo de espalhamento da seguinte forma:

- D elevado significa um espalhamento rápido do traçador.
- D baixo significa um espalhamento lento.
- D nulo significa espalhamento inexistente; logo, escoamento pistonado.

O grupo adimensional que caracteriza o espalhamento em todo vaso é o número de Peclet (Pe) definido como (Levenspiel, 2000):

$$Pe = \frac{uL}{D} \quad \text{eq. (2.18)}$$

Onde:

u = velocidade média (m/s)

L = comprimento do vaso (m)

D = coeficiente de dispersão axial (m²/s)

Uma equação analítica deste modelo para a concentração de traçador na saída ao longo do tempo é dada por Nascimento e Giudici (1989):

$$E(\theta) = e^{-\frac{Pe}{2}} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1} 8\alpha_i^2}{4\alpha_i^2 + 4Pe + Pe^2} \exp\left(\frac{-\theta(Pe^2 + 4\alpha_i^2)}{4Pe}\right) \quad \text{eq. (2.19)}$$

onde α_i é determinado calculando as raízes das seguintes equações:

$$\text{tangente} \left(\frac{\alpha_i}{2} \right) = \frac{Pe}{4\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)} \quad \text{se } i \text{ é ímpar} \quad \text{eq. (2.20)}$$

$$\text{cotangente} \left(\frac{\alpha_i}{2} \right) = \frac{-Pe}{4\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)} \quad \text{se } i \text{ é par} \quad \text{eq. (2.21)}$$

A equação (2.19) pode ter problemas numéricos para valores de θ muito pequenos ou para valores de Pe muito grandes, assim, recomenda-se usar em seu lugar a seguinte aproximação (Gouvêa et.al, 1990):

$$E(\theta) = \left(\frac{Pe + 1}{4\pi\theta^3} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{-(Pe + 1)(1 - \theta)^2}{4\theta} \right) \quad \text{eq. (2.22)}$$

A equação (2.22) também pode ser apresentada na forma dimensional:

$$E(t) = \frac{1}{\bar{t}} \sqrt{\frac{Pe + 1}{4\pi \left(\frac{t}{\bar{t}} \right)^3}} \exp \left[\frac{-(Pe + 1) \left(1 - \frac{t}{\bar{t}} \right)^2}{4 \left(\frac{t}{\bar{t}} \right)} \right] \quad \text{eq. (2.23)}$$

Os parâmetros para estas equações são $\bar{t}$ e Pe .

2.3.2. Modelo de N tanques em série

Este modelo pode representar um reator tubular real e pode ser usado para toda vez que o modelo de dispersão for usado; para um desvio não tão grande do escoamento pistonado, ambos os modelos dão resultados idênticos para todas as finalidades práticas (Levenspiel, 2000).

O modelo de dispersão tem a vantagem de que todas as correlações para escoamento em reatores reais usam invariavelmente este modelo. Por outro lado, o modelo de tanques em série é simples, pode ser usado com qualquer cinética e pode ser estendido, sem muita dificuldade, para qualquer arranjo de compartimento (Levenspiel, 2000).

O modelo de tanques considera uma analogia ao escoamento através de uma série de N tanques de mistura perfeita. Este modelo possui como parâmetros N que é o número de tanques e $\bar{t}$ que é o tempo médio de residência da série. A curva de DTR para este modelo na forma dimensional é dada pela equação:

$$E_{\text{Tanques}}(t) = \left(\frac{1}{\bar{t}}\right) \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)^{N-1} \frac{N^N}{(N-1)!} e^{-\frac{t}{\bar{t}}N} \quad \text{eq. (2.24)}$$

Valores não inteiros para número de tanques podem ser considerados calculando-se as fatoriais de números não inteiros através da função Γ :

$$\Gamma(N) = \int_0^{\infty} x^{N-1} e^{-x} dx \quad \text{eq. (2.25)}$$

$$\Gamma(N+1) = N \cdot \Gamma(N) = N \cdot (N-1) \Gamma(N-1) = \dots = N! \Gamma(1) = N! \quad \text{eq. (2.26)}$$

A função gama foi aproximada por um polinômio de grau 5 para o intervalo $1,0 \leq N \leq 2,0$ usando 1001 valores numéricos gerados com o software MatLab (MathWorks, USA) com precisão 10^{-14} . Os coeficientes do polinômio ajustado são: $a_5 = -0,095280563$, $a_4 = +0,881949260$, $a_3 = -3,253059648$, $a_2 = +6,361011447$, $a_1 = -6,587129421$ e $a_0 = +3,692414299$. O ajuste foi realizado com a ferramenta Solver do software Excel (Microsoft, USA). Eis um exemplo de uso da função gama para determinação de um fatorial não inteiro: $4,65! = \Gamma(5,65) = (4,65 \cdot 3,65 \cdot 2,65) \cdot \Gamma(1,65) = (74,2) \cdot 0,90 = 66,8$.

A equação (2.24) estabelece o número de tanques de mistura ideais em série que representam o sistema real. Os parâmetros para esta equação são apresentados na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Modelo de N tanques em série (Levenspiel, 2000)

2.3.3. Modelo laminar modificado

Quando um tubo é suficientemente longo e o fluido não é muito viscoso, então os modelos de dispersão e de tanques em série podem ser usados para representar o escoamento nestes vasos. Para um fluido viscoso e/ou em baixa velocidade normalmente tem-se o escoamento laminar, com seu característico perfil parabólico de velocidades. Além disto, por causa da alta viscosidade, há apenas uma leve difusão radial entre as camadas mais lentas e mais rápidas de fluido. Então o modelo praticamente assume que cada elemento de fluido desliza sobre o seu vizinho, sem haver interação pela difusão molecular. Assim, a dispersão nos tempos de residência é causada somente por variações na velocidade. Este escoamento é mostrado na Figura 2.8 (Levenspiel, 2000).

Figura 2.8 - Escoamento do fluido de acordo com o modelo de convecção (Levenspiel, 2000)

A equação que representa este comportamento é:

$$E(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\theta^n} & \text{para } \theta \geq 0,5 \\ 0 & \text{para } \theta < 0,5 \end{cases} \quad \text{eq. (2.27)}$$

Onde o expoente n pode ter valores de 1, 2 ou 3 dependendo da forma como o traçador é injetado e medido (Levenspiel, 2000).

Um estudo feito por Rutheven (1971) apresenta uma dedução teórica para este modelo para escoamento em tubos helicoidais:

$$E(\theta) = \begin{cases} \frac{0,705}{\theta^{3,81}} & \text{para } \theta \geq 0,613 \\ 0 & \text{para } \theta < 0,613 \end{cases} \quad \text{eq. (2.28)}$$

Escrevendo esta equação em formato generalizado usando parâmetros m e n :

$$E(\theta) = \begin{cases} \frac{m}{\theta^n} & \text{para } \theta \geq \theta_i \\ 0 & \text{para } \theta < \theta_i \end{cases} \quad \text{eq. (2.29)}$$

Para que se cumpra a equação (2.16) é necessário que $m = (n - 1)\theta_i^{n-1}$, substituindo na equação (2.29) e convertendo para a forma dimensional, temos a equação para o modelo laminar modificado ($n > 2$):

$$E(t) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{t}} \frac{(n - 2)^{n-1}}{(n - 1)^{n-2}} \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)^{-n} & \text{para } t \geq \frac{(n - 2)}{(n - 1)} \bar{t} \\ 0 & \text{para } t < \frac{(n - 2)}{(n - 1)} \bar{t} \end{cases} \quad \text{eq. (2.30)}$$

Os parâmetros desta equação são $\bar{t}$ e n .

2.3.4. Modelo combinado PFR+CSTR

Modelos combinados são úteis para finalidades de diagnóstico e para apontar com precisão um escoamento defeituoso e sugerir as possíveis causas. Os modelos de escoamento podem ser de diferentes níveis de sofisticação, que assumem os extremos: escoamento pistonado e escoamento com mistura perfeita. No modelo combinado PFR+CSTR, é considerada uma associação de um vaso com escoamento pistonado (PFR), *plug flow reactor*, com um vaso de mistura perfeita (CSTR), *continuous stirred tank reactor*, conforme a Figura 2.9 onde V é o volume total e v é a vazão (Levenspiel, 2000).

$$\text{Volume total } V \dots = \left\{ \begin{array}{l} V_p \dots \text{região de escoamento pistonado} \\ V_m \dots \text{região de escoamento com mistura perfeita} \\ V_d \dots \text{região de estagnação ou morta, no interior do vaso} \end{array} \right\} V_a \dots \text{volume ativo}$$

Figura 2.9 - Modelo combinado (escoamento pistonado seguido do escoamento mistura perfeita) (Levenspiel, 2000)

A curva de DTR para este modelo é dada pela seguinte equação:

$$E(t) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{t}_M} \exp\left(\frac{-t + \bar{t}_p}{\bar{t}_M}\right) & \text{para } t \geq \bar{t}_p \\ 0 & \text{para } t < \bar{t}_p \end{cases} \quad \text{eq. (2.31)}$$

onde os parâmetros são os tempos médios no tanque de mistura $\bar{t}_M$ e no *reator plug-flow*, $\bar{t}_p$ sendo que $\bar{t}_M = \bar{t}_M + \bar{t}_p$

A maneira mais rápida de distinguir experimentalmente entre os modelos é notar como uma alimentação em pulso de traçador se espalha na medida em que ele se move ao longo de um canal de escoamento. A Figura 2.10 mostra uma comparação de três modelos diferentes: difusão pura, laminar (convecção pura) e dispersão.

Figura 2.10 - Comparação da DTR de três modelos diferentes (Levenspiel, 2000)

2.4. Convolução

Se dois sistemas são diferentes de alguma forma, eles irão ter respostas diferentes, assim a resposta a um pulso caracteriza completamente um sistema. Pelo tanto, se conhecemos a resposta ao pulso de um sistema, temos condições de calcular a resposta deste a qualquer sinal na entrada. Então o sinal de saída é o resultado da

convolução do sinal de entrada com a resposta ao pulso do sistema. A convolução é uma operação matemática onde dois sinais são combinados para gerar um terceiro.

Supondo que introduzimos no vaso o sinal de traçador C_{entrada} , cuja variação com o tempo t seja aquela mostrada na Figura 2.11. Ao passar através do vaso, o sinal será modificado de modo a dar um sinal de saída $C_{\text{saída}}$ variável com o tempo t . Uma vez que o escoamento com esta DTR particular é responsável por esta modificação, vamos relacionar C_{entrada} , $E(t)$ e $C_{\text{saída}}$.

Figura 2.11 - Esquema mostrando a dedução da integral de convolução (Levenspiel, 2000)

Na Figura anterior, observando o traçador que deixa o vaso no instante t (isto é mostrado como o retângulo estreito B), podemos escrever:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Traçador que deixa o sistema} \\ \text{no retângulo } B \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Traçador que entra } t' \text{ segundos antes de } t \\ \text{e que permanece no vaso por um tempo } t' \end{array} \right)$$

O retângulo estreito A representa o traçador que entra t' antes de t . Em termos deste retângulo, a equação acima pode ser escrita como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Traçador que deixa o sistema} \\ \text{no retângulo } B \end{array} \right) = \sum_{\substack{\text{todos os retângulos} \\ A \text{ que entram antes} \\ \text{do tempo } t}} \left(\begin{array}{c} \text{Traçador no} \\ \text{retângulo } A \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Fração de traçador em } A, \\ \text{que permanece no vaso por} \\ t' \text{ segundos} \end{array} \right)$$

Em símbolos e tomando os limites (encolhendo os retângulos), obtemos a relação desejada, que é chamada de integral de convolução (Levenspiel, 2000), onde $E(t)$ é a DTR do vaso determinada pela técnica de pulso.

$$C_{saída}(t) = \int_0^t C_{entrada}(t - t') E(t') dt' \quad \text{eq. (2.32)}$$

e da mesma forma temos:

$$C_{saída}(t) = \int_0^t C_{entrada}(t') E(t - t') dt' \quad \text{eq. (2.33)}$$

então se diz que $C_{saída}$ é a convolução de $C_{entrada}$ com $E(t)$ que, escrevendo de forma concisa, resulta em:

$$C_{saída} = E \cdot C_{entrada} \quad \text{ou} \quad C_{saída} = C_{entrada} \cdot E \quad \text{eq. (2.34)}$$

Na Figura 2.12 se mostra a modificação de um sinal de alimentação de traçador que ocorre passando através de três regiões sucessivas.

Figura 2.12 - Modificação de um sinal de alimentação de traçador, $C_{entrada}$, passando através de três regiões sucessivas. (Levenspiel, 2000)

O sinal de saída $C_{saída}$ pode ser determinado por uma tripla convolução:

$$C_{saída} = C_{entrada} \cdot E_a \cdot E_b \cdot E_c \quad \text{eq. (2.35)}$$

A convolução de sinais pode ser realizada analiticamente através do uso de transformadas de Laplace ou de Fourier. Outra opção é o uso de uma abordagem numérica. A eq.(2.33) pode ser numericamente discretizada na forma (Levenspiel, 2000):

$$C_{saída}(i) = \Delta t \cdot \sum_{j=1}^{i-1} C_{entrada}(i-j) \cdot E(j) \quad \text{eq. (2.36)}$$

onde i e j representam instantes discretos de tempo e Δt é a duração de cada intervalo discreto de tempo. Se o sinal discreto de entrada $C_{entrada}(i)$ e a DTR do vaso $E(j)$ forem conhecidas, então o sinal de saída pode ser determinado numericamente usando a metodologia na tabela 2.1, onde o valor de $C_{saída}$ é a somatória dos termos na respectiva linha.

Tabela 2.1 - Determinação numérica da convolução de sinais

$C_{saída}$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	...
$C_{saída}(i=1) =$	0					
$C_{saída}(i=2) =$	$C_{entrada}(1) \cdot E(1) +$	0				
$C_{saída}(i=3) =$	$C_{entrada}(2) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(1) \cdot E(2) +$	0			
$C_{saída}(i=4) =$	$C_{entrada}(3) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(2) \cdot E(2) +$	$C_{entrada}(1) \cdot E(3) +$	0		
$C_{saída}(i=5) =$	$C_{entrada}(4) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(3) \cdot E(2) +$	$C_{entrada}(2) \cdot E(3) +$	$C_{entrada}(1) \cdot E(4) +$	0	
$C_{saída}(i=6) =$	$C_{entrada}(5) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(4) \cdot E(2) +$	$C_{entrada}(3) \cdot E(3) +$	...	...	
$C_{saída}(i=7) =$	$C_{entrada}(6) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(5) \cdot E(2) +$	...	...	...	...
$C_{saída}(i=8) =$	$C_{entrada}(7) \cdot E(1) +$	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...

2.5. Uso da DTR para cálculo da letalidade em tubo

O conhecimento da DTR no tubo de retenção é fundamental para avaliação do nível do tratamento térmico (letalidade). O tubo de retenção de um pasteurizador pode ser considerado como um reator químico tubular onde ocorre a “reação” de morte de microrganismos. A equação cinética mais usual para a morte de microrganismos em processo térmico é uma cinética de primeira ordem onde os parâmetros são $D(T_{ref})$ e z , como na equação (2.37). Nesta equação, n é a concentração de microrganismos viáveis e Δt é a duração do tratamento (Rao e Loncin, 1974a).

$$\log \left(\frac{n}{n_0} \right) = - \frac{\Delta t}{D(T_{ref})} \text{alog} \left(\frac{T - T_{ref}}{z} \right) \quad \text{eq. (2.37)}$$

O parâmetro $D(T_{ref})$ representa o tempo de tratamento térmico na temperatura de referência (T_{ref}) para obter uma redução decimal na população de microrganismos, ou seja, ter $n/n_0 = 0,10$. O parâmetro z representa a influência da temperatura no valor de D da seguinte forma:

$$\log \left(\frac{D(T)}{D(T_{ref})} \right) = - \left(\frac{T - T_{ref}}{z} \right) \quad \text{eq. (3.38)}$$

Para um processo não isotérmico com um histórico de temperatura $T(t)$, a redução na população de microrganismos é dada por (Rao e Loncin, 1974a):

$$\log \left(\frac{n}{n_0} \right) = - \frac{1}{D(T_{ref})} \int_0^{\infty} \text{alog} \left(\frac{T - T_{ref}}{z} \right) dt \quad \text{eq. (2.39)}$$

Para um processo em tubo de retenção com DTR conhecido no formato $E(t)$, o número de microrganismos viáveis na saída do tubo pode ser obtido da mesma forma que a concentração de um reagente na saída de um reator tubular (Levenspiel, 2000):

$$\frac{n}{n_0} = \int_0^{\infty} \frac{n(t)}{n_0} E(t) dt \quad \text{eq. (2.40)}$$

Substituindo a equação cinética do tratamento térmico (equação (2.37)) na equação (2.40) tem-se (Rao e Loncin, 1974b):

$$\frac{n}{n_0} = \int_0^{\infty} \text{alog} \left[-\frac{1}{D(T_{ref})} \text{alog} \left(\frac{T(t) - T_{ref}}{z} \right) \right] E(t) dt \quad \text{eq. (2.41)}$$

Esta integral pode ser avaliada numericamente e é necessário o conhecimento do histórico de temperatura $T(t)$ e da curva da DTR do tubo, $E(t)$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi dividido em três etapas:

Na primeira etapa, para estudar a variação da condutividade elétrica da solução em função da concentração do traçador e de temperatura e concentração, foi construída a curva de calibração para o traçador cloreto de sódio em solução aquosa.

Na segunda etapa, foi estudada a distribuição de tempo de residência, inicialmente no sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro) e posteriormente em cada parte do pasteurizador (tubo de retenção 1, tubo de retenção 2 e trocador de calor a placas com diferentes configurações).

Na terceira parte, foi estudada a distribuição de tempos de residência no processo de pasteurização completo.

Os materiais, equipamentos e reagentes utilizados são listados abaixo e os métodos utilizados são descritos separadamente para cada etapa do processo.

3.1. Materiais e Equipamentos

✓ Trocador de calor ARMFIELD, modelo FT-43 A, tipo placas, de laboratório, com acessórios e componentes: unidade processadora de pasteurização, console de controle, unidade de refrigeração modelo FT61-B, interface de aquisição de dados ARMFIELD, modelo FT43 A-90 IFD. Especificações:

- Bomba de alimentação; peristáltica marca MASTERFLEX, capacidade máxima 30L/h;
- Controlador de temperatura de pasteurização: microprocessador com ação PID para o aquecedor da água, faixa de 0 a 95 °C;
- Placas lisas de aço inoxidável AISI 316, com gaxetas em silicone sanitário; área de troca térmica 50 cm²;

- Sensores de temperatura; seis termopares providos de poço inoxidável para uso em seis possíveis pontos de medição;
- Sistema de aquecimento: bomba centrífuga de circulação de água quente aquecida por uma resistência elétrica de capacidade 1,5 kW. A vazão de água quente é variável através da válvula de agulha do rotâmetro até 1,5 L/min;
- Tanque de alimentação com capacidade de 4 litros;
- Tubos de retenção: “S” 75 cm³, Helicoidal 200 cm³;
- Sistema de resfriamento ARMFIELD modelo FT-61 com bomba centrífuga interna e resfria até 4 °C;

Figura 3.1 - Pasteurizador de laboratório ARMFIELD modelo FT-43 e placas do trocador de calor

- ✓ Balança marca CHYO, modelo JK-200, precisão 0,0001g;
- ✓ Balança marca METTLER, modelo PE 11, precisão 0,1g;
- ✓ Banho de água termostaticado, marca UNITEMP, modelo 112/2, 1000kW.
- ✓ Cronômetro analógico com precisão de 0,1s;
- ✓ Máquina de cubos de gelo, marca EVEREST, modelo EGC 50;
- ✓ Termômetro de mercúrio de precisão 0,1 °C, marca INCOTERM, modelo 1056;

- ✓ Termômetro digital marca INSTRUTHERM, modelo Th 1200C, com sensor de temperatura termopar tipo K com junta exposta e precisão 0,1 °C;
- ✓ Condutivímetro marca YSI Modelo 3200, para determinação da condutividade elétrica de líquidos com as seguintes especificações:
 - Constante de célula auto-ajustável 0,005 a 100;
 - Leitor de unidades seletivo: uS/cm, uS, ppt, ohm-cm, ohm,TDS;
 - Porta serial RS232. para comunicação com o computador;
 - Escala da condutividade elétrica 0 μ S a 3,00 S;

Figura 3.2 - Condutivímetro YSI Modelo 3200

- ✓ Célula de condutividade elétrica YSI modelo 3445:
 - Tipo de célula: fluxo;
 - Material: Pyrex 7740;
 - Dimensões: Comprimento total 146 mm, diâmetro externo máximo 19 mm e diâmetro interno da câmara 10 mm;
 - Volume interno 15 mL;
 - Cabo e adaptador de célula YSI modelo 3232;

Figura 3.3 - Célula YSI modelo 3445

- ✓ Vidraria comum de laboratório.
- ✓ Seringas de volume de 1 mL (tipo “insulina”).

3.2. Reagentes

- ✓ Soluções aquosas de cloreto de sódio (PA) de 0,25 g/L; 0,5 g/L; 0,75 g/L; 1,00 g/L; 1,25 g/L; 1,50 g/L; 1,75 g/L.
- ✓ Solução aquosa saturada de cloreto de sódio.

3.3. Metodologia

3.3.1. *Curvas de calibração para o traçador*

As curvas de calibração para o traçador foram obtidas para estudar a variação da condutividade elétrica da solução com a temperatura e a concentração de cloreto de sódio. Soluções de cloreto de sódio com diferentes concentrações de cloreto de sódio foram carregadas na célula do condutivímetro e mergulhadas num banho termostático a temperaturas controladas no intervalo de 15 °C a 32 °C.

Para poder esfriar o banho do termostato até a temperatura de 15 °C foi necessária a adição de cubos de gelo.

A mudança de temperatura dentro da célula foi registrada com ajuda de um termômetro digital provido de um termopar com cabo flexível que permitiu ser introduzido no orifício da célula como é mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Esquema dos ensaios das curvas de calibração para o traçador

Os dados de condutividade elétrica obtidos durante este procedimento foram registrados em um condutivímetro YSI 3200 e recolhidos manualmente.

Para a obtenção das curvas de calibração foram testadas soluções de cloreto de sódio de concentrações de 0,25 g/L, 0,5 g/L, 0,75 g/L, 1,00 g/L, 1,25 g/L, 1,50 g/L e 1,75 g/L.

A construção das curvas de calibração seguiu os seguintes itens:

- a) Para cada concentração foi feito um gráfico de condutividade elétrica vs. temperatura, e obtida uma equação de linearidade do tipo:

$$y = A + Bx \quad \text{eq. (3.1)}$$

onde “y” é a condutividade elétrica e “x” a temperatura.

- b) Os valores de A e B obtidos no item (a) foram graficados em função das concentrações “ c ” e ajustados em curvas polinomiais do tipo:

$$A = a_1c + a_2c^2 \quad \text{eq. (3.2)}$$

$$B = b_1c + b_2c^2 \quad \text{eq. (3.3)}$$

respectivamente, obtendo valores específicos para os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 . O formato destas equações foi escolhido com base no comportamento observado experimentalmente.

- c) O correlacionamento entre a condutividade elétrica, concentração e temperatura foi realizado utilizando a seguinte equação:

$$\text{Condutividade}_{\text{calculada}} = A + BT \quad \text{eq. (3.4)}$$

$$\text{Condutividade}_{\text{calculada}} = (a_1c + a_2c^2) + (b_1c + b_2c^2)T \quad \text{eq. (3.5)}$$

onde “ c ” é a concentração e “ T ” a temperatura. Com esta equação foi possível ter uma relação de dados da condutividade elétrica experimental com a condutividade elétrica calculada.

- d) A partir da equação (3.6) foi possível obter valores de concentração a partir de dados de condutividade elétrica, temperatura, usando os parâmetros já ajustados a_1 , a_2 , b_1 e b_2 .

$$\text{Concentração} = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad \text{eq. (3.6)}$$

onde:

$$\alpha = a_2 + b_2 T$$

$$\beta = a_1 + b_1 T$$

$$\gamma = -\text{condutividade}$$

3.3.2. Distribuição do tempo de residência

Foi utilizado um método genérico para todos os ensaios experimentais. As curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) para cada ensaio foram obtidas através da técnica condutimétrica.

Em uma corrente de alimentação de água com concentração entre 0,5 e 1,0 g/L de cloreto de sódio circulando a uma vazão constante predeterminada, sem a presença de bolhas internas, foi provocada uma perturbação em forma de pulso por meio da injeção de um traçador que elevou a condutividade elétrica do fluido.

O traçador injetado na corrente foi uma solução saturada de cloreto de sódio com volume de 0,05 mL, com a ajuda de uma seringa (tipo insulina) perfurando o tubo de silicone.

Um condutivímetro on-line (YSI 3200) com célula de escoamento (YSI 3445) monitorou e registrou a condutividade elétrica ao longo do tempo na saída do processo (frequência de aquisição: 1 s).

A temperatura foi registrada dentro da célula usando termômetro digital, como na Figura 3.4.

Para estudar a influência da vazão na distribuição do tempo de retenção, para o caso do sistema de aquisição de dados e tubos de retenção 1 e 2, foram testadas seis vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h. Para o estudo do trocador de calor a placas e do processo de pasteurização, foram testadas três vazões de 15, 20 e 25 L/h que são vazões típicas de operação do equipamento. Todas estas vazões foram verificadas com a ajuda de um rotâmetro calibrado adicionado ao equipamento de pasteurização do laboratório (ARMPFIELD, modelo FT-43 A).

Para o estudo de tempos de residência, as variáveis calculadas a partir dos dados experimentais de condutividade elétrica, temperatura e tempo foram as seguintes:

$E(t)$, $F(t)$, θ , $E(\theta)$ e $\bar{t}$.

Valores de concentração do traçador foram calculados com a equação (3.6) usando os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 da curvas de calibração do traçador.

Valores de $E(t)$ e $F(t)$ foram calculados com as equações (2.2) e (2.12) respectivamente. As integrais foram avaliadas pelo método numérico de trapézios usando software Excel (Microsoft). O tempo médio de residência ($\bar{t}$) foi calculado mediante a equação (2.6).

Valores de tempos adimensionais (θ) foram obtidos com a equação (2.14) e os valores de $E(\theta)$ com a equação (2.15). Também foram feitas as respectivas verificações das equações (2.3) e (2.16).

Um exemplo da forma de cálculo utilizada para cada ensaio é apresentado no anexo A (Exemplo de uma planilha de cálculo para obter $E(t)$, $F(t)$, $E(\theta)$ e $\bar{t}$ a partir de dados experimentais), onde a interpretação de $\int_1$, $\int_2$, e $\int_3$ é a seguinte:

$$\int_1 = \int_0^{\infty} C(t) dt = \sum_i \left(\left(\frac{C_{i+1} + C_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right) \quad \text{eq.(3.7)}$$

$$\int_2 = \int_0^{\infty} E(t) dt = \sum_i \left(\left(\frac{E_{i+1} + E_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right) \quad \text{eq.(3.8)}$$

$$\int_3 = \int_0^{\infty} tE(t) dt = \sum_i \left(\left(\frac{(E_{i+1}t_{i+1}) + (E_it_i)}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right) \quad \text{eq.(3.9)}$$

Com os valores obtidos deste tipo de planilha de cálculo (anexo A) é possível obter diferentes curvas típicas de DTR em resposta ao pulso provocado pela injeção do traçador na entrada do processo.

A Figura 3.5 ilustra exemplos de curvas de DTR obtidas.

Figura 3.5 – Exemplo de curvas típicas de DTR para injeção de um traçador em pulso.

a) Curva $E(t)$; b) Curva $F(t)$

Estas curvas fornecem o grau de dispersão ou mistura no escoamento, o tempo mínimo de residência (importante para processos de tratamento térmico) e o grau de assimetria da distribuição.

Como o volume da célula do condutivímetro não é desprezível frente ao volume dos processos analisados, deve-se considerar sua influência sobre a curva de DTR obtida experimentalmente. A Figura 3.6 mostra um exemplo da interferência da célula na determinação da DTR de um processo genérico. Deseja-se obter a curva E do centro da figura, mas tem-se a curva à direita que tem atraso e dispersão maiores.

Figura 3.6 - Influência da célula do sistema de aquisição na determinação de uma DTR.

A curva de DTR obtida experimentalmente pode ser considerada como sendo a convolução da curva do processo com a curva da célula do sistema de aquisição. Então, conhecida a DTR do sistema de aquisição, pode-se fazer uma operação de deconvolução na curva de saída para retirar a interferência do sistema de aquisição. Esta operação matemática não é simples, especialmente quando os dados são discretos.

A solução foi a seguinte: 1) foi utilizada uma curva teórica para representar a DTR do processo e faz-se a sua convolução numérica com a DTR do sistema de aquisição; 2) sobrepõem-se a curva obtida aos dados experimentais e compara-se ambos; 3) ajustou-se os parâmetros do modelo teórico de forma a melhorar a aproximação da curva convolucionada com os dados experimentais. Este ajuste do modelo é feito de forma sistemática resolvendo o problema de otimização da equação (2.17) minimizando a somatória do erro quadrático entre dados experimentais e calculados da curva $E(t)$. Foi utilizado o software Excel para esta tarefa, nele é feita a convolução da curva teórica com a DTR do sistema de aquisição como na tabela 2.1 e a ferramenta Solver foi usada para ajustar os parâmetros para minimizar o erro. Para a representação do modelo matemático e da sua convolução é utilizado um intervalo $\Delta t = 0,05$ s.

3.3.3. Distribuição do tempo de residência do sistema de aquisição

Para estudar a DTR do sistema de aquisição de dados de condutividade elétrica (célula do condutivímetro) foi aplicado o método descrito no item (3.3.2) descrito anteriormente, com exceção da etapa de convolução numérica.

O esquema utilizado para estes ensaios é apresentado nas Figura 3.7 e 3.8, tendo cuidado de fazer a injeção do traçador de forma instantânea e o mais próximo possível da entrada na célula do condutivímetro.

Figura 3.7 – Esquema dos ensaios do estudo experimental do comportamento do sistema de aquisição.

Figura 3.8 – Fotografia dos ensaios para o estudo do sistema de aquisição.

Foram testadas as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h. Foram feitas oito repetições para cada vazão, as quais foram ajustadas a dois modelos matemáticos fazendo uso de planilhas eletrônicas do Excel (Microsoft) e da sua ferramenta Solver, tendo como variáveis os parâmetros do modelo matemático a ser ajustado e como objetivo a minimização da somatória de desvios entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo matemático utilizado.

Os modelos matemáticos testados foram:

- ✓ Modelo (2.3.2) N tanques em série, calculado com a equação (2.24)
- ✓ Modelo (2.3.1) de dispersão axial, calculado com a equação (2.23)

O melhor modelo ajustado foi determinado com a equação (2.17).

Na Figura 3.9, é apresentado um exemplo do ajuste dos dois modelos matemáticos utilizados nos dados experimentais de um ensaio da célula do condutivímetro.

Figura 3.9 –Exemplo de dados experimentais do sistema de aquisição com ajuste de dois modelos matemáticos (N tanques em série e dispersão axial Pe)

3.3.4. Distribuição do tempo de residência dos tubos de retenção

Nos ensaios de distribuição do tempo de residência tanto no tubo de retenção 1 (tubo “S” 75 cm³), como no tubo de retenção 2 (tubo Helicoidal 200 cm³), foi utilizado o método descrito no item (3.3.2). Foram estudadas seis vazões: 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h e para cada vazão foram feitas três repetições.

Para este estudo experimental, foi necessário injetar o traçador o mais próximo possível da entrada do tubo de retenção e colocar o sistema de aquisição de dados imediatamente depois da saída do mesmo como é mostrado na Figura 3.10.

A Figura 3.11 mostra fotos dos tubos de retenção 1 (curva em “S” com 75 mL) e 2 (helicoidal com 200 mL).

Figura 3.10 – Esquema dos ensaios experimentais para o estudo do comportamento do tubo de retenção

Figura 3.11 – Fotografias dos ensaios de DTR nos tubos de retenção 1 e 2

Modelos matemáticos teóricos para DTR dos tubos foram ajustados conforme procedimento descrito em (3.3.2) onde a convolução da curva teórica com a DTR do sistema de aquisição para a mesma vazão deve se aproximar ao máximo do conjunto de pontos experimentais.

O modelo que melhor se ajusta é aquele que tiver menor somatória de erros quadráticos entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo matemático testado (equação 2.17).

Os modelos testados em cada tubo de retenção foram:

- ✓ Modelo laminar modificado (2.3.3)
- ✓ Modelo de N tanques em série (2.3.2)
- ✓ Modelo de dispersão axial (2.3.1)
- ✓ Modelo combinado PFR+CSTR (2.3.4)

Na Figura 3.12 é apresentado um exemplo de dados experimentais de um ensaio com ajuste dos quatro modelos matemáticos mencionados. São apresentadas também as curvas convolucionadas onde é possível ver que se aproximam bem dos pontos experimentais.

Figura 3.12 – Exemplo de dados experimentais de um ensaio do tubo de retenção 1 ajustados com convolução aos quatro modelos matemáticos (modelo laminar modificado, modelo de N tanques em série, modelo de dispersão axial e modelo combinado PFR+CSTR)

3.3.5. Distribuição do tempo de residência do trocador de calor a placas

Para o estudo da distribuição de tempos de residência no trocador de calor a placas, foi verificada a influência da configuração do trocador de calor a temperatura constante. Foram estudadas configurações de arranjos em série com número par de passes de 2x1; 4x1; 6x1; 8x1; 10x1; 12x1; 14x1; 16x1 e 18x1, pois são os arranjos de passes mais usados na operação do equipamento.

Sua configuração padrão é 6x1/6x1 (aquecimento), 10x1/10x1 (regeneração) e 4x1/4x1 (resfriamento).

Para cada uma das configurações, foram testadas três vazões: 15, 20 e 25 L/h. Para cada estudo foram feitas quatro repetições e o método utilizado para a DTR foi o método descrito no item (3.3.2).

Um esquema similar à Figura 3.10 foi utilizado para o estudo experimental do trocador de calor a placas, neste caso, substituindo somente o tubo de retenção pelo trocador de calor e tomando em conta as mesmas recomendações na injeção do traçador (ver Figura 3.13).

Figura 3.13 – Fotografia de um ensaio de DTR no trocador de calor a placas.

Como no caso do estudo da DTR dos tubos de retenção, no trocador de calor a placas também foi necessário fazer uma convolução do modelo matemático com a DTR ajustada para o sistema de aquisição de dados na mesma vazão, e a respectiva comparação desta convolução com os dados experimentais obtidos.

Os modelos testados para o trocador de calor a placas foram:

- ✓ Modelo laminar modificado (2.3.3)
- ✓ Modelo de N tanques em série (2.3.2)
- ✓ Modelo de dispersão axial (2.3.1)
- ✓ Modelo combinado PFR+CSTR (2.3.4)

O modelo melhor ajustado é aquele que tiver menor somatória de erros entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo matemático (equação 2.17).

3.3.6. Distribuição do tempo de residência do processo de pasteurização

Para o estudo da distribuição de tempos de residência no processo de pasteurização foi utilizado o pasteurizador de laboratório ARMFIELD modelo FT-43, no arranjo padrão do equipamento para leite: tubo de retenção 1 e trocador de calor a placas com configuração de arranjos em série com número par de placas de 6x1/6x1 (aquecimento), 10x1/10x1 (regeneração) e 4x1/4x1 (resfriamento).

Para o estudo experimental do processo de pasteurização, a injeção do traçador é feita na entrada do fluido no trocador de calor a placas na etapa de regeneração térmica (Figuras 1.5 e 3.14), e o sistema de aquisição de dados é colocado imediatamente depois da saída de trocador de calor da etapa de resfriamento. Na Figura 3.14 não é possível ver a injeção do traçador (seringa), pois a mesma está localizada atrás do trocador de calor a placas.

Figura 3.14 – Fotografia de um ensaio de DTR no pasteurizador Armfield FT 43

Verificou-se a influência da vazão no processo. Foram testadas vazões de 15, 20 e 25 L/h. Para cada estudo, foram feitas quatro repetições e o método utilizado foi o método descrito no item (3.3.2). Assim como nos estudos anteriores, foi feita a respectiva convolução numérica do modelo matemático com a DTR ajustada para o sistema de aquisição na mesma vazão, e a respectiva comparação desta convolução com os dados experimentais obtidos.

Os modelos testados para o pasteurizador foram:

- ✓ Modelo laminar modificado (2.3.3)
- ✓ Modelo de N tanques em série (2.3.2)
- ✓ Modelo de dispersão axial (2.3.1)
- ✓ Modelo combinado PFR+CSTR (2.3.4)

Os critérios de ajuste de modelos matemáticos, igual aos procedimentos anteriores foi a menor somatória de erros quadráticos entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo testado (equação 2.17).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Curvas de calibração do traçador

As curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio, obtidas mediante o método descrito no item (3.3.1) são apresentadas na Figura 4.1 onde se observa a variação da condutividade elétrica em relação à temperatura à diferentes concentrações de traçador. Como é esperado, a condutividade elétrica aumenta com a concentração e com a temperatura devido aumento no número de íons disponíveis e na agitação térmica, respectivamente.

Figura 4.1 – Curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio

Seguindo o método descrito no item (3.3.1), obtiveram-se dois gráficos para o ajuste das equações (3.2) e (3.3) e determinação dos parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 , os mesmos que são apresentados na Figura 4.2 com seus respectivos valores de coeficientes de determinação linear (R^2).

Figura 4.2 – Gráficos de ajuste das equações (3.2), (3.3) e os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 para a construção das curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio

Os parâmetros ajustados a_1 , a_2 , b_1 e b_2 para a obtenção da condutividade elétrica em função da concentração e temperatura, são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados para as curvas de calibração do traçador cloreto de sódio

Parâmetros ajustados para as equações (3.2) e (3.3)	
a_1	9,23E+02
a_2	-5,23E+01
b_1	4,28E+01
b_2	-2,42E+00
As unidades das variáveis nas equações (3.2) e (3.3) são (μS/cm) para condutividade elétrica; g/L para a concentração e °C para a temperatura.	

A variação da condutividade elétrica com a temperatura e concentração do traçador cloreto de sódio em solução aquosa é então calculada com a equação empírica (4.1), onde as unidades são: c (g/L), T (°C) e condutividade elétrica (μS/cm).

$$\text{Condutividade} = (923,23c - 52,31c^2) + (42,82c - 2,42c^2)T \quad \text{eq.(4.1)}$$

$$\text{para } 15^\circ\text{C} \leq T \leq 32^\circ\text{C} \text{ e } 0,75\text{g/L} \leq c \leq 1,75\text{g/L}$$

Escrevendo esta equação em termos da concentração, tem-se a equação (4.2). Esta equação é usada da seguinte forma: para uma dada temperatura T (°C) e condutividade elétrica da solução ($\mu\text{S/cm}$) medidas experimentalmente, a equação fornece o valor da concentração de traçador, $c(\text{g/L})$.

$$c = \frac{-(-52,31 - 2,42T) + \sqrt{(923,30 + 42,85T)^2 - 4(-52,31 - 2,42T)(-Conductiv)}}{2(-52,31 - 2,42T)} \quad \text{eq. (4.2)}$$

para $443\mu\text{S/cm} \leq \text{Conductiv} \leq 3829\mu\text{S/cm}$ e $15^\circ\text{C} \leq T \leq 32^\circ\text{C}$

O gráfico de paridade dos dados de concentração experimentais e dos dados de concentração calculado com a equação (4.2) é apresentado na Figura 4.3, onde verifica-se um bom ajuste utilizando os quatro parâmetros na equação (4.1). O erro absoluto médio na determinação da concentração é 3,6%.

Figura 4.3 –Paridade dos dados calculados com os dados reais de concentração de cloreto de sódio

4.2. Distribuição do tempo de residência do sistema de aquisição

Utilizando o método descrito no item (3.3.3) foi determinada a DTR do sistema de aquisição de dados de condutividade elétrica. Foram testadas as vazões de 10, 15,

20, 25, 30 e 35 L/h. Como a passagem do traçador pela célula do condutivímetro é tão rápida (tempo médio entre 2 e 5 s) quanto a frequência da aquisição de dados (um dado por segundo), foi necessário realizar cada ensaio oito vezes para identificar o comportamento médio.

Os resultados dos ajustes dos dois modelos de N tanques em série e dispersão axial aos dados experimentais do sistema de aquisição, são apresentados para cada uma das seis vazões estudadas nas tabelas 4.2 a 4.7.

O tempo de residência médio foi determinado através dos pontos experimentais usando a equação (2.7). Nas tabelas, o termo Σerro representa a somatória do erro quadrático minimizado através da equação (2.17). Os parâmetros ajustados foram N e Pe nas equações (2.24) e (2.22), respectivamente.

A temperatura média na célula foi de 24,1 °C.

Tabela 4.2 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 10 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	5,4	5,1	24,8	7,8	0,1
	5,4	4,9	80,3	7,8	0,5
	5,3	5,7	62,1	8,7	0,4
	4,1	3,6	23,8	4,6	0,1
	5,3	3,7	29,4	4,8	0,1
	5,3	2,9	37,3	3,5	0,1
	5,4	4,5	62,6	6,9	0,3
	4,7	3,1	56,8	4,7	4,0
Médias	5,1	4,2	47,1	6,1	0,7
Desvio padrão	0,5	1,0	21,1	1,9	1,3

Tabela 4.3 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 15 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	3,8	4,6	16,1	6,4	0,0
	3,6	4,0	14,1	5,7	0,1
	4,1	7,0	20,7	12,3	0,1
	4,5	3,0	59,7	3,8	0,2
	4,2	2,9	2,9	4,8	0,0
	4,8	4,5	73,1	7,4	0,7
	4,3	1,9	76,8	4,9	0,1
	2,9	1,9	9,5	1,3	0,0
Médias	4,0	3,7	34,1	5,8	0,2
Desvio padrão	0,6	1,7	30,4	3,2	0,2

Tabela 4.4 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 20 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	2,8	3,8	24,0	6,0	0,1
	3,0	5,7	52,8	8,8	0,3
	3,2	7,0	9,4	11,5	0,0
	4,3	5,7	35,7	8,9	0,2
	2,8	1,9	5,3	2,7	0,0
	3,7	1,9	96,9	5,9	0,2
	3,7	1,9	86,8	6,4	0,2
	3,9	6,8	26,0	11,0	0,1
Médias	3,4	4,3	42,1	7,6	0,2
Desvio padrão	0,6	2,2	34,2	2,9	0,1

Tabela 4.5 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 25 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	3,9	11,0	401,8	19,7	3,4
	2,8	7,7	12,4	12,5	0,0
	3,1	6,1	33,5	9,5	0,2
	2,5	3,2	1,3	4,5	0,0
	3,2	5,7	31,8	8,3	0,2
	2,6	1,9	48,5	7,4	0,2
	2,3	1,9	2,8	3,8	0,0
	3,1	5,3	40,3	8,0	0,2
Médias	3,0	5,3	71,6	9,2	0,5
Desvio padrão	0,5	3,1	134,6	5,0	1,2

Tabela 4.6 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 30 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	$\sum \text{erro}^2$	Pe	$\sum \text{erro}^2$
	2,7	2,2	3,8	12,8	0,2
	1,5	3,7	3,4	3,1	0,0
	2,9	6,8	35,1	10,9	0,2
	2,0	80,3	0,9	14,4	0,0
	3,0	6,7	6,2	13,2	0,2
	3,3	5,6	253,8	8,3	2,3
	2,9	9,8	10,9	12,3	0,1
	2,1	4,7	5,3	8,1	0,0
Médias	2,6	15,0	39,9	10,4	0,4
Desvio padrão	0,6	26,5	87,1	3,7	0,8

Tabela 4.7 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 35 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	$\sum \text{erro}^2$	Pe	$\sum \text{erro}^2$
	2,7	8,0	36,6	12,8	0,2
	2,1	6,6	0,5	11,7	0,0
	2,4	7,5	0,7	11,4	0,0
	1,8	2,6	5,0	3,1	0,0
	2,2	2,4	2,2	4,4	0,0
	1,9	3,2	0,6	6,7	0,0
	1,8	2,4	0,6	3,2	0,0
	2,4	3,3	1,0	5,4	0,0
Médias	2,2	4,5	5,9	7,3	0,0
Desvio padrão	0,3	2,4	12,5	4,0	0,1

Foi possível identificar mediante a análise das médias da somatória de erros que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais do sistema de aquisição, nas seis vazões, foi o modelo de dispersão axial, cujo parâmetro é o número de Peclet, Pe .

Nas Figuras 4.4 a 4.9 se apresenta o melhor modelo ajustado junto aos dados experimentais para cada uma das seis vazões estudadas.

Figura 4.4 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 10 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.5 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 15 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.6 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 20 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.7 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 25 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.8 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 30 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.9 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 35 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

A variabilidade dos dados experimentais foi grande por diferentes motivos: pela dinâmica do sistema de aquisição, já que o registro da variação da condutividade não é instantâneo; pela não idealidade da injeção do traçador; pelo formato que apresenta a célula do condutivímetro (expansão na entrada e contração na saída) que provoca volumes mortos que atrasam a saída do traçador, e também devido ao volume reduzido da célula o tempo de residência é da mesma ordem de grandeza do que o tempo de amostragem, o que dificulta a obtenção de dados confiáveis.

Na análise dos tempos médios experimentais do sistema de aquisição, determinou-se uma equação de variabilidade do tempo de residência médio em função da vazão. Esta equação foi obtida mediante o ajuste do gráfico dos valores de tempos médios experimentais de todos os ensaios em função da vazão.

O tipo de equação que ficou melhor ajustada foi do tipo potência, como foi observada na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Variação de tempos médios experimentais do sistema de aquisição de dados com a vazão.

Então, a equação (4.3) define a relação do tempo médio experimental com a vazão, para o sistema de aquisição de dados.

$$\bar{t} = 10,38 \, v^{-0,667} \quad \text{eq. (4.3)}$$

onde: v = vazão volumétrica (mL/s)

$\bar{t}$ = Tempo de residência médio (s)

De acordo com a equação (2.1), que define o tempo espacial, esperava-se que o tempo de residência médio fosse igual a $15,0 \text{ } v^{-1,0}$, já que o volume interno da célula é de 15 mL. A diferença em relação ao obtido na equação (4.3) pode ser explicada pela proximidade da velocidade de passagem do traçador pela célula com a velocidade da aquisição de dados. As curvas de DTR para resposta ao estímulo em pulso nas figuras 4.4 a 4.9 são resultado não só do escoamento dentro da célula, mas também da dinâmica de funcionamento do sistema de aquisição.

Fazendo uma análise do melhor modelo ajustado, entre as seis vazões testadas para o estudo do sistema de aquisição de dados, se observou que existe uma variabilidade pequena entre todos os valores obtidos para o número de Pe , isto quer dizer que o valor deste parâmetro não é influenciado pela vazão na faixa de operação testada.

Pelo tanto, o valor do parâmetro Pe a ser utilizado para representar o modelo matemático melhor ajustado para o sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro), foi determinado obtendo um valor médio entre os valores de Pe obtidos para cada vazão.

Na tabela 4.8 são apresentados os valores médios do número de Pe que caracteriza o modelo de dispersão axial junto aos valores de tempos médios de residência obtidos para cada vazão estudada através da equação (4.3).

Estes valores serão posteriormente utilizados para fazer a convolução de todos os dados medidos pelo sistema de aquisição de dados, a uma vazão determinada, conforme descrito no item 3.3.2 do texto.

Tabela 4.8 – Valores dos parâmetros do modelo de dispersão axial para o sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro)

Vazão (L/h)	$\bar{t}$ (s)	Pe
10	5,3	7,8
15	4,0	7,8
20	3,3	7,8
25	2,9	7,8
30	2,5	7,8
35	2,3	7,8

A tabela 4.9 apresenta os valores de tempos de residência médios e os tempos espaciais (calculados com a equação (2.1)), para o sistema de aquisição de dados, juntamente com as porcentagens da discrepância entre os dois valores.

Tabela 4.9 – Tempos médios de residência, tempos espaciais e as porcentagens de discrepância para o sistema de aquisição de dados

Vazão (L/h)	Tempo médio de residência $\bar{t}$ (s)	Tempo espacial τ (s)	% de discrepância
10	5,3	5,4	2,8
15	4,0	3,6	10,2
20	3,3	2,7	18,4
25	2,9	2,2	24,3
30	2,5	1,8	28,7
35	2,3	1,5	32,3

Os valores elevados de discrepância devem estar associados às dificuldades mencionadas anteriormente como o formato da célula e as condições de medição de dados experimentais: O desvio é tão maior quanto a vazão, pois nas maiores vazões o tempo de residência médio (2,3 s) é muito próximo da taxa de amostragem (1 s).

4.3. Distribuição do tempo de residência dos tubos de retenção

Os resultados detalhados para a DTR nos tubos de retenção 1 e 2, obtidos nos ajustes com convolução de cada um dos ensaios nos quatro modelos matemáticos e testados para as seis vazões, são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12 respectivamente. Nestas figuras são mostrados os valores de todos os parâmetros de cada um dos modelos matemáticos ajustados em suas formas dimensionais e a somatória dos erros quadráticos para cada ensaio realizado.

A temperatura média para os ensaios foi de 24,2 °C para o tubo de retenção 1 e 25,1 °C para o tubo de retenção 2. A variação do número de Reynolds (densidade * velocidade * diâmetro / viscosidade) foi de 326,7 a 1143,6 para o tubo de retenção 1 e de 392,1 a 1372,3 para o tubo de retenção 2.

Vazão 10 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
1	14,5	2,5	0,5	1	18,2	59,3	9,0	1	23,6	11,5	2,5	1	36,4	34,7	0,4
7	13,5	3,1	0,8	7	17,0	59,4	5,2	7	18,6	27,2	3,7	7	36,1	19,3	0,8
13	14,3	3,8	0,4	13	17,5	59,4	4,3	13	18,6	37,3	4,1	13	37,6	17,4	1,2
Média	14,1	3,1	0,6	Média	17,6	59,4	6,1	Média	20,3	25,3	3,4	Média	36,7	23,8	0,8
Desvpad	0,5	0,6	0,2	Desvpad	0,6	0,1	2,5	Desvpad	2,9	13,0	0,8	Desvpad	0,8	9,5	0,4
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
2	10,5	3,8	2,2	2	12,8	59,4	4,2	2	13,4	50,8	5,5	2	42,7	16,7	1,9
8	10,9	4,2	5,7	8	13,1	59,5	7,8	8	13,5	58,2	6,9	8	42,9	18,1	6,9
14	11,6	4,1	1,2	14	14,1	59,4	3,7	14	14,8	37,3	3,1	14	45,8	20,1	1,8
Média	11,0	4,0	3,0	Média	13,3	59,4	5,2	Média	13,9	48,8	5,2	Média	43,8	18,3	3,5
Desvpad	0,6	0,2	2,4	Desvpad	0,7	0,0	2,2	Desvpad	0,8	10,6	1,9	Desvpad	1,7	1,7	2,9
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
3	8,3	4,2	1,6	3	10,0	59,4	5,2	3	10,4	46,1	4,2	3	43,7	20,0	2,8
9	9,5	7,6	4,0	9	10,8	59,5	6,3	9	11,0	68,2	6,8	9	49,0	16,6	4,5
15	8,0	5,9	1,1	15	9,5	59,4	4,0	15	9,8	51,4	6,8	15	44,4	10,0	1,8
Média	8,6	5,9	2,3	Média	10,1	59,4	5,1	Média	10,4	55,2	5,9	Média	45,7	15,5	3,0
Desvpad	0,8	1,7	1,6	Desvpad	0,7	0,0	1,2	Desvpad	0,6	11,6	1,5	Desvpad	2,9	5,1	1,4
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
4	6,8	5,0	5,2	4	8,1	59,5	5,1	4	8,1	65,9	3,3	4	43,8	16,3	4,9
10	6,1	6,3	0,8	10	7,2	59,4	2,9	10	7,3	69,3	6,6	10	41,9	8,6	1,2
16	6,0	3,7	2,6	16	7,5	59,4	8,2	16	7,8	36,7	2,7	16	40,1	16,5	2,0
Média	6,3	5,0	2,9	Média	7,6	59,5	5,4	Média	7,7	57,3	4,2	Média	42,0	13,8	2,7
Desvpad	0,4	1,3	2,2	Desvpad	0,5	0,0	2,7	Desvpad	0,4	17,9	2,1	Desvpad	1,9	4,5	1,9
Vazão 30 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
5	5,4	4,6	12,2	5	6,6	59,5	12,2	5	6,6	62,3	7,6	5	44,4	13,7	10,8
11	5,2	10,4	10,6	11	5,9	59,5	25,2	11	5,8	1921,2	8,7	11	43,5	4,8	11,0
17	5,3	7,5	8,7	17	6,1	59,5	19,2	17	6,1	431,7	10,0	17	43,8	7,2	8,8
Média	5,3	7,5	10,5	Média	6,2	59,5	18,9	Média	6,2	805,1	8,8	Média	43,9	8,5	10,2
Desvpad	0,1	2,9	1,8	Desvpad	0,4	0,0	6,5	Desvpad	0,4	984,1	1,2	Desvpad	0,4	4,6	1,2
Vazão 35 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
6	4,9	3,9	6,2	6	5,8	59,5	13,9	6	6,1	47,2	10,0	6	46,8	17,0	5,3
12	5,3	29,1	3,3	12	5,7	59,5	12,7	12	5,5	1072,8	2,6	12	51,7	1,9	3,3
18	4,9	6,6	0,8	18	5,5	59,5	1,2	18	5,4	161,9	4,8	18	47,4	9,1	0,5
Média	5,0	13,2	3,4	Média	5,7	59,5	9,3	Média	5,7	427,3	5,8	Média	48,6	9,4	3,0
Desvpad	0,3	13,8	2,7	Desvpad	0,1	0,0	7,0	Desvpad	0,4	562,0	3,8	Desvpad	2,7	7,6	2,4

Figura 4.11 – Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 1 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.

Cabe indicar, que todos os termos presentes nas tabelas das Figuras 4.11 e 4.12 fazem referência aos parâmetros dos modelos matemáticos ajustados.

Vazão 10 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
1	39,5	4,6	0,7	1	45,6	59,4	4,2	1	47,7	64,2	6,0	1	106,9	38,5	1,7
7	38,6	4,7	1,0	7	44,6	59,4	4,8	7	46,1	70,3	5,7	7	105,6	33,3	1,6
13	38,2	4,6	0,6	13	44,3	59,4	4,4	13	45,5	77,9	5,4	13	102,8	36,2	1,8
Média	38,8	4,6	0,8	Média	44,8	59,4	4,5	Média	46,4	70,8	5,7	Média	105,1	36,0	1,7
Desvpad	0,7	0,1	0,2	Desvpad	0,7	0,0	0,3	Desvpad	1,2	6,8	0,3	Desvpad	2,1	2,6	0,1
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
2	28,8	2,3	1,8	2	33,0	59,5	7,4	2	33,1	136,9	8,1	2	118,8	28,4	2,0
8	29,0	6,0	3,6	8	33,3	59,4	11,9	8	33,4	117,4	13,9	8	120,8	26,0	4,4
14	29,0	6,7	2,0	14	32,7	59,5	8,6	14	32,9	126,4	9,3	14	120,8	22,7	3,0
Média	28,9	5,0	2,5	Média	33,0	59,4	9,3	Média	33,1	126,9	10,5	Média	120,1	25,7	3,1
Desvpad	0,1	2,3	1,0	Desvpad	0,3	0,0	2,3	Desvpad	0,2	9,7	3,1	Desvpad	1,2	2,9	1,2
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
3	24,2	5,7	1,6	3	27,7	59,5	9,4	3	28,0	99,8	10,1	3	131,4	34,2	2,9
9	24,5	6,0	1,6	9	28,2	59,4	9,5	9	28,5	108,5	10,8	9	136,1	29,3	2,3
15	25,0	5,8	4,0	15	28,6	59,4	12,0	15	29,0	98,5	13,3	15	138,9	31,5	4,8
Média	24,6	5,8	2,4	Média	28,1	59,4	10,3	Média	28,5	102,3	11,4	Média	135,5	31,7	3,3
Desvpad	0,4	0,1	1,4	Desvpad	0,4	0,0	1,5	Desvpad	0,5	5,4	1,7	Desvpad	3,8	2,5	1,3
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
4	19,0	4,7	2,6	4	22,0	59,4	10,7	4	22,8	122,7	17,5	4	138,9	31,7	7,4
10	20,0	5,7	2,5	10	23,0	59,4	10,3	10	23,4	82,8	12,8	10	138,9	31,9	3,4
16	20,0	6,7	5,5	16	22,6	59,5	16,5	16	22,6	86,3	12,7	16	129,8	36,7	2,7
Média	19,7	5,7	3,5	Média	22,5	59,4	12,5	Média	22,9	97,3	14,3	Média	135,9	33,4	4,5
Desvpad	0,6	1,0	1,7	Desvpad	0,5	0,0	3,5	Desvpad	0,4	22,1	2,8	Desvpad	5,3	2,8	2,5
Vazão 30 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
5	13,7	5,7	2,5	5	15,7	59,5	7,4	5	15,8	123,3	7,3	5	111,4	31,7	7,1
11	15,5	7,8	6,3	11	17,8	59,5	24,6	11	17,7	206,6	22,6	11	125,3	29,9	15,6
17	14,6	7,8	1,8	17	16,5	59,5	14,2	17	16,4	170,9	13,3	17	118,2	25,9	3,5
Média	14,6	7,1	3,5	Média	16,7	59,5	15,4	Média	16,7	166,9	14,4	Média	118,3	29,2	8,7
Desvpad	0,9	1,2	2,4	Desvpad	1,1	0,0	8,7	Desvpad	1,0	41,8	7,7	Desvpad	7,0	3,0	6,2
Vazão 35 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
6	13,2	6,3	7,1	6	15,2	59,5	11,2	6	15,3	133,1	11,1	6	127,2	24,8	7,0
12	13,4	16,2	9,8	12	14,7	59,5	24,7	12	14,3	250,0	22,7	12	129,9	5,1	10,1
18	12,0	7,9	2,3	18	13,8	59,5	14,6	18	13,8	134,6	16,5	18	116,7	18,1	3,1
Média	12,9	10,1	6,4	Média	14,6	59,5	16,8	Média	14,5	172,6	16,8	Média	124,6	16,0	6,7
Desvpad	0,7	5,3	3,8	Desvpad	0,7	0,0	7,0	Desvpad	0,7	67,1	5,8	Desvpad	7,0	10,0	3,5

Figura 4.12 – Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 2 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.

Para facilitar a análise dos valores das Figuras 4.11 e 4.12, apresentam-se as tabelas 4.10 e 4.11 com os valores resumidos (média dos valores da somatória de erros para cada modelo matemático nas seis vazões testadas, que é o critério de escolha do modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais).

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados da Figura 4.11 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 1

Modelo	Vazão 10 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 15 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 20 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 25 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 30 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 35 L/h Média da $\sum$ erro ²
Laminar modificado	0,6 ± 0,2	3,0 ± 2,4	2,3 ± 1,6	2,9 ± 2,2	10,5 ± 1,8	3,4 ± 2,7
Tanques em série	6,1 ± 2,5	5,2 ± 2,2	5,1 ± 1,2	5,4 ± 2,7	18,9 ± 6,5	9,3 ± 7,0
Dispersão axial	3,4 ± 0,8	5,2 ± 1,9	5,9 ± 1,5	4,2 ± 2,1	8,8 ± 1,2	5,8 ± 8,3
Combinado PFR+CSTR	0,8 ± 0,4	3,5 ± 2,9	3,0 ± 1,4	2,7 ± 1,9	10,2 ± 1,2	3,0 ± 2,4

Tabela 4.11 – Resumo dos resultados da Figura 4.12 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 2

Modelo	Vazão 10 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 15 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 20 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 25 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 30 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 35 L/h Média da $\sum$ erro ²
Laminar modificado	0,8 ± 0,2	2,5 ± 1	2,4 ± 1,4	3,5 ± 1,7	3,5 ± 2,4	6,4 ± 3,8
Tanques em série	4,5 ± 0,3	9,3 ± 2,3	10,3 ± 1,5	12,5 ± 3,5	15,4 ± 8,7	16,8 ± 7,0
Dispersão axial	5,7 ± 0,3	10,5 ± 3,1	11,4 ± 1,7	14,3 ± 2,8	14,4 ± 7,7	16,,8 ± 5,8
Combinado PFR+CSTR	1,7 ± 0,1	3,1 ± 1,2	3,3 ± 1,3	4,5 ± 2,5	8,7 ± 6,2	6,7 ± 3,5

Mediante a análise das Figuras 4.11 e 4.12 e as tabelas 4.10 e 4.11 foi possível identificar o modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Tanto para o tubo de retenção 1 como para o tubo de retenção 2, os resultados na escolha de melhor modelo matemático foram os mesmos, sendo primeiro o modelo laminar modificado, seguido pelo modelo combinado PFR+CSTR, o modelo de dispersão axial e por último o modelo de N tanques em série.

Nas Figuras 4.13 a 4.18, apresentam-se os dados experimentais do tubo de retenção 1, conforme a vazão estudada junto ao melhor modelo matemático ajustado com sua respectiva convolução com a DTR do sistema de aquisição na tabela 4.8.

As indicações “saída do tubo” e “saída da célula” nestas figuras estão de acordo com a Figura 3.6, onde “saída do tubo” representa a DTR do processo e “saída da célula” representa a convolução da DTR do processo com a do sistema de aquisição (célula do condutivímetro). Os parâmetros do modelo matemático da DTR do processo foram ajustados para aproximar a DTR “saída da célula” aos dados experimentais obtidos.

Figura 4.13 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.14 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.15 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.16 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.17 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.18 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Observando as Figuras com as respectivas convoluções, é evidente a distorção do sinal provocado pelo sistema de aquisição (escoamento através da célula), o que faz que a convolução seja um fator importante na análise e interpretação dos dados.

Da mesma maneira que para o tubo de retenção 1, nas Figuras 4.19 a 4.24 também são apresentados com as mesmas especificações os resultados para o tubo de retenção 2.

Figura 4.19 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.20 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.21 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.22 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.23 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.24 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Na análise dos tempos médios experimentais dos tubos de retenção 1 e 2, foram determinadas equações de variabilidade do tempo médio com a vazão, mediante o ajuste dos dados experimentais a equações como são observadas na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Variação de tempos médios de residência experimentais com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2

Então, as equações (4.4) e (4.5) definem a relação do tempo médio experimental com a vazão, para os tubos de retenção 1 e 2 respectivamente.

$$\bar{t}_1 = 84,75 v^{-1,0053} \quad \text{eq. (4.4)}$$

$$\bar{t}_2 = 162,82 v^{-0,9306} \quad \text{eq. (4.5)}$$

onde: v = vazão (mL/s)

$\bar{t}$ = Tempo médio (s)

Idealmente, se espera que o tempo médio de residência seja igual ao tempo espacial, (equação (2.1)).

Então também se espera a seguinte proporção:

$$\bar{t} \propto \frac{1}{v} \quad \text{eq. (4.6)}$$

Como os expoentes das equações (4.4) e (4.5) são próximos ao valor de -1,0 podemos fixar os mesmos a este valor teórico. Refazendo o ajuste de parâmetros temos como resultado as equações (4.7) e (4.8).

$$\bar{t}_1 = \frac{83,9}{v} \quad \text{eq. (4.7)}$$

$$\bar{t}_2 = \frac{177,2}{v} \quad \text{eq. (4.8)}$$

Os resultados dos parâmetros encontrados para estas equações deveriam ser próximos aos volumes internos dos tubos, já que τ é igual a V/v (equação 2.1). Lembrando que os volumes dos tubos 1 e 2 são 75 e 200 mL, respectivamente, existe uma diferença entre os parâmetros nas equações (4.7) e (4.8) e os valores esperados.

As tabelas 4.12 para o tubo de retenção 1 e 4.13 para o tubo de retenção 2, indicam os valores de tempos de residência médios subtraindo o tempo de residência da célula na tabela 4.8 e os tempos espaciais, assim como também as porcentagens da discrepância entre estes valores.

Tabela 4.12– Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 1

Vazão (L/h)	Tempo médio de residência $\bar{t}$ (s)	Tempo espacial τ (s)	% de discrepância
10	25,1	27,0	7,6
15	16,2	18,0	11,3
20	11,8	13,5	14,3
25	9,2	10,8	17,0
30	7,5	9,0	19,5
35	6,3	7,7	21,8

Tabela 4.13– Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 2

Vazão (L/h)	Tempo médio de residência $\bar{t}$ (s)	Tempo espacial τ (s)	% de discrepância
10	57,7	72,0	24,9
15	39,1	48,0	22,7
20	29,7	36,0	21,2
25	24,0	28,8	20,2
30	20,1	24,0	19,3
35	17,3	20,6	18,7

A discrepância entre tempo médio de residência experimental e tempo espacial para os tubos de retenção pode ser atribuída ao volume e formato da célula (Figura 3.3), à presença de curvas nos tubos que geram regiões de estagnação e regiões de escoamento preferencial. O escoamento pulsado provocado pela bomba peristáltica também é um fator importante para avaliar os desvios observados.

A Figura 4.26 apresenta a influência da vazão sobre o parâmetro n (modelo laminar modificado) para as vazões testadas nos tubos 1 e 2. Esta influência foi determinada mediante as equações (4.9) e (4.10) respectivamente.

Figura 4.26 – Variação do parâmetro n (modelo laminar modificado) com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2

$$n_1 = 0,244v^2 - 1,826v + 6,942 \quad \text{eq. (4.9)}$$

$$n_2 = 0,145v^2 - 1,118v + 6,906 \quad \text{eq. (4.10)}$$

Nas Figuras 4.27 e 4.28 observa-se a influência da vazão na distribuição de tempos de residência para o modelo laminar modificado, para os tubos de retenção 1 e 2 respectivamente. Nota-se que quanto maior é a vazão, mais rápida é a passagem do traçador no tubo.

Figura 4.27 - Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 1 no modelo laminar modificado

Figura 4.28 - Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 2 no modelo laminar modificado

Com os resultados aqui apresentados é possível prever a DTR da água em escoamento à temperatura ambiente com vazão entre 10 e 35 L/h através dos tubos de retenção 1 e 2, usando a bomba peristáltica padrão do equipamento. Estas informações serão úteis para a estimativa da letalidade no tubo durante tratamento térmico, como é descrito no item 2.5.

4.4. Distribuição do tempo de residência do trocador de calor a placas

Foi realizado o estudo de DTR no trocador de calor a placas de acordo com o método descrito no item (3.3.5). Foram testados arranjos em série com número par de passes de: 2x1; 4x1; 6x1; 8x1; 10x1; 12x1; 14x1; 16x1 e 18x1 nas vazões de 15, 20 e 25 L/h.

Os dados experimentais e resultados do ajuste com convolução dos quatro modelos matemáticos a temperatura constante (temperatura média 24,9 °C) são apresentados nas Figuras 4.28 a 4.36, conforme a vazão e configurações de trocador de calor estudadas.

Nas tabelas, para cada ensaio são apresentados os dois parâmetros ajustados de cada modelo em sua forma dimensional e a soma dos erros quadráticos minimizada.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 6x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	6,8	3,9	0,6
4	8,2	4,7	1,0
7	7,1	4,5	1,7
10	7,2	4,3	1,4
Média	7,3	4,4	1,1
Desvpad	0,6	0,4	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	8,5	59,4	5,0
4	9,9	59,4	4,6
7	8,7	59,4	4,3
10	8,8	59,4	6,4
Média	9,0	59,4	5,1
Desvpad	0,6	0,0	1,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	8,9	29,7	2,3
4	10,3	42,1	4,1
7	9,1	24,5	3,0
10	9,3	32,7	5,4
Média	9,4	32,3	3,7
Desvpad	0,6	7,4	1,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	26,7	13,6	0,7
4	32,2	13,1	2,3
7	27,1	12,4	2,4
10	28,0	13,0	2,5
Média	28,5	13,0	2,0
Desvpad	2,5	0,5	0,9

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	5,1	7,3	3,8
5	5,8	4,0	1,8
8	5,0	3,1	4,4
11	5,2	3,8	4,0
Média	5,3	4,5	3,5
Desvpad	0,3	1,9	1,2

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	5,8	59,4	5,2
5	7,3	59,4	4,3
8	6,5	59,4	11,5
11	6,7	59,4	8,2
Média	6,6	59,4	7,3
Desvpad	0,6	0,0	3,2

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	5,9	33,0	2,3
5	7,5	40,9	4,6
8	6,9	30,5	5,0
11	7,1	21,2	4,2
Média	6,8	31,4	4,0
Desvpad	0,7	8,1	1,2

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	23,7	10,7	0,6
5	29,7	15,7	4,8
8	27,1	14,9	3,1
11	26,2	14,8	2,3
Média	26,7	14,0	2,7
Desvpad	2,5	2,3	1,8

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	3,9	3,4	3,7
6	4,3	4,7	5,2
9	4,2	5,3	6,6
12	4,7	4,8	4,7
Média	4,2	4,5	5,0
Desvpad	0,3	0,8	1,2

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	5,1	59,5	4,2
6	5,1	59,5	13,6
9	5,0	59,4	7,8
12	5,8	59,4	12,8
Média	5,2	59,4	9,6
Desvpad	0,4	0,0	4,4

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	5,2	31,3	2,4
6	5,3	40,7	13,4
9	5,1	27,9	1,7
12	6,1	45,8	12,5
Média	5,4	36,4	7,5
Desvpad	0,5	8,3	6,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	26,1	12,5	2,4
6	29,2	8,6	6,9
9	23,6	16,3	4,0
12	32,1	9,9	5,2
Média	27,7	11,8	4,6
Desvpad	3,7	3,4	1,9

Figura 4.31 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 6x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 8x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	10,0	3,8	0,9
4	9,5	3,8	1,6
7	9,5	3,5	3,7
10	9,4	3,9	1,3
Média	9,6	3,7	1,9
Desvpad	0,3	0,2	1,3

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	12,1	12,1	59,4
4	11,7	11,7	59,4
7	11,6	11,6	59,4
10	11,5	11,5	59,4
Média	11,7	11,7	59,4
Desvpad	0,2	0,2	0,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	12,7	38,5	3,2
4	12,1	43,3	3,6
7	12,3	33,8	2,8
10	12,0	35,6	1,4
Média	12,3	37,8	2,7
Desvpad	0,3	4,2	1,0

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	39,4	18,7	1,5
4	38,8	15,4	1,0
7	38,5	16,8	2,7
10	38,2	14,8	0,8
Média	38,7	16,4	1,5
Desvpad	0,5	1,8	0,9

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	7,9	4,2	0,8
5	9,4	4,1	0,6
8	7,8	4,6	1,0
11	7,7	4,8	1,6
Média	8,2	4,4	1,0
Desvpad	0,8	0,3	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	9,8	59,5	4,4
5	9,1	59,4	4,7
8	9,3	59,5	6,7
11	9,3	59,4	5,0
Média	9,4	59,4	5,2
Desvpad	0,3	0,0	1,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	9,9	50,0	2,1
5	9,3	43,7	1,8
8	9,6	46,1	3,8
11	9,5	45,2	2,5
Média	9,6	46,3	2,6
Desvpad	0,2	2,7	0,9

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	43,2	14,9	0,5
5	40,0	14,2	0,2
8	42,6	13,0	1,3
11	42,1	12,2	1,9
Média	42,0	13,6	1,0
Desvpad	1,4	1,2	0,8

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	6,0	3,5	4,2
6	5,8	3,7	2,7
9	7,0	4,0	5,7
12	6,4	4,1	1,9
Média	6,3	3,8	3,6
Desvpad	0,5	0,3	1,7

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	7,8	59,5	10,4
6	7,3	59,4	7,7
9	8,5	59,4	6,2
12	7,7	59,5	3,8
Média	7,8	59,4	7,0
Desvpad	0,5	0,0	2,8

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	7,9	32,9	1,8
6	7,7	43,9	7,9
9	8,6	51,4	4,7
12	7,9	53,2	4,1
Média	8,0	45,4	4,6
Desvpad	0,4	9,2	2,5

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	40,9	18,7	2,7
6	39,6	16,5	2,0
9	47,3	17,2	4,2
12	43,3	15,1	1,4
Média	42,8	16,9	2,6
Desvpad	3,4	1,5	1,2

Figura 4.32 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 8x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas Configuração: arranjo em série com passes de 10x1															
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	11,5	3,8	1,3	1	14,1	59,4	6,2	1	14,6	45,1	3,0	1	47,4	18,7	0,6
4	12,5	3,8	2,4	4	15,5	59,4	5,7	4	16,0	48,6	2,1	4	52,1	20,9	1,0
7	12,9	4,0	1,1	7	15,7	59,4	3,0	7	16,2	45,9	0,8	7	51,6	21,7	0,4
10	13,0	4,1	1,4	10	15,7	59,5	4,3	10	16,1	56,5	2,3	10	53,7	19,1	0,6
Média	12,5	3,9	1,5	Média	15,3	59,4	4,8	Média	15,7	49,0	2,1	Média	51,2	20,1	0,7
Desvpad	0,7	0,1	0,6	Desvpad	0,8	0,0	1,4	Desvpad	0,8	5,2	0,9	Desvpad	2,7	1,4	0,3
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	9,5	3,9	3,1	2	11,5	59,5	6,2	2	11,9	49,5	3,4	2	51,9	19,6	1,9
5	9,9	4,3	1,9	5	11,7	59,5	6,4	5	12,1	49,8	2,4	5	52,4	21,8	1,6
8	9,5	4,0	3,4	8	11,3	59,5	7,9	8	12,0	49,0	5,3	8	51,8	18,8	2,3
11	10,5	4,2	1,7	11	12,6	59,4	7,1	11	14,0	47,5	5,2	11	52,0	19,6	1,2
Média	9,8	4,1	2,5	Média	11,8	59,4	6,9	Média	13,2	49,0	4,1	Média	52,0	19,9	1,8
Desvpad	0,5	0,2	0,8	Desvpad	0,6	0,0	0,8	Desvpad	1,0	1,0	1,4	Desvpad	0,3	1,3	0,5
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	8,2	5,3	1,2	3	9,9	59,4	4,3	3	10,1	58,6	1,7	3	54,4	19,2	2,5
6	7,4	4,6	1,2	6	8,7	59,5	8,9	6	9,2	50,8	4,8	6	50,6	15,6	1,3
9	7,5	3,9	2,7	9	9,2	59,4	7,3	9	9,4	51,3	4,0	9	51,1	19,3	1,5
12	7,2	4,5	1,5	12	8,8	59,4	2,8	12	9,0	55,2	2,9	12	49,5	15,3	1,0
Média	7,6	4,6	1,7	Média	9,1	59,4	5,8	Média	9,4	54,0	3,3	Média	51,4	17,4	1,5
Desvpad	0,4	0,6	0,7	Desvpad	0,5	0,0	2,8	Desvpad	0,5	3,6	1,4	Desvpad	2,1	2,2	0,7

Figura 4.33 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 10x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas Configuração: arranjo em série com passes de 12x1															
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	14,5	3,9	1,4	1	17,6	59,4	4,9	1	18,3	49,7	1,5	1	58,3	25,8	1,2
4	14,5	4,0	3,9	4	17,6	59,4	4,7	4	18,1	49,8	1,6	4	59,9	22,5	2,7
7	15,9	4,5	2,0	7	18,8	59,4	4,5	7	19,5	53,8	2,0	7	64,3	23,3	1,4
10	16,0	4,2	1,7	10	19,1	59,5	3,3	10	19,7	58,7	1,3	10	65,8	22,2	1,1
Média	15,2	4,1	2,2	Média	18,3	59,4	4,3	Média	18,9	53,0	1,6	Média	62,1	23,5	1,6
Desvpad	0,8	0,3	1,1	Desvpad	0,8	0,0	0,7	Desvpad	0,8	4,2	0,3	Desvpad	3,5	1,6	0,8
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	11,7	4,9	2,2	2	13,6	59,4	4,6	2	14,1	50,8	3,0	2	63,9	17,8	2,3
5	12,0	4,1	2,0	5	14,4	59,4	4,4	5	14,8	56,8	2,1	5	65,6	22,8	0,9
8	11,5	3,9	1,5	8	13,7	59,4	5,1	8	14,3	50,4	2,5	8	62,6	23,2	0,8
11	12,3	4,6	1,8	11	14,5	59,5	5,4	11	14,9	56,9	2,0	11	65,8	24,4	1,0
Média	11,9	4,4	1,9	Média	14,1	59,4	4,9	Média	14,5	53,7	2,4	Média	64,5	22,0	1,3
Desvpad	0,4	0,4	0,3	Desvpad	0,5	0,0	0,5	Desvpad	0,4	3,6	0,5	Desvpad	1,5	2,9	0,7
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	9,5	3,8	6,1	3	11,6	59,5	11,1	3	12,0	50,4	4,5	3	65,2	25,3	4,2
6	9,5	3,9	3,0	6	11,5	59,5	5,5	6	11,9	57,2	2,3	6	65,2	24,3	1,3
9	9,9	4,8	2,6	9	11,7	59,5	6,0	9	11,8	82,6	5,7	9	68,9	18,9	1,8
12	10,0	4,2	2,2	12	11,8	59,5	5,1	12	12,2	59,8	2,7	12	68,0	22,4	1,3
Média	9,7	4,2	3,5	Média	11,7	59,5	6,9	Média	12,0	62,5	3,8	Média	66,8	22,7	2,1
Desvpad	0,3	0,5	1,8	Desvpad	0,1	0,0	2,8	Desvpad	0,1	14,0	1,6	Desvpad	1,9	2,8	1,4

Figura 4.34 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 12x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 14x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	18,5	4,2	1,8
4	19,0	4,1	1,9
7	18,0	4,2	2,0
10	18,0	4,0	3,0
Média	18,4	4,1	2,2
Desvpad	0,5	0,1	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	22,0	59,4	3,6
4	22,7	59,5	2,6
7	21,4	59,5	3,1
10	21,9	59,5	3,3
Média	22,0	59,4	3,2
Desvpad	0,5	0,0	0,4

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	22,7	56,0	1,2
4	23,2	58,3	0,6
7	22,1	61,4	1,4
10	22,5	61,2	1,1
Média	22,6	59,2	1,1
Desvpad	0,4	2,6	0,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	76,3	25,8	1,0
4	78,2	27,1	1,1
7	74,5	25,2	1,1
10	76,7	25,0	1,5
Média	76,4	25,7	1,2
Desvpad	1,5	1,0	0,2

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	14,5	3,9	3,8
5	14,0	3,7	3,8
8	14,8	4,9	3,9
11	14,5	4,0	3,9
Média	14,4	4,1	3,9
Desvpad	0,3	0,5	0,1

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	17,6	59,5	4,4
5	17,2	59,4	3,8
8	17,1	59,4	5,9
11	17,4	59,4	3,3
Média	17,3	59,4	4,4
Desvpad	0,2	0,0	1,1

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	18,0	63,7	2,3
5	17,5	50,5	1,2
8	17,7	59,8	2,7
11	17,7	58,9	1,4
Média	17,7	58,2	1,9
Desvpad	0,2	5,6	0,7

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	80,6	30,4	1,9
5	76,5	30,4	2,5
8	79,6	26,5	3,3
11	79,2	27,7	2,7
Média	79,0	28,7	2,6
Desvpad	1,8	2,0	0,6

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	11,4	4,2	4,9
6	11,5	4,6	1,8
9	11,0	4,0	3,6
12	12,0	4,1	4,8
Média	11,5	4,2	3,8
Desvpad	0,4	0,3	1,4

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	13,6	59,5	6,1
6	13,5	59,5	6,1
9	13,4	59,5	4,5
12	13,9	59,5	4,5
Média	13,6	59,5	5,3
Desvpad	0,2	0,0	0,9

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	13,9	67,4	3,6
6	13,8	74,6	4,5
9	13,7	68,3	3,2
12	14,1	86,9	4,0
Média	13,8	74,3	3,8
Desvpad	0,2	9,0	0,6

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	80,5	21,1	3,8
6	80,9	19,5	2,6
9	75,4	26,9	1,9
12	82,3	21,9	1,7
Média	79,8	22,4	2,5
Desvpad	3,0	3,2	0,9

Figura 4.35 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 14x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 16x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	22,5	4,8	2,2
4	20,0	4,2	2,3
7	21,0	4,3	2,5
10	22,0	4,2	2,3
Média	21,4	4,4	2,3
Desvpad	1,1	0,3	0,1

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	26,6	59,5	1,9
4	23,9	59,5	2,9
7	25,1	59,5	3,1
10	26,3	59,5	1,6
Média	25,4	59,5	2,4
Desvpad	1,2	0,0	0,7

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	26,8	87,1	1,2
4	24,4	67,8	1,3
7	25,6	63,2	0,9
10	26,7	74,8	0,9
Média	25,9	73,2	1,1
Desvpad	1,1	10,4	0,2

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	93,8	27,2	1,2
4	82,2	28,6	1,2
7	87,2	28,6	1,5
10	91,4	31,3	1,4
Média	88,6	28,9	1,3
Desvpad	5,1	1,7	0,2

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	17,6	5,7	3,1
5	17,3	5,1	2,2
8	16,9	4,8	2,3
11	17,7	5,1	3,8
Média	17,4	5,2	2,9
Desvpad	0,4	0,4	0,8

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	20,1	59,5	3,0
5	20,1	59,5	3,6
8	19,7	59,5	3,0
11	20,5	59,5	3,3
Média	20,1	59,5	3,2
Desvpad	0,3	0,0	0,3

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	20,4	74,8	1,7
5	20,4	76,9	2,2
8	20,0	67,9	1,4
11	20,8	71,9	1,5
Média	20,4	72,9	1,7
Desvpad	0,3	3,9	0,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	95,4	25,8	1,7
5	93,8	28,3	1,1
8	91,2	29,5	1,0
11	94,4	31,5	2,0
Média	93,7	28,8	1,4
Desvpad	1,8	2,4	0,5

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	13,0	4,7	3,4
6	13,0	4,1	5,2
9	13,0	4,6	3,6
12	13,5	4,4	2,7
Média	13,1	4,4	3,7
Desvpad	0,3	0,2	1,0

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	15,4	59,5	4,4
6	15,8	59,5	4,3
9	15,2	59,5	6,4
12	15,9	59,5	2,2
Média	15,6	59,5	4,3
Desvpad	0,3	0,0	1,7

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	15,6	79,5	2,5
6	16,0	72,2	2,7
9	15,7	65,9	4,4
12	16,1	73,6	1,2
Média	15,8	72,8	2,7
Desvpad	0,2	5,6	1,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	90,3	27,0	1,4
6	90,2	31,6	3,4
9	90,0	27,2	2,7
12	92,8	29,4	1,5
Média	90,8	28,8	2,3
Desvpad	1,3	2,1	1,0

Figura 4.36 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 16x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas

Configuração: arranjo em série com passes de 18x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	25,8	5,3	2,2
4	25,8	5,3	3,2
7	24,8	4,9	2,6
10	24,0	4,6	2,0
Média	25,1	5,0	2,5
Desvpad	0,9	0,3	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	29,9	59,5	1,7
4	29,5	59,5	1,9
7	28,9	59,5	1,8
10	28,0	59,5	2,2
Média	29,1	59,5	1,9
Desvpad	0,8	0,0	0,2

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	30,2	81,3	0,9
4	29,9	80,9	1,0
7	29,3	76,5	0,9
10	28,7	71,8	1,0
Média	29,5	77,6	1,0
Desvpad	0,7	4,5	0,1

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	104,2	30,7	1,0
4	104,2	31,7	1,4
7	102,1	27,8	2,1
10	97,9	32,7	1,3
Média	102,1	30,7	1,5
Desvpad	2,9	2,1	0,4

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	20,0	4,8	2,0
5	20,0	4,7	3,8
8	19,9	5,1	2,3
11	19,9	4,8	2,7
Média	19,9	4,9	2,7
Desvpad	0,1	0,1	0,8

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	23,2	59,5	2,4
5	23,2	59,5	2,4
8	22,8	59,5	2,1
11	23,2	59,5	1,8
Média	23,1	59,5	2,2
Desvpad	0,2	0,0	0,3

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	23,5	92,6	2,3
5	23,8	88,4	1,9
8	23,1	80,4	1,3
11	23,4	87,0	1,3
Média	23,5	87,1	1,7
Desvpad	0,3	5,1	0,5

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	109,9	30,3	1,3
5	111,0	32,3	2,5
8	109,0	28,1	1,8
11	109,4	29,8	1,9
Média	109,8	30,1	1,9
Desvpad	0,9	1,8	0,5

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	15,0	4,5	5,0
6	15,0	4,4	4,2
9	15,0	4,5	4,2
12	15,0	4,9	4,0
Média	15,0	4,5	4,3
Desvpad	0,0	0,2	0,4

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	18,0	59,5	3,3
6	17,7	59,5	2,0
9	17,7	59,5	2,2
12	17,6	59,5	3,0
Média	17,7	59,5	2,6
Desvpad	0,2	0,0	0,6

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	18,1	84,5	2,3
6	18,0	78,0	1,5
9	17,9	90,4	1,5
12	17,8	87,2	2,5
Média	17,9	85,0	2,0
Desvpad	0,2	5,3	0,5

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	105,8	28,1	3,2
6	105,4	25,6	1,7
9	103,9	32,2	2,6
12	104,2	28,7	2,7
Média	104,8	28,7	2,6
Desvpad	0,9	2,7	0,6

Figura 4.37 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 18x1.

Feita uma análise geral de todos os valores obtidos nos ajustes dos modelos matemáticos para o trocador de calor foi determinado o melhor modelo ajustado, sendo este o modelo combinado PFR+CSTR, seguido pelo modelo de dispersão axial, pelo modelo laminar modificado e por último o modelo de N tanques em série.

Como o total de curvas de DTR ajustadas para o trocador de placas é elevado (9 arranjos $\times$ 3 vazões = 27 curvas), só são apresentados no texto alguns exemplos do ajuste de três diferentes arranjos com uma mesma vazão (Figuras 4.38 a 4.40), incluindo o modelo combinado PFR+CSTR ajustado.

Figura 4.38 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 4x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.

Figura 4.39 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 10x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.

Figura 4.40 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 16x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.

Foi analisada a influência da vazão e da configuração do trocador de calor nos parâmetros do modelo escolhido mediante os gráficos da Figura 4.41 onde foi possível observar que os parâmetros V_p (volume na região de escoamento pistonado) e V_m (volume na região de escoamento com mistura perfeita) são pouco influenciados pela vazão e são fortemente influenciados pelo número de passes.

Figura 4.41 – Análise da influência da configuração do trocador de calor a placas e da vazão nos parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR

Desprezando a influência da vazão, analisou-se apenas a influência da configuração do trocador nos parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 4.42.

Figura 4.42 – Análise da influência do número de passes para arranjo em série sobre os parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR

As equações (4.11) e (4.12) regem a influência da configuração do trocador de calor no modelo combinado PFR+CSTR.

$$V_p = 8,82 \cdot 10^{-2} P^2 + 4,30P \quad \text{eq. (4.11)}$$

$$V_m = -3,13 \cdot 10^{-2} P^2 + 2,26P \quad \text{eq. (4.12)}$$

onde: $P = N^\circ$ de passes para arranjo em série

V_p = Volume da região de escoamento pistonado (mL)

V_m = Volume da região de escoamento com mistura perfeita (mL)

Para analisar a região de estagnação ou regiões mortas no interior do trocador de calor a placas, foi necessário, inicialmente, obter o volume interno para cada configuração do trocador, o qual foi possível mediante a equação (4.13), específica para configuração do trocador de calor a placas com arranjo em série.

$$V_{PHE} = 2a + Pc + (P - 1)b + d \quad \text{eq. (4.13)}$$

Os parâmetros desta equação foram obtidos do volume interno que apresentam os componentes do trocador, que são placas planas, gaxetas e conectores. Os valores para o trocador estudado são apresentados na tabela 4.14.

A Figura 4.43 traz como exemplo a determinação do volume interno para o arranjo 2×1. A Figura 4.44 traz as dimensões da gaxeta que define o contorno do canal interno do trocador para arranjo em série. A espessura do canal de escoamento é de 1,5 mm e a espessura da placa é de 1,0 mm (ver pacote de placas na Figura 3.13).

Figura 4.43 – Exemplo da determinação do volume interno para arranjo de passes 2×1. Abaixo à esquerda: representação 3D explodida dos volumes internos dos lados quente e frio do trocador referente ao pacote de placas abaixo à direita com arranjo 2×1/2×1 (Galeazzo et al., 2006)

Tabela 4.14– Parâmetros determinados para a equação (4.13). (cálculo do volume interno do trocador de calor)

Parâmetros	Valor	Significado
a	1,46 mL	Volume interno dos conectores de entrada ou saída
b	0,201 mL	Volume da ligação entre dois canais
c	8,99 mL	Volume interno do canal
d	0,126 mL	Volume b, sem a espessura de uma placa

Figura 4.44 – Principais dimensões (mm) da gaxeta do trocador de calor.

Por outro lado, temos a equação (4.14) para o volume interno de um processo genérico:

$$V = V_p + V_m + V_d \quad \text{eq. (4.14)}$$

onde os termos destas equações são:

V_p = Volume da região de escoamento pistonado

V_m = Volume da região de escoamento com mistura perfeita

V_d = Volume da região de estagnação ou morta

Substituindo as equações (4.11), (4.12) e (4.13) na equação (4.14), tem-se a equação (4.15) para o volume morto no trocador a placas em função do número de passes. Esta equação é apresentada graficamente na Figura 4.45. É interessante notar que para $P = 0$, os volumes de escoamento pistonado e de mistura perfeita são

nulos, mas o volume morto é de $2a + d - b = 2,85$ mL. Este é o volume corresponde aos conectores de entrada e saída e ao orifício de uma placa, conforme Figura 4.45.

$$V_d = -5,68.10^{-2}P + 2,64P + 2,85 \quad \text{eq. (4.15)}$$

Figura 4.45 – Variação do volume morto dentro do interior do trocador de calor, em função do número de passes

4.5. Distribuição do tempo de residência no pasteurizador

São apresentados na Figura 4.46 os resultados detalhados dos ajustes com convolução dos dados experimentais do processo de pasteurização no pasteurizador de laboratório ARMFIELD modelo FT-43 no arranjo padrão do equipamento para o processamento do leite (tubo de retenção 1; trocador de calor a placas com configuração de arranjos em série com número par de passes de 6x1/10x1/4x1 para aquecimento/regeneração/resfriamento). Os resultados são apresentados separadamente para cada vazão experimentada no pasteurizador. Quatro modelos de DTR foram ajustados aos dados experimentais. A temperatura média dos ensaios foi de 22,9 °C.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do pasteurizador
Configuração padrão: tubo de retenção 1 e trocador de calor com arranjo em série de 6x1/10x1/4x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$
1	68,5	5,6	2,4
4	68,5	5,6	2,4
7	68,5	5,6	2,7
10	68,5	5,6	2,5
Média	68,5	5,6	2,5
Desvpad	0,0	0,0	0,1

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$
1	77,9	86,5	0,6
4	76,1	85,5	0,5
7	77,2	84,1	0,5
10	77,1	84,9	0,5
Média	77,1	85,2	0,6
Desvpad	0,7	1,0	0,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$
1	78,1	170,1	0,5
4	76,4	167,7	0,4
7	77,4	165,2	0,4
10	77,4	166,2	0,4
Média	77,3	167,3	0,4
Desvpad	0,7	2,2	0,0

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
1	287,4	63,1	1,8
4	281,3	61,0	1,8
7	285,0	63,0	2,2
10	283,3	64,7	2,0
Média	284,2	63,0	1,9
Desvpad	2,6	1,5	0,2

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$
2	55,5	5,9	3,0
5	57,0	6,1	2,3
8	56,0	6,1	2,4
11	56,0	6,0	2,8
Média	56,1	6,0	2,6
Desvpad	0,6	0,1	0,3

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$
2	62,8	93,5	0,8
5	63,5	90,4	0,9
8	62,3	96,1	0,9
11	62,7	92,9	0,7
Média	62,8	93,2	0,8
Desvpad	0,5	2,3	0,1

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$
2	62,9	183,7	0,7
5	63,7	177,3	0,8
8	62,5	188,5	0,7
11	62,8	181,2	0,6
Média	63,0	182,7	0,7
Desvpad	0,5	4,7	0,1

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
2	308,3	66,8	2,2
5	314,3	63,2	1,9
8	309,3	62,0	1,9
11	310,6	64,4	2,2
Média	310,6	64,1	2,1
Desvpad	2,6	2,0	0,2

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$
3	43,0	6,5	3,6
6	44,0	6,3	3,4
9	44,4	6,7	3,2
12	44,5	6,2	3,8
Média	44,0	6,4	3,5
Desvpad	0,7	0,2	0,3

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$
3	48,0	102,9	1,3
6	48,6	102,9	1,1
9	48,6	103,0	1,7
12	49,2	100,5	0,9
Média	48,6	102,3	1,3
Desvpad	0,5	1,2	0,4

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$
3	48,1	202,9	1,1
6	48,7	204,9	1,0
9	48,6	231,6	1,4
12	49,3	197,1	0,8
Média	48,7	209,1	1,1
Desvpad	0,5	15,3	0,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
3	297,5	56,2	3,0
6	302,1	62,7	2,8
9	304,9	60,7	3,0
12	305,2	63,9	3,1
Média	302,4	60,9	3,0
Desvpad	3,5	3,4	0,1

Figura 4.46 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do pasteurizador aos quatro modelos matemáticos a temperatura constante.

O resumo dos valores da Figura 4.46 é apresentado na tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Resumo dos resultados da Figura 4.45 dos quatro modelos matemáticos ajustados para o pasteurizador

Modelo	Vazão 15 L/h Média da $\sum \text{erro}^2$	Vazão 20 L/h Média da $\sum \text{erro}^2$	Vazão 25 L/h Média da $\sum \text{erro}^2$
Laminar modificado	2,5 $\pm$ 0,1	2,6 $\pm$ 0,3	3,5 $\pm$ 0,3
Tanques em série	0,6 $\pm$ 0,0	0,8 $\pm$ 0,1	1,3 $\pm$ 0,4
Dispersão axial	0,4 $\pm$ 0,0	0,7 $\pm$ 0,1	1,1 $\pm$ 0,3
Combinado PFR+CSTR	1,9 $\pm$ 0,2	2,1 $\pm$ 0,2	3,0 $\pm$ 0,1

O critério de escolha do modelo matemático foi o mesmo que nos procedimentos dos tubos de retenção e do sistema de aquisição de dados.

O modelo que ficou melhor ajustado foi o modelo de dispersão axial, seguido pelo modelo de N tanques em série, o modelo combinado PFR+CSTR e por último o modelo laminar modificado.

Nas Figuras 4.47, 4.48 e 4.49, apresentam-se os dados experimentais do pasteurizador, conforme a vazão estudada junto ao melhor modelo matemático ajustado com convolução dos dados do sistema de aquisição.

As indicações “saída do pasteurizador” e “saída da célula” nestas figuras estão de acordo com a Figura 3.6, onde “saída do pasteurizador” representa a DTR do processo e “saída da célula” representa a convolução da DTR do processo com a DTR do sistema de aquisição (célula do condutivímetro). Os parâmetros do modelo matemático da DTR do processo são ajustados para aproximar a DTR “saída da célula” aos dados experimentais obtidos.

Figura 4.47 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 15 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.

Figura 4.48 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 20 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.

Figura 4.49 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 25 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.

Observando as figuras com as respectivas convoluções, foi evidente a menor distorção do sinal provocado pela célula, já que o volume interno do processo é bem superior ao da célula.

Analisou-se também a influência da vazão nos parâmetros tempo médio ($\bar{t}$) e número de Peclet (Pe) do modelo escolhido mediante os gráficos da Figura 4.50.

Figura 4.50 – Análise da influência da vazão nos parâmetros $\bar{t}$ e Pe do modelo de dispersão axial para o pasteurizador

As equações (4.16) e (4.17) representam a influência da vazão nos parâmetros do modelo matemático de dispersão axial para o pasteurizador, onde $\bar{t}$ é o tempo médio em segundos (s) e v é a vazão em mL/s.

$$\bar{t} = -10,31v + 120,28 \quad \text{eq. (4.16)}$$

$$Pe = 2,87v^2 - 16,82v + 187,6 \quad \text{eq. (4.17)}$$

As curvas de DTR para o processo de pasteurização completo serão muito úteis experimentalmente quando houver uma alteração nas características do produto processado e deseja-se saber quanto tempo levará para que a saída contenha exclusivamente este novo produto. Por exemplo, costuma-se iniciar o processamento com água mineral até atingir o regime permanente. Feito isso, substitui-se a água pelo produto alimentício (Newtoniano, como leite ou suco de laranja filtrado) e se aguarda até a saída do processo não “aparentar” mais estar diluída pela água residual. Pela Figura 4.48, estima-se que após 100 s na vazão de 20 L/h, será possível recolher o produto pasteurizado.

5. CONCLUSÕES

Para o traçador escolhido cloreto de sódio (NaCl) em solução aquosa, foram obtidas curvas de calibração determinando equações que relacionam a condutividade elétrica com a temperatura e a concentração da solução.

Foi necessário e importante estudar inicialmente a DTR do sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro) porque não é recomendável desprezar o volume e formato deste dispositivo em relação aos sistemas estudados. Foram analisadas vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h a temperatura constante e testados os modelos matemáticos de dispersão axial e N tanques em série. O modelo matemático que melhor ficou ajustado aos dados experimentais do sistema de aquisição foi o modelo de dispersão axial.

No estudo da DTR dos tubos de retenção 1 e 2 também foram analisadas as mesmas seis vazões e foram ajustados dados experimentais a quatro modelos matemáticos. Estes estudos foram feitos com a convolução do modelo ajustado com o modelo de DTR do sistema de aquisição de dados. Para os dois tubos, o resultado na escolha do melhor modelo ajustado foi a mesma, sendo o melhor o modelo laminar modificado.

No estudo da DTR do trocador de calor a placas foram analisadas influências da vazão e da configuração do trocador a temperatura constante. Foram testadas três vazões de 15, 20 e 25 L/h e configurações de trocador em arranjos em série com número par de passes de 2x1, 4x1, 6x1, 8x1, 10x1, 12x1, 14x1, 16x1 e 18x1. Testaram-se quatro modelos matemáticos com convolução da DTR do sistema de aquisição de dados. O modelo melhor ajustado para o trocador de calor é o modelo combinado PFR+CSTR. Observa-se que a vazão não tem influência nos parâmetros do modelo combinado, que são dependentes da configuração do trocador de calor (número de passes).

Foram determinadas as equações que relacionam os volumes da região de escoamento pistonado V_m , da região de escoamento com mistura perfeita V_p , e da região de estagnação ou morta V_d em função da configuração do trocador de calor.

Observando os gráficos com as respectivas convoluções, foi evidente a distorção do sinal provocado pela célula. Portanto é importante a implementação do processo de convolução no estudo e tratamento dos dados obtidos mediante este sistema de aquisição de dados.

No estudo do processo de pasteurização, verificou-se a influência da vazão no processo. Foram testadas vazões de 15, 20 e 25 L/h. para o arranjo padrão do equipamento para o processamento do leite (tubo de retenção 1; trocador de calor a placas com configuração de arranjos em série com número par de passes de 6x1/10x1/4x1 para aquecimento/regeneração/retenção), o modelo matemático que ficou melhor ajustado com convolução, a temperatura constante, foi o modelo de dispersão axial.

Os parâmetros ajustados para todos os modelos de DTR são apresentados nesta dissertação e sempre que é possível correlacionados com a vazão de escoamento ou número de passes no trocador de calor a placas. As correlações obtidas serão de grande utilidade para a correta operação do pasteurizador testado e a metodologia aqui descrita pode ser aplicada a outros processos.

6. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas opções para continuação desta linha de pesquisa:

- Usar as DTRs dos tubos 1 e 2 para calcular a letalidade no tubo. Testar experimentalmente a letalidade usando indicadores biológicos ou químicos que sofram transformação térmica nas condições de pasteurização.
- Realizar ensaios operacionais não isotérmicos do pasteurizador ou do trocador de calor a placas e verificar influência sobre a DTR, comparando com os resultados isotérmicos aqui apresentados.
- Verificar a influência do número de canais por passe no trocador sobre a sua DTR.
- Identificar os tempos médios de residência em todas as partes do processo de pasteurização (seções do trocador, tubo de retenção, tubulação, conexões, etc.) e comparar a somatória com o tempo médio do processo completo determinado experimentalmente.

REFERÊNCIAS*

AKEMI, S. R. **Distribuição do tempo de residência em sistemas de alimentação com vazão variável**. 2005. 64 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ALFA LAVAL. Warminster. Processes: **Milk and cream pasteurization**. Disponível em: <<http://www.us.thermal.alfalaval.com>>. Acesso em 30 jan. de 2008.

ARMFIELD–Innovators in engineering education equipment and industrial food technology equipment. **Plate heat exchanger-heating, economizing and cooling sections**. Disponível em: <<http://www.armfield.co.uk>>. Acesso em 04 de nov. de 2007.

ÁVILA, I.M.; SILVA, C.L.M. Methodologies to optimize thermal processing conditions: an overview. In: **Processing foods: Quality optimization and process assessment**. Boca Raton, 1999.

BOEKEL, V.M.; JONGEN, W.M.F. Product quality and food processing: How to quantify the healthiness of a product. **Cancer Letters**, v. 114, p. 65-69, 1997.

BRASIL.ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 267. **Regulamento técnico sobre as boas práticas de fabricação para estabelecimentos industrializadores de gelados comestíveis**. Brasília, 2000. Disponível em: <<http://e-legis.bvs.br>>. Acesso em 07 nov. 2007.

CHAKRABANDHU, K. **Aseptic processing of particulate foods: computational models and experimental studies**. 2000. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, 2000.

DANTHERM. **Trocadores de calor a placas**. Disponível em: <<http://www.dantherm.com.br>>. Acesso em 06 de nov. de 2007.

DITCHFIELD, C.; TADINI, C. C.; SINGH, R.K.; TOLEDO..R.T. Velocity and temperature profiles, heat transfer coefficients and residence time distribution of a temperature dependent Herschel-Bulkley fluid in a tubular heat exchanger. **Journal of Food Engineering**, v. 76, p. 632-638, 2006.

(*) De acordo com:

Diretrizes para a apresentação de dissertação e tese da Escola Politécnica de Engenharia da Universidade de São Paulo. 2006.

EFIGÊNIA, M.; POVOA, B.; MORAES-SANTOS, T. Effect of Heat Treatment on the Nutricional Quality of Milk Proteins. **International dairy journal**, v. 7, p. 609-6012, 1997.

FOGLER, H.C. **Elements of chemical reaction engineering**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1999.

GALEAZZO, F.C.C.; MIURA, R.Y.; GUT, J.A.W.; TADINI, C.C. Experimental and numerical heat transfer in a plate heat exchanger. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 21, p.7133-7138, 2006.

GIÁCOMAN, G.V. Análisis de la hidrodinamica de un reactor de flujo pistón. **Ingeniería Revista Académica**. v.7. p. 7-19. Universidad Autónoma de Yucatán. 2003.

GOULD, G.W. Methods for preservation and extension of shelf life. **International Journal of Food Microbiology**, v. 33, n. 1. p. 51-64, 1996.

GOUVEA, M.T.; PARK,S.W.; GIUDICI, R. **Estimação de coeficientes de dispersão axial em leitos fixos**. 18° Encontro sobre escoamento em meios porosos. Nova Friburgo. 1990.

GRIJSPEERDT, K.; HAZARIKA, B.; VUCINIC, D. Application of computational fluid dynamics to model the hydrodynamics of plate heat exchangers for milk processing. **Journal of Food Engineering**, v. 7, p. 237-242, 2003.

GRIJSPEERDT, K.; MORTIER, L.; de BLOCK, J.; RENTERGHEM, R. Applications of modelling to optimise ultra high temperature milk heat exchangers with respect to fouling. **Food control**, v.15, p. 117-130, 2004.

GUT, J.A.W. ; PINTO, J.M. . Modeling of plate heat exchangers with generalized configurations. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 14, p. 2571-2585, 2003b.

GUT, J.A.W.; PINTO, J.M. Conhecendo os trocadores de calor a placas. **Revista de Graduação da Engenharia Química**. São Paulo, v. 1, n. 11, p. 9-16, 2003a.

GUT, J.A.W.; PINTO, J.M. Selecting optimal configurations for multisection plate heat exchangers in pasteurization processes. **Industrial & Engineering Chemical Research**, v.42, n. 24, p. 6112-6124, 2003c.

IBARROLA, J.J.; SANDOVAL, J. M.; GARCÍA-SANZ, M.; PINZOLAS M. Predictive control of a high temperature–short time pasteurization process. **Control Engineering Practice**, v. 10, n. 7, p. 713-725, 2002.

JORDÁN, M.J.; GOODNER, K.L.; LAENCINA, J. Deaeration and pasteurization effects on the orange juice aromatic fraction, **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v.36, n. 4, p. 391-396, 2003.

KAKAÇ, S.; LIU, H. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. Boca Raton, 2002.

LANDFELD, A.; ZITNÝ, R.; HOUSKA, M.; KÝHOS, K.; NOVOTNÁ, P. Residence time distribution during egg yolk pasteurization. **Czech Journal of Food Science** v. 20, n. 5, p. 193-201, 2002.

LEE, H.S.; COATES, G.A. Effect of thermal pasteurization on valencia orange juice color and pigments, **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v. 36, n. 1, p. 153-156, 2003.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. New York: John Wiley, 1972.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

LEWIS, M.; HEPPELL, N. **Continuous thermal processing of foods: pasteurization and UHT sterilization**. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, Inc. 2000.

LEWIS, M.; ROBINSON, R.K. **Heat treatment of milk**. Modern Dairy Technology. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, v. 1, 1999.

NASCIMENTO, C.A.O.; GIUDICI, R. Um experimento didático para a determinação de distribuição do tempo de residência em reator de leito fixo. **Revista de Ensino de Engenharia Química**. v. 8, n.1, p. 16-22. 1989.

NOTT, K.P.; HALL, L.D. Advances in temperature validation of foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 10, n. 11, p. 366-374, 1999.

PARTRIDGE. J.A. Pasteurization of milk: historial impact on tuberculosis. **Department of Food Science and Human Nutrition**. Michigan Dairy Review, v 19. July 2000.

PÁTKAI, G.; BARTA, J.; VARSÁNYI, I. Decomposition of anticarcinogen factors of the beetroot during juice and nectar production. **Cancer Letters**, v. 114, p. 105-106, 1997.

RAO, M.A.; LONCIN, M. Residence time distribution and its role in continuous pasteurization (Part I). **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v. 7, p. 5-13, 1974a.

RAO, M.A.; LONCIN, M. Residence time distribution and its role in continuous pasteurization (Part II). **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v. 7, p. 14-17, 1974b.

RUTHVEN D. M. The residence time distribution for ideal laminar flow in a helical tube. **Chemical Engineering Science**, v. 26, p. 1113-1121, 1971.

SOARES, J. H. P. **Uso de traçadores na modelagem de unidades de aeração e decantação em tratamento de esgotos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.

TOMASULA, P.M.; KOZEMPEL, M.F. Flow characteristics of a pilot-scale high temperature, short time pasteurizer. **Journal of Dairy Science**, v. 87, n. 9, p. 2761-2768, 2004.

TORRES, A.P.; OLIVEIRA, F.A.R. Residence Time distribution of liquids in a continuous tubular thermal processing system - Part II: Relating hold tube efficiency to processing conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 2, p. 165-175, 1998b.

TORRES, A.P.; OLIVEIRA, F.A.R. Residence Time distribution studies in continuous thermal processing of liquid foods: a Review. **Journal of Food Engineering**, v. 36, n. 1, p. 1-30, 1998a.

TORRES, A.P.; OLIVEIRA, F.A.R.; FORTUNA, S. P. Residence time distribution of liquids in a continuous tubular thermal processing system - Part I: Relating RTD to processing conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 2, p. 147-163, 1998.

TRIBESS, T.B.; TADINI, C.C. Minimally processed orange juice: an alternative to improve the Brazilian orange juice market. **III International Conference On Agri-Food Chain / Networks Economics And Management**, FEARP- USP, Ribeirão Preto, 2001.

ANEXO A - Exemplo de uma planilha de cálculo para obter $E(t)$, $F(t)$, $E(\theta)$ e $\bar{t}$ a partir de dados experimentais

Tubo de Retenção 1

Ensaio n° 1

Vazão 1

Volume do traçador = 0,05 ml

Temperatura real = 27,8 °C

Condutividade (uS)	Concentração (g/L)	C' ($C - C_0$)	tempo (t) (seg)	$\int 1$	$E(t)$	$\int 2$	$F(t)$	$\int 3$	θ	$E(\theta)$
1082,0	0,7035	0,0000	0	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000
1083,0	0,7041	0,0007	2	0,0007	0,0002	0,0002	0,0002	0,0004	0,1208	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	3	0,0007	0,0002	0,0002	0,0004	0,0006	0,1813	0,0037
1084,0	0,7048	0,0013	4	0,0010	0,0004	0,0003	0,0008	0,0012	0,2417	0,0074
1085,0	0,7055	0,0020	5	0,0017	0,0007	0,0006	0,0013	0,0026	0,3021	0,0110
1084,0	0,7048	0,0013	6	0,0013	0,0004	0,0004	0,0018	0,0024	0,3625	0,0074
1083,0	0,7041	0,0007	8	0,0020	0,0002	0,0007	0,0024	0,0044	0,4833	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	9	0,0007	0,0002	0,0002	0,0027	0,0019	0,5438	0,0037
1102,0	0,7169	0,0134	10	0,0067	0,0045	0,0022	0,0049	0,0223	0,6042	0,0737
1322,1	0,8653	0,1619	11	0,0876	0,0538	0,0291	0,0340	0,3181	0,6646	0,8902
1481,1	0,9738	0,2703	12	0,2161	0,0898	0,0718	0,1058	0,8347	0,7250	1,4866
1583,1	1,0439	0,3404	13	0,3054	0,1131	0,1015	0,2073	1,2742	0,7854	1,8722
1837,1	1,2204	0,5169	14	0,4287	0,1718	0,1424	0,3497	1,9375	0,8458	2,8428
1660,1	1,0971	0,3936	15	0,4553	0,1308	0,1513	0,5010	2,1832	0,9063	2,1649
1389,1	0,9109	0,2074	17	0,6011	0,0689	0,1997	0,7007	3,1337	1,0271	1,1409
1300,1	0,8504	0,1469	18	0,1772	0,0488	0,0589	0,7596	1,0253	1,0875	0,8081
1268,1	0,8287	0,1253	19	0,1361	0,0416	0,0452	0,8048	0,8349	1,1479	0,6889
1254,1	0,8192	0,1158	20	0,1205	0,0385	0,0400	0,8449	0,7802	1,2083	0,6368
1193,0	0,7780	0,0746	21	0,0952	0,0248	0,0316	0,8765	0,6449	1,2688	0,4100
1156,0	0,7531	0,0497	22	0,0621	0,0165	0,0206	0,8971	0,4416	1,3292	0,2731
1144,0	0,7450	0,0416	23	0,0456	0,0138	0,0152	0,9123	0,3404	1,3896	0,2287
1125,0	0,7323	0,0288	24	0,0352	0,0096	0,0117	0,9240	0,2738	1,4500	0,1585
1118,0	0,7276	0,0241	25	0,0265	0,0080	0,0088	0,9328	0,2152	1,5104	0,1327
1114,0	0,7249	0,0214	27	0,0456	0,0071	0,0151	0,9479	0,3928	1,6313	0,1179
1107,0	0,7202	0,0168	28	0,0191	0,0056	0,0063	0,9543	0,1741	1,6917	0,0921
1102,0	0,7169	0,0134	29	0,0151	0,0045	0,0050	0,9593	0,1425	1,7521	0,0737
1100,0	0,7155	0,0121	30	0,0127	0,0040	0,0042	0,9635	0,1247	1,8125	0,0663
1100,0	0,7155	0,0121	31	0,0121	0,0040	0,0040	0,9675	0,1222	1,8729	0,0663
1096,0	0,7128	0,0094	32	0,0107	0,0031	0,0036	0,9711	0,1120	1,9334	0,0516
1094,0	0,7115	0,0080	33	0,0087	0,0027	0,0029	0,9740	0,0939	1,9938	0,0442
1095,0	0,7122	0,0087	34	0,0084	0,0029	0,0028	0,9767	0,0932	2,0542	0,0479
1091,0	0,7095	0,0060	36	0,0127	0,0020	0,0042	0,9810	0,1478	2,1750	0,0331
1090,0	0,7088	0,0054	37	0,0057	0,0018	0,0019	0,9829	0,0690	2,2354	0,0295
1088,0	0,7075	0,0040	38	0,0047	0,0013	0,0016	0,9844	0,0583	2,2959	0,0221
1088,0	0,7075	0,0040	39	0,0040	0,0013	0,0013	0,9858	0,0514	2,3563	0,0221
1087,0	0,7068	0,0033	40	0,0037	0,0011	0,0012	0,9870	0,0483	2,4167	0,0184
1093,0	0,7108	0,0074	41	0,0054	0,0024	0,0018	0,9888	0,0724	2,4771	0,0405
1087,0	0,7068	0,0033	42	0,0054	0,0011	0,0018	0,9905	0,0735	2,5375	0,0184
1086,0	0,7061	0,0027	44	0,0054	0,0009	0,0018	0,9923	0,0765	2,6584	0,0147
1085,0	0,7055	0,0020	45	0,0023	0,0007	0,0008	0,9931	0,0346	2,7188	0,0110
1084,0	0,7048	0,0013	46	0,0017	0,0004	0,0006	0,9937	0,0253	2,7792	0,0074
1084,0	0,7048	0,0013	48	0,0027	0,0004	0,0009	0,9945	0,0418	2,9000	0,0074
1082,0	0,7035	0,0000	49	0,0007	0,0000	0,0002	0,9948	0,0107	2,9604	0,0000
1084,0	0,7048	0,0013	50	0,0007	0,0004	0,0002	0,9950	0,0111	3,0209	0,0074
1084,0	0,7048	0,0013	51	0,0013	0,0004	0,0004	0,9954	0,0225	3,0813	0,0074
1083,0	0,7041	0,0007	53	0,0020	0,0002	0,0007	0,9961	0,0345	3,2021	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	54	0,0003	0,0002	0,0001	0,9962	0,0060	3,2625	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	56	0,0013	0,0002	0,0004	0,9967	0,0245	3,3834	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	57	0,0007	0,0002	0,0002	0,9969	0,0126	3,4438	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	58	0,0007	0,0002	0,0002	0,9971	0,0128	3,5042	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	60	0,0013	0,0002	0,0004	0,9976	0,0263	3,6250	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	61	0,0007	0,0002	0,0002	0,9978	0,0135	3,6854	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	62	0,0007	0,0002	0,0002	0,9980	0,0137	3,7459	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	63	0,0007	0,0002	0,0002	0,9982	0,0139	3,8063	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	64	0,0007	0,0002	0,0002	0,9984	0,0141	3,8667	0,0037
1082,0	0,7035	0,0000	65	0,0003	0,0000	0,0001	0,9986	0,0071	3,9271	0,0000
1083,0	0,7041	0,0007	66	0,0003	0,0002	0,0001	0,9987	0,0073	3,9875	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	68	0,0013	0,0002	0,0004	0,9991	0,0298	4,1084	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	69	0,0007	0,0002	0,0002	0,9993	0,0152	4,1688	0,0037
1082,0	0,7035	0,0000	70	0,0003	0,0000	0,0001	0,9994	0,0077	4,2292	0,0000
1082,0	0,7035	0,0000	71	0,0000	0,0000	0,0000	0,9994	0,0000	4,2896	0,0000
1083,0	0,7041	0,0007	72	0,0003	0,0002	0,0001	0,9996	0,0080	4,3500	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	73	0,0007	0,0002	0,0002	0,9998	0,0161	4,4105	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	74	0,0003	0,0002	0,0001	0,9999	0,0082	4,4709	0,0037
1082,0	0,7035	0,0000	75	0,0003	0,0000	0,0001	1,0000	0,0082	4,5313	0,0000
1082,0	0,7035	0,0000	76	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	4,5917	0,0000
$\Sigma =$				3,0095	$\Sigma =$	1,0000	$\bar{t} =$	16,5516		

RESUMO

É apresentado um estudo de distribuição do tempo de residência nas etapas de um processo de pasteurização contínuo por trocador de calor a placas (aquecimento, resfriamento, regeneração e retenção). Para o estudo experimental, foi adotada a técnica condutimétrica usando cloreto de sódio em solução aquosa como traçador. Foram verificadas as influências da vazão, da configuração do trocador de calor a placas (número de passes para o arranjo em série) e do tipo de tubo de retenção (tubo em “S” e tubo helicoidal). Modelos de distribuição foram usados para representar o comportamento experimental (dispersão axial, tanques em série, laminar modificado, combinado PFR+CSTR). Este estudo foi aplicado para as condições de pasteurização HTST de leite, visando a futura implementação de uma modelagem matemática rigorosa do processo, para otimização do projeto e operação do processo.

Palavras-chave: Distribuição de tempo de residência. Pasteurização contínua. Trocador de calor a placas. Modelagem matemática.

ABSTRACT

It is presented a study of residence time distribution in the steps of a process of continuous pasteurization by plate heat exchanger (heating, cooling, regeneration and holding). For the experimental study, it was adopted a conductimetric technique using sodium chloride in aqueous solution as a tracer. It was also studied the influence of the flow rate, the configuration of the plate heat exchanger (number of passes in series arrangement) and the type of holding tube ("S"- shaped tube and helicoidal tube). Distribution models were used for representing the experimental behavior (axial dispersion, tank in series, modified laminar, combined PFR+CSTR). This study was applied for the conditions of HTST pasteurization of milk, targeting the future implementation of a rigorous mathematical modeling of the process, which can be applied for the process operation and optimization of the project design.

Keywords: Residence time distribution. Continuous pasteurization. Plate heat exchanger. Mathematical modeling.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1.1 - Diferentes modelos de trocadores de calor a placas.....	2
Figura 1.2 - Trocador de calor a placas aberto e suas partes principais.....	3
Figura 1.3 - Exemplo de configuração para um PHE com nove placas.....	4
Figura 1.4 - Exemplos de arranjos de passes para um PHE com nove placas.....	4
Figura 1.5 - Esquema de uma unidade de pasteurização HTST destacando as seções do trocador a placas.....	5
Figura 1.6 - Linha de pasteurização de leite com trocador de cinco seções.....	6
Figura 2.1 - Representação esquemática de alguns tipos de injeção que Podem ser utilizados na técnica experimental estímulo – resposta.....	12
Figura 2.2 - Representação esquemática de um estímulo unitário instantâneo e da respectiva resposta.....	13
Figura 2.3 - Curva E ou distribuição do tempo de residência.....	15
Figura 2.4 - Informação útil obtida a partir de um experimento com função pulso do traçador.....	17
Figura 2.5 - Relação entre as curvas E e F	18
Figura 2.6 - Espalhamento do traçador de acordo com o modelo de dispersão.....	20
Figura 2.7 - Modelo de N tanques em série.....	24
Figura 2.8 - Escoamento do fluido de acordo com o modelo de convecção.....	24
Figura 2.9 - Modelo combinado (escoamento pistonado seguido do escoamento mistura perfeita)	26
Figura 2.10 - Comparação da DTR de três modelos diferentes.....	27
Figura 2.11 - Esquema mostrando a dedução da integral de convolução.....	28
Figura 2.12 - Modificação de um sinal de alimentação de traçador, C_{entrada} , passando através de três regiões sucessivas.....	29

Figura 3.1 - Pasteurizador de laboratório ARMIFIELD modelo FT-43 e placas do trocador de calor.....	34
Figura 3.2 - Condutivímetro YSI Modelo 3200.....	35
Figura 3.3 - Célula YSI modelo 3445.....	36
Figura 3.4 - Esquema dos ensaios das curvas de calibração para o traçador.....	37
Figura 3.5 - Exemplo de curvas típicas de DTR para injeção de um traçador em pulso.....	41
Figura 3.6 - Influência da célula do sistema de aquisição na determinação de uma DTR.....	41
Figura 3.7 - Esquema dos ensaios do estudo experimental do comportamento do sistema de aquisição.....	43
Figura 3.8 - Fotografia dos ensaios para o estudo do sistema de aquisição.....	43
Figura 3.9 - Exemplo de dados experimentais do sistema de aquisição com ajuste de dois modelos matemáticos (N tanques em série e dispersão axial Pe).....	44
Figura 3.10 - Esquema dos ensaios experimentais para o estudo do comportamento do tubo de retenção.....	45
Figura 3.11 - Fotografias dos ensaios de DTR nos tubos de retenção 1 e 2.....	45
Figura 3.12 - Exemplo de dados experimentais de um ensaio do tubo de retenção 1 ajustados com convolução aos quatro modelos matemáticos (modelo laminar modificado, modelo de N tanques em série, modelo de dispersão axial e modelo combinado PFR+CSTR).....	46
Figura 3.13 - Fotografia de um ensaio de DTR no trocador de calor a placas.....	47
Figura 3.14 - Fotografia de um ensaio de DTR no pasteurizador Armfield FT 43.....	49
Figura 4.1 - Curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio.....	50
Figura 4.2 - Gráficos de ajuste das equações (3.2), (3.3) e os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 para a construção das curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio.....	51
Figura 4.3 - Paridade dos dados calculados com os dados reais de concentração de cloreto de sódio.....	52

Figura 4.4 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 10 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	56
Figura 4.5 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 15 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	56
Figura 4.6 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 20 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	56
Figura 4.7 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 25 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	57
Figura 4.8 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 30 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	57
Figura 4.9 - Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 35 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial.....	57
Figura 4.10 - Variação de tempos médios experimentais do sistema de aquisição de dados com a vazão.....	58
Figura 4.11 - Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 1 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.....	61
Figura 4.12 - Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 2 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.....	62
Figura 4.13 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	64
Figura 4.14 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	65
Figura 4.15 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	65
Figura 4.16 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	65
Figura 4.17 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	66

Figura 4.18 -	Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	66
Figura 4.19 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	67
Figura 4.20 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	67
Figura 4.21 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	67
Figura 4.22 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	68
Figura 4.23 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	68
Figura 4.24 -	Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.....	68
Figura 4.25 -	Variação de tempos médios de residência experimentais com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2.....	69
Figura 4.26 -	Variação do parâmetro n (modelo laminar modificado) com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2.....	71
Figura 4.27 -	Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 1 no modelo laminar modificado.....	72
Figura 4.28 -	Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 2 no modelo laminar modificado.....	72
Figura 4.29 -	Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 2x1.....	74
Figura 4.30 -	Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 4x1.....	74
Figura 4.31 -	Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 6x1.....	75

Figura 4.32 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 8x1.....	75
Figura 4.33 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 10x1.....	76
Figura 4.34 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 12x1.....	76
Figura 4.35 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 14x1.....	77
Figura 4.36 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 16x1.....	77
Figura 4.37 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 18x1.....	78
Figura 4.38 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 4x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.....	79
Figura 4.39 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 10x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.....	79
Figura 4.40 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 16x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.....	79
Figura 4.41 - Análise da influência da configuração do trocador de calor a placas e da vazão nos parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR.....	80
Figura 4.42 - Análise da influência do número de passes para arranjo em série sobre os parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR.....	80

Figura 4.43 - Exemplo da determinação do volume interno para arranjo de passes 2×1.....	82
Figura 4.44 - Principais dimensões (mm) da gaxeta do trocador de calor.....	83
Figura 4.45 - Variação do volume morto dentro do interior do trocador de calor, em função do número de passes.....	84
Figura 4.46 - Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do pasteurizador aos quatro modelos matemáticos a temperatura constante.....	85
Figura 4.47 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 15 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.....	86
Figura 4.48 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 20 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.....	87
Figura 4.49 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 25 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.....	87
Figura 4.50 - Análise da influência da vazão nos parâmetros $\bar{t}$ e Pe do modelo de dispersão axial para o pasteurizador.....	88

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1-	Determinação numérica da convolução de sinais.....	30
Tabela 4.1-	Parâmetros ajustados para as curvas de calibração do traçador cloreto de sódio.....	51
Tabela 4.2-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 10 L/h.....	53
Tabela 4.3-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 15 L/h.....	54
Tabela 4.4-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 20 L/h.....	54
Tabela 4.5-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 25 L/h.....	54
Tabela 4.6-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 30 L/h.....	55
Tabela 4.7-	Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 35 L/h.....	55
Tabela 4.8-	Valores dos parâmetros do modelo de dispersão axial para o sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro).....	59
Tabela 4.9-	Tempos médios de residência, tempos espaciais e as porcentagens de discrepância para o sistema de aquisição de dados.....	60
Tabela 4.10-	Resumo dos resultados da figura 4.11 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 1.....	63
Tabela 4.11-	Resumo dos resultados da figura 4.12 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 2.....	63
Tabela 4.12-	Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 1.....	70
Tabela 4.13-	Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 2.....	71

Tabela 4.14-	Parâmetros determinados para a equação (4.7). (cálculo do volume interno do trocador de calor).....	82
Tabela 4.15-	Resumo dos resultados da Figura 4.46 dos quatro modelos matemáticos ajustados para o pasteurizador.....	85

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Parâmetro de calibração do traçador (S/m)
a, b, c, d	Volumes internos parciais do traçador (m ³)
a_1, a_2, b_1, b_2	Parâmetros ajustados nas curvas de calibração do traçador cloreto de sódio
B	Parâmetro de calibração do traçador (S/m.°C)
c	Concentração (Kg/m ³)
$C(t)$	Concentração de saída do traçador no tempo (Kg/m ³)
D	Coeficiente de dispersão axial (m ² /s)
$D(t)$	Valor- D da cinética térmica (s)
$E(t)$	Função E de distribuição do tempo de residência (1/s)
$E(\theta)$	Função E de distribuição do tempo de residência adimensionalizada
$F(t)$	Função F de distribuição de tempo de residência.
L	Comprimento (m)
m	Parâmetro do modelo laminar modificado
N	Número de iguais tanques de mistura perfeita em série.
n	Expoente do modelo laminar
n/n_o	Redução da concentração de microrganismos
P	Número de passes do fluido dentro do trocador de calor
Pe	Número de Peclet
R^2	Coeficiente de determinação
T	Temperatura (°C)
t, t'	Tempo (s)
T_{ref}	Temperatura de referencia (°C)

$\bar{t}_p$	Tempo médio de residência na região de escoamento pistonado (s)
$\bar{t}_M$	Tempo médio de residência na região de escoamento com mistura perfeita (s)
$\bar{t}$	Tempo médio de residência(s)
Δt	Intervalo de tempo (s)
V	Volume interno do sistema (m ³)
v	Taxa volumétrica de escoamento (m ³ /s)
V_d	Volume da região de estagnação ou volume morto (m ³)
V_m	Volume da região de escoamento com mistura perfeita (m ³)
V_p	Volume da região de escoamento pistonado (m ³)
V_{PHE}	Volume interno do trocador de calor a placas (m ³)
Z	Valor Z da cinética térmica (°C)
$\sum \text{erro}^2$	Somatória das médias do erro quadrático

SÍMBOLOS GREGOS

α_i	Parâmetro da equação (2.18) para $E(\theta)$
α, β, γ	Parâmetro de calibração do traçador
θ	Unidade adimensional de tempo
π	Constante pi ($\pi = 3,1416$)
σ^2	Variância de uma curva do traçador ou função distribuição (s ²)
τ	Tempo espacial (s)

LISTA DE ABREVIATURAS

alog	Função anti logarítmica base 10
ANVISA	Agencia Nacional de Vigilância Sanitária
DRT	Distribuição de tempos de residência
exp	Função exponencial
HTST	Processo de pasteurização alta temperatura curto tempo
log	Função logarítmica base 10
PHE	Trocador de calor a placas
PRF+CST	Associação de um vaso com escoamento pistonado com um vaso de mistura perfeita
UHT	Processo de pasteurização ultra alta temperatura

SUMÁRIO

Resumo.....	i
Abstract.....	ii
Listra de ilustrações.....	iii
Lista de tabelas.....	ix
Lista de símbolos.....	xi
Lista de abreviaturas.....	xiii
1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO.....	1
2. REVISÃO DA LITERATURA.....	10
2.1. Tipos de escoamento.....	10
2.2. Distribuição do tempo de residência (DTR).....	10
2.2.1. <i>Técnica experimental estímulo-resposta.....</i>	<i>12</i>
2.2.2. <i>Traçadores.....</i>	<i>13</i>
2.2.3. <i>Tempo espacial.....</i>	<i>14</i>
2.2.4. <i>Determinação experimental da distribuição de tempos de residência (DTR)</i>	<i>14</i>
2.2.5. <i>Tempo médio da distribuição do tempo de residência.....</i>	<i>16</i>
2.2.6. <i>Função F.....</i>	<i>18</i>
2.2.7. <i>Funções adimensionalizadas.....</i>	<i>19</i>
2.2.8. <i>Efeito ajuste.....</i>	<i>19</i>
2.3. Modelos matemáticos para o escoamento não-ideal.....	20

2.3.1. Modelo de dispersão axial.....	20
2.3.2. Modelo de N tanques em série.....	22
2.3.3. Modelo laminar modificado.....	24
2.3.4. Modelo combinado PFR+CSTR.....	26
2.4. Convolução.....	27
2.5. Uso da DTR para cálculo da letalidade em tubo.....	31
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	33
3.1. Materiais e Equipamentos.....	33
3.2. Reagentes.....	36
3.3. Metodologia.....	36
3.3.1. Curvas de calibração para o traçador.....	36
3.3.2. Distribuição do tempo de residência.....	39
3.3.3. Distribuição do tempo de residência do sistema de aquisição.....	42
3.3.4. Distribuição do tempo de residência dos tubos de retenção.....	44
3.3.5. Distribuição do tempo de residência do sistema do trocador de calor a placas.....	47
3.3.6. Distribuição do tempo de residência do processo de pasteurização.....	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	50
4.1. Curvas de calibração do traçador.....	50
4.2. Distribuição de tempos de residência do sistema de aquisição.....	52
4.3. Distribuição de tempos de residência dos tubos de retenção.....	60
4.4. Distribuição de tempos de residência do sistema do trocador de calor a placas.....	73
4.5. Distribuição de tempos de residência no pasteurizador.....	84

5. CONCLUSÕES.....	89
6. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS.....	91
REFERÊNCIAS.....	92
ANEXO A - Exemplo de uma planilha de cálculo para obter $E(t)$, $F(t)$, $E(\theta)$ e $\bar{i}$ a partir de dados experimentais.....	97

1. INTRODUÇÃO E OBJETIVO

A palavra pasteurização é empregada em homenagem a Louis Pasteur, o ilustre cientista francês, que entre 1854 e 1864 deu base científica aos métodos térmicos de conservação. Ele demonstrou experimentalmente que tratamentos térmicos destruíam os tipos indesejáveis de microrganismos que estavam associados à deterioração dos alimentos e que eram causadores de doenças específicas. A aplicação de um método de tratamento térmico específico para o leite foi proposta pela primeira vez por Soxhlet em 1886 na Alemanha (Partridge, 2000).

A pasteurização é um tratamento térmico controlado, no qual o alimento é submetido a um aquecimento por tempo determinado seguido de resfriamento. Este processo busca garantir a segurança microbiológica, aumentar a vida de prateleira e preservar as características sensoriais e nutricionais do alimento (Lewis e Heppell, 2000). No Brasil é obrigatório que todos os derivados laticínios sejam fabricados a partir do leite pasteurizado (ANVISA, resolução - RDC Nº 267, de 25 de setembro de 2003, artigo 4.1.16).

O processo de pasteurização contínua HTST (*high temperature short time*) destina-se ao tratamento térmico de produtos alimentícios líquidos para a redução das células vegetativas, patogênicas e/ou deterioradoras e para a inativação de enzimas indesejadas. Em comparação com a esterilização, a pasteurização é um tratamento térmico brando, onde há um compromisso entre a segurança e a qualidade do produto final. Quando se deseja um tratamento severo para prolongar a vida de prateleira ou eliminar esporos termoresistentes, opta-se pelo processo de esterilização contínua UHT (*ultra high temperature*) (Lewis e Heppell, 2000).

O processamento UHT é também conhecido por “esterilização comercial”, para diferenciá-la de uma esterilização total onde a eliminação de microrganismos é completa. No processo UHT, o produto final não fica totalmente livre de microrganismos. Mesmo assim aqueles que sobrevivem dificilmente se desenvolvem nas condições de armazenamento do produto.

Nos processos de pasteurização HTST de alimentos não muito viscosos é difundido o uso de trocadores de calor a placas para o aquecimento e o resfriamento indireto do produto.

No trocador de calor a placas ou PHE (*plate heat exchanger*) os fluidos escoam por estreitos canais e trocam calor através de finas chapas metálicas. Alguns exemplos de PHEs são mostrados na Figura 1.1.

Figura 1.1 - Diferentes modelos de trocadores de calor a placas (Armfield, 2007; Danther, 2007)

Os PHEs foram introduzidos comercialmente na década de 30 para atender às exigências de higiene e limpeza das indústrias alimentícias e farmacêuticas, pois eles podem ser facilmente desmontados, limpos e inspecionados. Atualmente os PHEs são extensamente empregados em diversos processos de troca térmica entre líquidos com pressões e temperaturas moderadas (até 1,5 MPa e 150 °C) onde se deseje alta eficiência térmica (Gut e Pinto, 2003a).

Os PHEs são formados basicamente por um pacote de finas placas metálicas prensadas em um pedestal, como mostra a Figura 1.2. O pedestal possui uma placa fixa, uma placa de aperto móvel, barramentos inferior e superior e parafusos de aperto. As placas fixa e de aperto possuem bocais para conexão das tubulações de alimentação e de coleta dos fluidos.

Figura 1.2 - Trocador de calor a placas aberto e suas partes principais (Gut e Pinto, 2003b)

As placas do PHE possuem orifícios nos cantos para a passagem dos fluidos e são seladas nas extremidades por gaxetas (também chamadas de juntas) de material elastomérico. Quando as placas são alinhadas e prensadas no pedestal, forma-se entre elas uma série de canais paralelos de escoamento.

O espaço compreendido entre duas placas é um canal de escoamento. O fluido entra e sai dos canais através dos orifícios nas placas e o seu caminho por dentro do PHE é definido pelo desenho das gaxetas, pelos orifícios abertos e fechados das placas e pela localização das conexões de alimentação. A configuração do PHE define as trajetórias dos fluidos quente e frio dentro do trocador e existe um grande número de possibilidades de configuração.

A distribuição do fluxo pelos canais do PHE é feita na forma de “passes”, compostos por um certo número de “passagens”. Cada vez que o fluxo muda de sentido, muda-se de passe. Na Figura 1.3 é mostrado um exemplo de configuração para um PHE com nove placas, onde é possível observar os orifícios abertos e fechados das placas e também o desenho das gaxetas que definem a direção e o sentido do escoamento em cada canal. No caso deste exemplo têm-se oito canais de escoamento, o fluido quente faz dois passes de duas passagens e o fluido frio faz quatro passes de uma passagem (Gut e Pinto, 2003a).

Figura 1.3 - Exemplo de configuração para um PHE com nove placas (Gut e Pinto, 2003a).

Os números de passes e de passagens definem o “arranjo de passes” do PHE. Para o exemplo na Figura 1.3, o arranjo é $2 \times 2/4 \times 1$ (dois passes de duas passagens por quatro passes de uma passagem). Os tipos de arranjos mais comuns são aqueles em paralelo onde os dois fluidos fazem apenas um passe (arranjo $1 \times n/1 \times m$) e aqueles em série onde os fluxos não sofrem divisões, ou seja, cada passe tem apenas uma passagem (arranjo $n \times 1/m \times 1$). Na Figura 1.4 são mostrados exemplos de arranjos em paralelo e em série para PHEs de nove placas.

Figura 1.4 - Exemplos de arranjos de passes para um PHE com nove placas (Gut e Pinto, 2003b).

De forma geral, os PHEs são utilizados em operações de resfriamento, aquecimento ou de recuperação de calor entre líquidos com temperaturas inferiores a $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ e pressões não maiores que $1,5\text{ MPa}$. Eles são extensivamente usados no processamento de produtos alimentícios como laticínios, sucos e cervejas e também na indústria farmacêutica para esterilização de meios de cultura. A facilidade de

limpeza interna e de controle da temperatura dos PHEs são fundamentais para estes processos industriais.

Em resumo, este tipo de trocador oferece grandes vantagens como a fácil higiene interna, alta eficiência térmica, turbulência induzida no escoamento em baixa velocidade, viabilidade econômica para fabricação em aço inoxidável, boa distribuição de temperatura e construção compacta e modular que permite acomodar várias seções de troca térmica em um mesmo pedestal (Kakaç e Liu, 2002).

Uma das aplicações mais importantes dos PHEs é na pasteurização do leite. Neste processo o PHE é dividido em no mínimo três seções de troca térmica, uma para aquecimento do leite cru até a temperatura de pasteurização, outra para resfriamento do leite pasteurizado até a temperatura de embalagem e uma seção para recuperação de calor. Nesta última seção, designada “regeneração”, o leite cru é pré-aquecido usando o leite quente pasteurizado e a recuperação de calor pode ser superior a 90 %. (Gut e Pinto, 2003a).

A Figura 1.5 mostra, como exemplo, o esquema simplificado de uma unidade de pasteurização HTST e pode-se observar as três seções de troca térmica ocupando o mesmo pedestal do PHE. As grades conectoras são usadas para separar as seções. A Figura 1.6 apresenta um processo industrial de pasteurização de leite com um trocador de calor a placas com cinco seções.

Figura 1.5 - Esquema de uma unidade de pasteurização HTST destacando as seções do trocador a placas (Gut e Pinto, 2003c)

1. Tanque de leite	8. Bomba <i>booster</i>
2. Bomba de alimentação	9. PHE para aquecimento da água
3. Controlador de vazão	10. Seções de regeneração, lado quente
4. Seções de regeneração, lado frio	11. Seções de resfriamento
5. Homogeneizador	12. Válvula diversora de fluxo
6. Seção de Aquecimento	13. Painel de controle
7. Tubo de retenção	

Figura 1.6 - Linha de pasteurização de leite com trocador de cinco seções (Alfa Laval, 2008)

As condições de temperatura e tempo do tratamento térmico nos processos HTST são geralmente definidas tendo como base o microrganismo patogênico mais termoresistente presente no alimento, como por exemplo, *Mycobacterium tuberculosis* para o leite bovino ou *Salmonella senftenberg* para o ovo líquido (Lewis e Heppell, 2000). As condições são definidas de forma a atingir um número desejado de reduções decimais para a população do microrganismo alvo. Por exemplo, para assegurar 12 reduções decimais na população de *Mycobacterium tuberculosis* no leite, realiza-se a sua pasteurização a 72 °C com um tempo de retenção de 15 segundos (Lewis, 1999).

O tubo de retenção do pasteurizador (ver Figuras 1.5 e 1.6) é dimensionado para atender ao tempo de retenção na temperatura de pasteurização desejada. Como a temperatura na saída do tubo deve ter uma variação muito pequena para evitar que

o produto tenha de retornar ao tanque de alimentação (perda de energia e incremento no custo do processamento) ou que ele seja sobre-processado (perda de qualidade), o projeto e o controle do processo são fundamentais (Ibarrola et al., 2002).

A avaliação do grau do tratamento térmico de uma unidade de tratamento térmico pode ser feita de duas formas: 1) teoricamente através da análise do perfil de temperatura versus a distribuição do tempo de residência, ou 2) experimentalmente utilizando integradores de tempo-temperatura (Lewis e Heppell, 2000), que são indicadores de natureza biológica, química ou física, presentes ou formados no alimento durante o processamento com cinética similar àquela do atributo estudado.

Para o correto dimensionamento de uma unidade de pasteurização é fundamental o conhecimento da distribuição do tempo de residência do processo. Normalmente, assume-se que a inativação térmica ocorre apenas dentro do tubo de retenção a uma temperatura constante e com a duração do tempo de retenção mínimo no tubo. Embora irreais, estas condições favorecem a segurança do processo já que desprezam o tratamento térmico que ocorre dentro do trocador de calor, aquele associado às condições não isotérmicas do tubo de retenção e também as partículas mais lentas no sistema. Na prática, tem-se um produto sobre-processado de menor qualidade sensorial e nutricional e com um gasto adicional de energia para aquecimento e resfriamento. Grijspeerdt et al. (2004), por exemplo, analisaram três sistemas de esterilização UHT de leite e verificaram que todos estavam super-dimensionados com respeito à inativação bacteriana. Já Landfeld et al. (2002) analisaram uma unidade pasteurizadora de gema de ovo e constataram que o tempo de retenção estava 48 % acima do valor requerido.

Com a atual valorização de hábitos saudáveis, há uma preocupação crescente com o valor nutricional dos alimentos e com a presença de compostos que melhorem a saúde (van Boekel e Jongen, 1997). Como consequência, valorizaram-se os produtos alimentícios minimamente processados que conservam as características e propriedades do produto natural. Segundo Gould (1996) e Nott e Hall (1999), esta é a atual tendência de desenvolvimento na área de preservação de produtos alimentícios.

Diversos estudos têm sido realizados para quantificar o impacto do processamento industrial sobre as características “saudáveis” dos alimentos, por exemplo, Efigênia

et al. (1997) analisaram a perda de qualidade nutricional do leite pasteurizado no Brasil. Pátkai et al. (1997) reportam que durante a pasteurização de sucos de frutas ocorre a decomposição de cerca de 40 % do agente anti-cancerígeno betamina presente na fruta. Van Boekel e Jongen (1997) ressaltam a necessidade de métodos para medir a atividade biológica de vitaminas, enzimas e outros compostos presentes em alimentos, para otimizar as etapas do processo produtivo visando a melhoria da qualidade do produto. Trabalhos para quantificar a perda de qualidades sensoriais também têm sido desenvolvidos, como por exemplo, os estudos de Lee e Coates (2003) e Jordán et al. (2003) sobre mudanças de cor e perda do aroma, respectivamente, no suco de laranja processado. Outro trabalho realizado por Tribess e Tadini (2001) faz uma comparação dos resultados de suco de laranja submetido a um processo de esterilização UHT em um trocador de calor a placas e do suco de laranja processado com um tratamento térmico HTST e verifica que o suco minimamente processado tem mais aceitação por conservar as características do suco em natura.

De acordo com Grijspeerdt et al. (2003), uma modelagem rigorosa do processo é necessária para que se possa simular e otimizar o tratamento térmico visando determinar condições ótimas de operação para minimizar os efeitos indesejáveis do aquecimento, garantir a qualidade microbiológica do alimento e reduzir os custos operacionais. Para a correta modelagem, são fundamentais modelos térmicos e hidráulicos rigorosos do equipamento, dados de cinética de inativação térmica e de propriedades termo-físicas confiáveis.

Ávila e Silva (1999), em sua revisão sobre a otimização de processamento térmico de alimentos, constata que trabalhos de modelagem e otimização para processos de pasteurização de alimentos líquidos são relativamente escassos, enquanto que muitos trabalhos enfocam a simulação do processamento de alimentos sólidos por condução.

O desenvolvimento de modelos para simular a troca térmica e o escoamento juntamente com as cinéticas de inativação e degradação resultariam em uma excelente ferramenta para otimização destes processos térmicos. Ávila e Silva (1999), recomendam o uso da teoria da distribuição do tempo de residência (DTR) para representar o processamento de alimentos líquidos, que tem características complexas de escoamento.

Neste trabalho, o principal objetivo foi o estudo de distribuição do tempo de residência nas diferentes etapas de um processo de pasteurização com trocador de calor a placas buscando identificar a influência da vazão, tipo de tubo de retenção e, configuração do trocador de calor (número de placas e arranjo de passes). Para o estudo foi empregada a técnica condutimétrica e foram usados modelos de DTR para representar o comportamento observado. A análise de DTR é aplicada nas condições do processo de pasteurização HTST de leite bovino, nas condições de escoamento isotérmico.

Tendo em vista as atuais tendências de melhora da qualidade dos produtos alimentícios pasteurizados e a crescente competitividade entre os seus fabricantes, estima-se que este trabalho contribuirá de forma significativa para o projeto e operação de unidades de pasteurização.

2. REVISÃO DA LITERATURA

O escoamento de um fluido através de um equipamento numa planta de tratamento térmico contínuo está sujeito às características do equipamento, a vazão de escoamento e às propriedades do fluido como a viscosidade e densidade. Os modos de escoamento ideal no tubo de retenção de pasteurizadores são de dois tipos, escoamento pistonado ou escoamento laminar. Na maioria dos casos, projetam-se equipamentos assumindo um ou outro tipo dependendo do regime de escoamento: turbulento ou laminar (Levenspiel, 2000).

Para caracterizar melhor o desempenho destes equipamentos, inicialmente tem que se investigar a maneira como o fluido escoam pelo dispositivo, em outros termos, a natureza do escoamento ou a macro-mistura.

2.1. Tipos de escoamento

São dois os principais modelos ideais de escoamento citados na literatura: o escoamento de mistura perfeita (*Backmix Flow* ou *Continuous Stirred Tank Reactor - CSTR*) e o escoamento pistonado (*Plug Flow Reactor - PFR*). Escoamentos com comportamentos diferentes podem ser considerados não-ideais (Levenspiel, 2000).

O escoamento pistonado é aquele em que as moléculas do fluido atravessam o equipamento com a mesma velocidade, movendo-se “alinhadas”. Não há mistura por dispersão axial. Já no escoamento de mistura perfeita, as moléculas do fluido se misturam obtendo-se composição homogênea no interior do volume.

Os desvios dos dois modelos de escoamento ideal podem ser causados por fenômenos de escoamento que podem ocorrer no interior dos equipamentos. Alguns fenômenos são descritos a seguir:

- a) Escoamento preferencial – ocorre quando grandes quantidades de elementos do fluido escoam através do equipamento em tempo menor que outros;

- b) Curto circuito – ocorre quando elementos do fluido escoam através do equipamento sem percorrer todo seu interior;
- c) Zonas mortas – são regiões do equipamento isoladas ou inacessíveis, onde o fluido nelas aprisionado não interage com as regiões ativas;
- d) Reciclo – ocorre quando parcelas do fluido são recirculadas para a entrada ou para o interior do equipamento;
- e) Retromistura - ocorre quando parcelas do fluido apresentam movimento na direção contrária ao fluxo principal.

Algumas dessas anomalias do escoamento podem ser detectadas a partir da observação das curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) e da análise de parâmetros calculados a partir dos dados experimentais (Soares, 1985).

2.2. Distribuição do tempo de residência (DTR)

É considerado que um fluido é constituído por uma infinidade de elementos, os mesmos que são expostos a variadas e diversas forças a favor e contrárias ao movimento, então se assume que cada elemento do fluido tem um comportamento definido dentro do sistema que determina a permanência no mesmo (Giácoman, 2003).

O tempo de residência de um elemento de fluido é definido como o tempo decorrido desde a entrada no sistema até a saída do mesmo (Torres e Oliveira, 1998).

Chakrabandhu (2000) apresenta um estudo onde diferentes elementos de um fluido demoram tempos diferentes para percorrer toda a extensão de um sistema de processamento. Ressalta também que a distribuição do tempo de residência de um alimento é essencial para o projeto e para a otimização de sistemas de processamento contínuo. Do ponto de vista da segurança do processo, o conhecimento do tempo de residência mínimo é fundamental para garantir um produto seguro. Do ponto de vista da qualidade do produto, ter uma distribuição mais uniforme do tempo de residência implica em ter um produto mais uniforme.

A distribuição deste tempo para uma corrente de fluido é chamada de distribuição de idade das porções de saída, E (do inglês, *exit*) ou distribuição do tempo de residência (DTR) do fluido em escoamento (Levenspiel, 2000).

A informação sobre a DTR pode ser obtida através do uso de uma técnica experimental amplamente utilizada, denominada técnica estímulo-resposta.

2.2.1. Técnica experimental estímulo-resposta

A técnica experimental utilizada para estudar a distribuição do tempo de residência de um fluido num equipamento é a conhecida como estímulo-resposta, que consiste em injetar um traçador na entrada do dispositivo e observar as concentrações de traçador nas amostras coletadas na saída deste dispositivo. A injeção é feita de maneira conhecida, que pode ser de diferentes formas: aleatória, pulso, degrau, etc. (Levenspiel, 1986). Estes sinais estão ilustrados na Figura 2.1 onde c é a concentração do traçador e t é o tempo.

Figura 2.1 – Representação esquemática de alguns tipos de injeção que podem ser utilizados na técnica experimental estímulo-resposta (Levenspiel, 1986)

A Figura 2.2 representa esquematicamente o estímulo tipo pulso aplicado à entrada de um dispositivo e a resposta obtida à sua saída.

Figura 2.2 –Representação esquemática de um estímulo unitário instantâneo e da respectiva resposta (Levenspiel, 1986)

2.2.2. Traçadores

O traçador é qualquer produto que, incorporado a uma substância, permite investigar o comportamento desta em um determinado processo físico ou químico.

Os traçadores são utilizados para marcarem fluidos, constituindo importantes ferramentas na obtenção de modelos que representem o escoamento. As principais propriedades para a escolha do traçador ideal são apresentadas a seguir (Akemi, 2005):

- ✓ Comportamento fluidodinâmico idêntico ao da substância que se pretende estudar;
- ✓ Possuir uma característica adicional que permita diferenciá-lo da substância que se pretende estudar;
- ✓ O traçador, ou esta característica adicional que o distingue, não deve existir (se possível) no meio em que o traçador será empregado (baixo *background*);
- ✓ O método de detecção e de medição do traçador deve ser fácil, de alta eficiência e possível de ser realizado através de equipamento simples e de baixo custo;
- ✓ O traçador deve ser conservativo, e as amostras coletadas para posteriores análises em laboratório devem ter volume reduzido para maior facilidade de transporte e manuseio;
- ✓ A composição química do traçador não deve ser tóxica;
- ✓ O traçador deve estar disponível no mercado e ter baixo custo.

2.2.3. Tempo espacial

O tempo espacial do fluido no sistema com escoamento e densidade constantes (onde as vazões de entrada e saída no sistema são iguais) ou tempo teórico de residência é definido como:

$$\tau = \frac{V}{v} \quad \text{eq. (2.1)}$$

Onde:

τ = Tempo espacial (s)

V = Volume interno do sistema (mL)

v = Vazão volumétrica constante (mL/s)

2.2.4. Determinação experimental da distribuição do tempo de residência (DTR)

A distribuição do tempo de residência do fluido E , ou curva E , representa a fração de fluido saindo do sistema em cada tempo e tem unidades de tempo⁻¹.

$$E(t) = \frac{C(t)}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad \text{eq. (2.2)}$$

Onde:

$C(t)$ = Concentração de saída do traçador no tempo t .

Quando a injeção do traçador é feita pela técnica do pulso, obtém-se diretamente a curva $E(t)$. A curva $E(t)$ tem forma normalizada, ou seja, a área sob a curva é unitária:

$$\int_0^{\infty} E(t) dt = 1 \quad \text{eq. (2.3)}$$

Figura 2.3 –Curva E ou distribuição do tempo de residência (Levenspiel, 2000).

A Figura 2.3 mostra um exemplo de curva E (Levenspiel, 2000).

A curva E é a distribuição mais usada para estudar o escoamento não-ideal.

Como o valor da função $E(t)$ fornece a fração dos elementos da corrente de saída com idade entre t e $t+dt$, que é:

$$E(t)dt$$

então a fração mais nova que a idade t_1 , ou a fração que fica num sistema com um tempo menor que t_1 é:

$$\text{Fração } (t < t_1) = \int_0^{t_1} E(t) dt \quad \text{eq. (2.4)}$$

enquanto que a fração de material mais velha ou aquela que fica com tempo maior que t_1 é:

$$\int_{t_1}^{\infty} E(t) dt = 1 - \int_0^{t_1} E(t) dt \quad \text{eq. (2.5)}$$

2.2.5. Tempo médio da distribuição do tempo de residência

O tempo médio é um importante parâmetro na caracterização da distribuição do tempo de residência (Chakrabandhu, 2000). É representado por $\bar{t}$ e pode ser calculado a partir da curva da concentração pelo tempo $C(t)$ para um experimento realizado com a função pulso, com uma vazão constante, da seguinte forma:

$$\bar{t} = \frac{\int_0^{\infty} tC(t)dt}{\int_0^{\infty} C(t)dt} \quad \text{eq. (2.6)}$$

Se a curva de distribuição só é conhecida em alguns valores discretos, este tempo médio pode ser calculado da seguinte forma:

$$\bar{t} \cong \frac{\sum_i t_i C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \quad \text{eq. (2.7)}$$

Para a curva de $E(t)$, o tempo médio é dado por:

$$\bar{t} = \int_0^{\infty} tE(t)dt \cong \sum_i t_i E(t_i) \Delta t_i \quad \text{eq. (2.8)}$$

Na Figura 2.4 são apresentadas algumas das equações descritas anteriormente para um experimento com função pulso.

Figura 2.4 - Informação útil obtida a partir de um experimento com função pulso do traçador (Levenspiel, 2000)

O espalhamento da distribuição é representado pela variância (σ^2) que é particularmente útil para fazer coincidir as curvas experimentais com uma das famílias das curvas teóricas e é definida como:

$$\sigma^2 = \frac{\int_0^\infty (t - \bar{t})^2 C dt}{\int_0^\infty C dt} = \frac{\int_0^\infty t^2 C dt}{\int_0^\infty C dt} - (\bar{t})^2 \quad \text{eq. (2.9)}$$

Para valores discretos de tempo, a variância pode ser estimada da seguinte forma:

$$\sigma^2 \cong \frac{\sum_i (t_i - \bar{t})^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} \cong \frac{\sum_i t_i^2 C_i \Delta t_i}{\sum_i C_i \Delta t_i} - (\bar{t})^2 \quad \text{eq. (2.10)}$$

Para uma curva $E(t)$, a variância é dada como:

$$\sigma^2 = \int_0^\infty t^2 E(t) dt - (\bar{t})^2 \cong \sum_i t_i^2 E(t_i) \Delta t_i - (\bar{t})^2 \quad \text{eq. (2.11)}$$

2.2.6. Função F

Outra forma de expressar a DTR é através da função $F(t)$, definida como função soma ou função acumulativa do tempo de residência que resulta de integrar a curva $E(t)$ no tempo.

$$F(t) = \int_0^t E(t)dt \quad \text{eq. (2.12)}$$

Esta equação representa, diretamente, a fração de fluido que permanece dentro do tanque por um período menor ou igual a t (Levenspiel, 1986). Diferenciando F , obtem-se:

$$E(t) = \frac{dF(t)}{dt} \quad \text{eq. (2.13)}$$

Esta relação é apresentada graficamente na Figura 2.5.

Figura 2.5 – Relação entre as curvas E e F (Levenspiel, 2000)

2.2.7. Funções adimensionalizadas

É conveniente representar o tempo em relação ao tempo médio de residência na forma adimensional, usando a variável tempo adimensional θ . Da mesma forma, a função de distribuição do tempo de residência pode ser representada adimensionalmente $E(\theta)$:

$$\theta = \frac{t}{\bar{t}} \quad \text{eq. (2.14)}$$

$$E(\theta) = \bar{t}E(t) \quad \text{eq. (2.15)}$$

Fazendo uma relação com a equação (2.3) tem-se:

$$\int_0^{\infty} E(t)dt = \int_0^{\infty} E(\theta)d\theta = 1 \quad \text{eq. (2.16)}$$

2.2.8. Efeito ajuste

Um critério razoável para o ajuste dos parâmetros de um modelo matemático de DTR é a minimização do erro quadrático entre valores experimentais e calculados da curva de DTR:

$$\sum \text{erro}^2 = \min \left[\sum_i^n \left(E_{\text{exp},i}(\theta) - E_{\text{modelo},i}(\theta) \right)^2 \right] \quad \text{eq. (2.17)}$$

2.3. Modelos matemáticos para o escoamento não-ideal

Os modelos matemáticos são úteis para representar escoamentos reais, para fazer o aumento de escala e para diagnosticar problemas de escoamento. Tem-se diferentes tipos de modelos, que dependem de quão próximo o escoamento esteja do escoamento pistonado, do escoamento com mistura perfeita ou de algum outro escoamento entre estes dois modos ideais.

2.3.1. Modelo de dispersão axial

Supondo que um pulso ideal de traçador é introduzido no fluido que entra em um vaso, o pulso se espalha à medida que passa através do vaso. Para caracterizar o espalhamento de acordo com este modelo (Figura 2.6) é considerado que um processo parecido com a difusão seja imposto ao escoamento pistonado (Levenspiel, 2000).

Figura 2.6 –Espalhamento do traçador de acordo com o modelo de dispersão (Levenspiel, 2000)

Este modelo é chamado de modelo de dispersão axial. O coeficiente da dispersão D (m^2/s) representa este processo de espalhamento da seguinte forma:

- D elevado significa um espalhamento rápido do traçador.
- D baixo significa um espalhamento lento.
- D nulo significa espalhamento inexistente; logo, escoamento pistonado.

O grupo adimensional que caracteriza o espalhamento em todo vaso é o número de Peclet (Pe) definido como (Levenspiel, 2000):

$$Pe = \frac{uL}{D} \quad \text{eq. (2.18)}$$

Onde:

u = velocidade média (m/s)

L = comprimento do vaso (m)

D = coeficiente de dispersão axial (m²/s)

Uma equação analítica deste modelo para a concentração de traçador na saída ao longo do tempo é dada por Nascimento e Giudici (1989):

$$E(\theta) = e^{-\frac{Pe}{2}} \sum_{i=1}^{\infty} \frac{(-1)^{i+1} 8\alpha_i^2}{4\alpha_i^2 + 4Pe + Pe^2} \exp\left(\frac{-\theta(Pe^2 + 4\alpha_i^2)}{4Pe}\right) \quad \text{eq. (2.19)}$$

onde α_i é determinado calculando as raízes das seguintes equações:

$$\text{tangente} \left(\frac{\alpha_i}{2} \right) = \frac{Pe}{4\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)} \quad \text{se } i \text{ é ímpar} \quad \text{eq. (2.20)}$$

$$\text{cotangente} \left(\frac{\alpha_i}{2} \right) = \frac{-Pe}{4\left(\frac{\alpha_i}{2}\right)} \quad \text{se } i \text{ é par} \quad \text{eq. (2.21)}$$

A equação (2.19) pode ter problemas numéricos para valores de θ muito pequenos ou para valores de Pe muito grandes, assim, recomenda-se usar em seu lugar a seguinte aproximação (Gouvêa et.al, 1990):

$$E(\theta) = \left(\frac{Pe + 1}{4\pi\theta^3} \right)^{\frac{1}{2}} \exp \left(\frac{-(Pe + 1)(1 - \theta)^2}{4\theta} \right) \quad \text{eq. (2.22)}$$

A equação (2.22) também pode ser apresentada na forma dimensional:

$$E(t) = \frac{1}{\bar{t}} \sqrt{\frac{Pe + 1}{4\pi \left(\frac{t}{\bar{t}} \right)^3}} \exp \left[\frac{-(Pe + 1) \left(1 - \frac{t}{\bar{t}} \right)^2}{4 \left(\frac{t}{\bar{t}} \right)} \right] \quad \text{eq. (2.23)}$$

Os parâmetros para estas equações são $\bar{t}$ e Pe .

2.3.2. Modelo de N tanques em série

Este modelo pode representar um reator tubular real e pode ser usado para toda vez que o modelo de dispersão for usado; para um desvio não tão grande do escoamento pistonado, ambos os modelos dão resultados idênticos para todas as finalidades práticas (Levenspiel, 2000).

O modelo de dispersão tem a vantagem de que todas as correlações para escoamento em reatores reais usam invariavelmente este modelo. Por outro lado, o modelo de tanques em série é simples, pode ser usado com qualquer cinética e pode ser estendido, sem muita dificuldade, para qualquer arranjo de compartimento (Levenspiel, 2000).

O modelo de tanques considera uma analogia ao escoamento através de uma série de N tanques de mistura perfeita. Este modelo possui como parâmetros N que é o número de tanques e $\bar{t}$ que é o tempo médio de residência da série. A curva de DTR para este modelo na forma dimensional é dada pela equação:

$$E_{\text{Tanques}}(t) = \left(\frac{1}{\bar{t}}\right) \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)^{N-1} \frac{N^N}{(N-1)!} e^{-\frac{t}{\bar{t}}N} \quad \text{eq. (2.24)}$$

Valores não inteiros para número de tanques podem ser considerados calculando-se as fatoriais de números não inteiros através da função Γ :

$$\Gamma(N) = \int_0^{\infty} x^{N-1} e^{-x} dx \quad \text{eq. (2.25)}$$

$$\Gamma(N+1) = N \cdot \Gamma(N) = N \cdot (N-1) \Gamma(N-1) = \dots = N! \Gamma(1) = N! \quad \text{eq. (2.26)}$$

A função gama foi aproximada por um polinômio de grau 5 para o intervalo $1,0 \leq N \leq 2,0$ usando 1001 valores numéricos gerados com o software MatLab (MathWorks, USA) com precisão 10^{-14} . Os coeficientes do polinômio ajustado são: $a_5 = -0,095280563$, $a_4 = +0,881949260$, $a_3 = -3,253059648$, $a_2 = +6,361011447$, $a_1 = -6,587129421$ e $a_0 = +3,692414299$. O ajuste foi realizado com a ferramenta Solver do software Excel (Microsoft, USA). Eis um exemplo de uso da função gama para determinação de um fatorial não inteiro: $4,65! = \Gamma(5,65) = (4,65 \cdot 3,65 \cdot 2,65) \cdot \Gamma(1,65) = (74,2) \cdot 0,90 = 66,8$.

A equação (2.24) estabelece o número de tanques de mistura ideais em série que representam o sistema real. Os parâmetros para esta equação são apresentados na Figura 2.7.

Figura 2.7 - Modelo de N tanques em série (Levenspiel, 2000)

2.3.3. Modelo laminar modificado

Quando um tubo é suficientemente longo e o fluido não é muito viscoso, então os modelos de dispersão e de tanques em série podem ser usados para representar o escoamento nestes vasos. Para um fluido viscoso e/ou em baixa velocidade normalmente tem-se o escoamento laminar, com seu característico perfil parabólico de velocidades. Além disto, por causa da alta viscosidade, há apenas uma leve difusão radial entre as camadas mais lentas e mais rápidas de fluido. Então o modelo praticamente assume que cada elemento de fluido desliza sobre o seu vizinho, sem haver interação pela difusão molecular. Assim, a dispersão nos tempos de residência é causada somente por variações na velocidade. Este escoamento é mostrado na Figura 2.8 (Levenspiel, 2000).

Figura 2.8 - Escoamento do fluido de acordo com o modelo de convecção (Levenspiel, 2000)

A equação que representa este comportamento é:

$$E(\theta) = \begin{cases} \frac{1}{2\theta^n} & \text{para } \theta \geq 0,5 \\ 0 & \text{para } \theta < 0,5 \end{cases} \quad \text{eq. (2.27)}$$

Onde o expoente n pode ter valores de 1, 2 ou 3 dependendo da forma como o traçador é injetado e medido (Levenspiel, 2000).

Um estudo feito por Rutheven (1971) apresenta uma dedução teórica para este modelo para escoamento em tubos helicoidais:

$$E(\theta) = \begin{cases} \frac{0,705}{\theta^{3,81}} & \text{para } \theta \geq 0,613 \\ 0 & \text{para } \theta < 0,613 \end{cases} \quad \text{eq. (2.28)}$$

Escrevendo esta equação em formato generalizado usando parâmetros m e n :

$$E(\theta) = \begin{cases} \frac{m}{\theta^n} & \text{para } \theta \geq \theta_i \\ 0 & \text{para } \theta < \theta_i \end{cases} \quad \text{eq. (2.29)}$$

Para que se cumpra a equação (2.16) é necessário que $m = (n - 1)\theta_i^{n-1}$, substituindo na equação (2.29) e convertendo para a forma dimensional, temos a equação para o modelo laminar modificado ($n > 2$):

$$E(t) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{t}} \frac{(n - 2)^{n-1}}{(n - 1)^{n-2}} \left(\frac{t}{\bar{t}}\right)^{-n} & \text{para } t \geq \frac{(n - 2)}{(n - 1)} \bar{t} \\ 0 & \text{para } t < \frac{(n - 2)}{(n - 1)} \bar{t} \end{cases} \quad \text{eq. (2.30)}$$

Os parâmetros desta equação são $\bar{t}$ e n .

2.3.4. Modelo combinado PFR+CSTR

Modelos combinados são úteis para finalidades de diagnóstico e para apontar com precisão um escoamento defeituoso e sugerir as possíveis causas. Os modelos de escoamento podem ser de diferentes níveis de sofisticação, que assumem os extremos: escoamento pistonado e escoamento com mistura perfeita. No modelo combinado PFR+CSTR, é considerada uma associação de um vaso com escoamento pistonado (PFR), *plug flow reactor*, com um vaso de mistura perfeita (CSTR), *continuous stirred tank reactor*, conforme a Figura 2.9 onde V é o volume total e v é a vazão (Levenspiel, 2000).

$$\text{Volume total } V \dots = \left\{ \begin{array}{l} V_p \dots \text{região de escoamento pistonado} \\ V_m \dots \text{região de escoamento com mistura perfeita} \\ V_d \dots \text{região de estagnação ou morta, no interior do vaso} \end{array} \right\} V_a \dots \text{volume ativo}$$

Figura 2.9 - Modelo combinado (escoamento pistonado seguido do escoamento mistura perfeita) (Levenspiel, 2000)

A curva de DTR para este modelo é dada pela seguinte equação:

$$E(t) = \begin{cases} \frac{1}{\bar{t}_M} \exp\left(\frac{-t + \bar{t}_p}{\bar{t}_M}\right) & \text{para } t \geq \bar{t}_p \\ 0 & \text{para } t < \bar{t}_p \end{cases} \quad \text{eq. (2.31)}$$

onde os parâmetros são os tempos médios no tanque de mistura $\bar{t}_M$ e no *reator plug-flow*, $\bar{t}_p$ sendo que $\bar{t}_M = \bar{t}_M + \bar{t}_p$

A maneira mais rápida de distinguir experimentalmente entre os modelos é notar como uma alimentação em pulso de traçador se espalha na medida em que ele se move ao longo de um canal de escoamento. A Figura 2.10 mostra uma comparação de três modelos diferentes: difusão pura, laminar (convecção pura) e dispersão.

Figura 2.10 - Comparação da DTR de três modelos diferentes (Levenspiel, 2000)

2.4. Convolução

Se dois sistemas são diferentes de alguma forma, eles irão ter respostas diferentes, assim a resposta a um pulso caracteriza completamente um sistema. Pelo tanto, se conhecemos a resposta ao pulso de um sistema, temos condições de calcular a resposta deste a qualquer sinal na entrada. Então o sinal de saída é o resultado da

convolução do sinal de entrada com a resposta ao pulso do sistema. A convolução é uma operação matemática onde dois sinais são combinados para gerar um terceiro.

Supondo que introduzimos no vaso o sinal de traçador C_{entrada} , cuja variação com o tempo t seja aquela mostrada na Figura 2.11. Ao passar através do vaso, o sinal será modificado de modo a dar um sinal de saída $C_{\text{saída}}$ variável com o tempo t . Uma vez que o escoamento com esta DTR particular é responsável por esta modificação, vamos relacionar C_{entrada} , $E(t)$ e $C_{\text{saída}}$.

Figura 2.11 - Esquema mostrando a dedução da integral de convolução (Levenspiel, 2000)

Na Figura anterior, observando o traçador que deixa o vaso no instante t (isto é mostrado como o retângulo estreito B), podemos escrever:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Traçador que deixa o sistema} \\ \text{no retângulo } B \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Traçador que entra } t' \text{ segundos antes de } t \\ \text{e que permanece no vaso por um tempo } t' \end{array} \right)$$

O retângulo estreito A representa o traçador que entra t' antes de t . Em termos deste retângulo, a equação acima pode ser escrita como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Traçador que deixa o sistema} \\ \text{no retângulo } B \end{array} \right) = \sum_{\substack{\text{todos os retângulos} \\ A \text{ que entram antes} \\ \text{do tempo } t}} \left(\begin{array}{c} \text{Traçador no} \\ \text{retângulo } A \end{array} \right) \left(\begin{array}{c} \text{Fração de traçador em } A, \\ \text{que permanece no vaso por} \\ t' \text{ segundos} \end{array} \right)$$

Em símbolos e tomando os limites (encolhendo os retângulos), obtemos a relação desejada, que é chamada de integral de convolução (Levenspiel, 2000), onde $E(t)$ é a DTR do vaso determinada pela técnica de pulso.

$$C_{saída}(t) = \int_0^t C_{entrada}(t - t') E(t') dt' \quad \text{eq. (2.32)}$$

e da mesma forma temos:

$$C_{saída}(t) = \int_0^t C_{entrada}(t') E(t - t') dt' \quad \text{eq. (2.33)}$$

então se diz que $C_{saída}$ é a convolução de $C_{entrada}$ com $E(t)$ que, escrevendo de forma concisa, resulta em:

$$C_{saída} = E \cdot C_{entrada} \quad \text{ou} \quad C_{saída} = C_{entrada} \cdot E \quad \text{eq. (2.34)}$$

Na Figura 2.12 se mostra a modificação de um sinal de alimentação de traçador que ocorre passando através de três regiões sucessivas.

Figura 2.12 - Modificação de um sinal de alimentação de traçador, $C_{entrada}$, passando através de três regiões sucessivas. (Levenspiel, 2000)

O sinal de saída $C_{saída}$ pode ser determinado por uma tripla convolução:

$$C_{saída} = C_{entrada} \cdot E_a \cdot E_b \cdot E_c \quad \text{eq. (2.35)}$$

A convolução de sinais pode ser realizada analiticamente através do uso de transformadas de Laplace ou de Fourier. Outra opção é o uso de uma abordagem numérica. A eq.(2.33) pode ser numericamente discretizada na forma (Levenspiel, 2000):

$$C_{saída}(i) = \Delta t \cdot \sum_{j=1}^{i-1} C_{entrada}(i-j) \cdot E(j) \quad \text{eq. (2.36)}$$

onde i e j representam instantes discretos de tempo e Δt é a duração de cada intervalo discreto de tempo. Se o sinal discreto de entrada $C_{entrada}(i)$ e a DTR do vaso $E(j)$ forem conhecidas, então o sinal de saída pode ser determinado numericamente usando a metodologia na tabela 2.1, onde o valor de $C_{saída}$ é a somatória dos termos na respectiva linha.

Tabela 2.1 - Determinação numérica da convolução de sinais

$C_{saída}$	$j = 1$	$j = 2$	$j = 3$	$j = 4$	$j = 5$	...
$C_{saída}(i=1) =$	0					
$C_{saída}(i=2) =$	$C_{entrada}(1) \cdot E(1) +$	0				
$C_{saída}(i=3) =$	$C_{entrada}(2) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(1) \cdot E(2) +$	0			
$C_{saída}(i=4) =$	$C_{entrada}(3) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(2) \cdot E(2) +$	$C_{entrada}(1) \cdot E(3) +$	0		
$C_{saída}(i=5) =$	$C_{entrada}(4) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(3) \cdot E(2) +$	$C_{entrada}(2) \cdot E(3) +$	$C_{entrada}(1) \cdot E(4) +$	0	
$C_{saída}(i=6) =$	$C_{entrada}(5) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(4) \cdot E(2) +$	$C_{entrada}(3) \cdot E(3) +$	...	...	
$C_{saída}(i=7) =$	$C_{entrada}(6) \cdot E(1) +$	$C_{entrada}(5) \cdot E(2) +$	...	...	...	...
$C_{saída}(i=8) =$	$C_{entrada}(7) \cdot E(1) +$	...	...	...	...	...
...	...	...	...	...	...	...

2.5. Uso da DTR para cálculo da letalidade em tubo

O conhecimento da DTR no tubo de retenção é fundamental para avaliação do nível do tratamento térmico (letalidade). O tubo de retenção de um pasteurizador pode ser considerado como um reator químico tubular onde ocorre a “reação” de morte de microrganismos. A equação cinética mais usual para a morte de microrganismos em processo térmico é uma cinética de primeira ordem onde os parâmetros são $D(T_{ref})$ e z , como na equação (2.37). Nesta equação, n é a concentração de microrganismos viáveis e Δt é a duração do tratamento (Rao e Loncin, 1974a).

$$\log \left(\frac{n}{n_0} \right) = - \frac{\Delta t}{D(T_{ref})} \text{alog} \left(\frac{T - T_{ref}}{z} \right) \quad \text{eq. (2.37)}$$

O parâmetro $D(T_{ref})$ representa o tempo de tratamento térmico na temperatura de referência (T_{ref}) para obter uma redução decimal na população de microrganismos, ou seja, ter $n/n_0 = 0,10$. O parâmetro z representa a influência da temperatura no valor de D da seguinte forma:

$$\log \left(\frac{D(T)}{D(T_{ref})} \right) = - \left(\frac{T - T_{ref}}{z} \right) \quad \text{eq. (3.38)}$$

Para um processo não isotérmico com um histórico de temperatura $T(t)$, a redução na população de microrganismos é dada por (Rao e Loncin, 1974a):

$$\log \left(\frac{n}{n_0} \right) = - \frac{1}{D(T_{ref})} \int_0^{\infty} \text{alog} \left(\frac{T - T_{ref}}{z} \right) dt \quad \text{eq. (2.39)}$$

Para um processo em tubo de retenção com DTR conhecido no formato $E(t)$, o número de microrganismos viáveis na saída do tubo pode ser obtido da mesma forma que a concentração de um reagente na saída de um reator tubular (Levenspiel, 2000):

$$\frac{n}{n_0} = \int_0^{\infty} \frac{n(t)}{n_0} E(t) dt \quad \text{eq. (2.40)}$$

Substituindo a equação cinética do tratamento térmico (equação (2.37)) na equação (2.40) tem-se (Rao e Loncin, 1974b):

$$\frac{n}{n_0} = \int_0^{\infty} \text{alog} \left[-\frac{1}{D(T_{ref})} \text{alog} \left(\frac{T(t) - T_{ref}}{z} \right) \right] E(t) dt \quad \text{eq. (2.41)}$$

Esta integral pode ser avaliada numericamente e é necessário o conhecimento do histórico de temperatura $T(t)$ e da curva da DTR do tubo, $E(t)$.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi dividido em três etapas:

Na primeira etapa, para estudar a variação da condutividade elétrica da solução em função da concentração do traçador e de temperatura e concentração, foi construída a curva de calibração para o traçador cloreto de sódio em solução aquosa.

Na segunda etapa, foi estudada a distribuição de tempo de residência, inicialmente no sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro) e posteriormente em cada parte do pasteurizador (tubo de retenção 1, tubo de retenção 2 e trocador de calor a placas com diferentes configurações).

Na terceira parte, foi estudada a distribuição de tempos de residência no processo de pasteurização completo.

Os materiais, equipamentos e reagentes utilizados são listados abaixo e os métodos utilizados são descritos separadamente para cada etapa do processo.

3.1. Materiais e Equipamentos

✓ Trocador de calor ARMFIELD, modelo FT-43 A, tipo placas, de laboratório, com acessórios e componentes: unidade processadora de pasteurização, console de controle, unidade de refrigeração modelo FT61-B, interface de aquisição de dados ARMFIELD, modelo FT43 A-90 IFD. Especificações:

- Bomba de alimentação; peristáltica marca MASTERFLEX, capacidade máxima 30L/h;
- Controlador de temperatura de pasteurização: microprocessador com ação PID para o aquecedor da água, faixa de 0 a 95 °C;
- Placas lisas de aço inoxidável AISI 316, com gaxetas em silicone sanitário; área de troca térmica 50 cm²;

- Sensores de temperatura; seis termopares providos de poço inoxidável para uso em seis possíveis pontos de medição;
- Sistema de aquecimento: bomba centrífuga de circulação de água quente aquecida por uma resistência elétrica de capacidade 1,5 kW. A vazão de água quente é variável através da válvula de agulha do rotâmetro até 1,5 L/min;
- Tanque de alimentação com capacidade de 4 litros;
- Tubos de retenção: “S” 75 cm³, Helicoidal 200 cm³;
- Sistema de resfriamento ARMFIELD modelo FT-61 com bomba centrífuga interna e resfria até 4 °C;

Figura 3.1 - Pasteurizador de laboratório ARMFIELD modelo FT-43 e placas do trocador de calor

- ✓ Balança marca CHYO, modelo JK-200, precisão 0,0001g;
- ✓ Balança marca METTLER, modelo PE 11, precisão 0,1g;
- ✓ Banho de água termostaticado, marca UNITEMP, modelo 112/2, 1000kW.
- ✓ Cronômetro analógico com precisão de 0,1s;
- ✓ Máquina de cubos de gelo, marca EVEREST, modelo EGC 50;
- ✓ Termômetro de mercúrio de precisão 0,1 °C, marca INCOTERM, modelo 1056;

- ✓ Termômetro digital marca INSTRUTHERM, modelo Th 1200C, com sensor de temperatura termopar tipo K com junta exposta e precisão 0,1 °C;
- ✓ Condutivímetro marca YSI Modelo 3200, para determinação da condutividade elétrica de líquidos com as seguintes especificações:
 - Constante de célula auto-ajustável 0,005 a 100;
 - Leitor de unidades seletivo: uS/cm, uS, ppt, ohm-cm, ohm,TDS;
 - Porta serial RS232. para comunicação com o computador;
 - Escala da condutividade elétrica 0 μ S a 3,00 S;

Figura 3.2 - Condutivímetro YSI Modelo 3200

- ✓ Célula de condutividade elétrica YSI modelo 3445:
 - Tipo de célula: fluxo;
 - Material: Pyrex 7740;
 - Dimensões: Comprimento total 146 mm, diâmetro externo máximo 19 mm e diâmetro interno da câmara 10 mm;
 - Volume interno 15 mL;
 - Cabo e adaptador de célula YSI modelo 3232;

Figura 3.3 - Célula YSI modelo 3445

- ✓ Vidraria comum de laboratório.
- ✓ Seringas de volume de 1 mL (tipo “insulina”).

3.2. Reagentes

- ✓ Soluções aquosas de cloreto de sódio (PA) de 0,25 g/L; 0,5 g/L; 0,75 g/L; 1,00 g/L; 1,25 g/L; 1,50 g/L; 1,75 g/L.
- ✓ Solução aquosa saturada de cloreto de sódio.

3.3. Metodologia

3.3.1. *Curvas de calibração para o traçador*

As curvas de calibração para o traçador foram obtidas para estudar a variação da condutividade elétrica da solução com a temperatura e a concentração de cloreto de sódio. Soluções de cloreto de sódio com diferentes concentrações de cloreto de sódio foram carregadas na célula do condutivímetro e mergulhadas num banho termostático a temperaturas controladas no intervalo de 15 °C a 32 °C.

Para poder esfriar o banho do termostato até a temperatura de 15 °C foi necessária a adição de cubos de gelo.

A mudança de temperatura dentro da célula foi registrada com ajuda de um termômetro digital provido de um termopar com cabo flexível que permitiu ser introduzido no orifício da célula como é mostrado na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Esquema dos ensaios das curvas de calibração para o traçador

Os dados de condutividade elétrica obtidos durante este procedimento foram registrados em um condutivímetro YSI 3200 e recolhidos manualmente.

Para a obtenção das curvas de calibração foram testadas soluções de cloreto de sódio de concentrações de 0,25 g/L, 0,5 g/L, 0,75 g/L, 1,00 g/L, 1,25 g/L, 1,50 g/L e 1,75 g/L.

A construção das curvas de calibração seguiu os seguintes itens:

- a) Para cada concentração foi feito um gráfico de condutividade elétrica vs. temperatura, e obtida uma equação de linearidade do tipo:

$$y = A + Bx \quad \text{eq. (3.1)}$$

onde “y” é a condutividade elétrica e “x” a temperatura.

- b) Os valores de A e B obtidos no item (a) foram graficados em função das concentrações “ c ” e ajustados em curvas polinomiais do tipo:

$$A = a_1c + a_2c^2 \quad \text{eq. (3.2)}$$

$$B = b_1c + b_2c^2 \quad \text{eq. (3.3)}$$

respectivamente, obtendo valores específicos para os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 . O formato destas equações foi escolhido com base no comportamento observado experimentalmente.

- c) O correlacionamento entre a condutividade elétrica, concentração e temperatura foi realizado utilizando a seguinte equação:

$$\text{Condutividade}_{\text{calculada}} = A + BT \quad \text{eq. (3.4)}$$

$$\text{Condutividade}_{\text{calculada}} = (a_1c + a_2c^2) + (b_1c + b_2c^2)T \quad \text{eq. (3.5)}$$

onde “ c ” é a concentração e “ T ” a temperatura. Com esta equação foi possível ter uma relação de dados da condutividade elétrica experimental com a condutividade elétrica calculada.

- d) A partir da equação (3.6) foi possível obter valores de concentração a partir de dados de condutividade elétrica, temperatura, usando os parâmetros já ajustados a_1 , a_2 , b_1 e b_2 .

$$\text{Concentração} = \frac{-\beta + \sqrt{\beta^2 - 4\alpha\gamma}}{2\alpha} \quad \text{eq. (3.6)}$$

onde:

$$\alpha = a_2 + b_2 T$$

$$\beta = a_1 + b_1 T$$

$$\gamma = -\text{condutividade}$$

3.3.2. Distribuição do tempo de residência

Foi utilizado um método genérico para todos os ensaios experimentais. As curvas de distribuição do tempo de residência (DTR) para cada ensaio foram obtidas através da técnica condutimétrica.

Em uma corrente de alimentação de água com concentração entre 0,5 e 1,0 g/L de cloreto de sódio circulando a uma vazão constante predeterminada, sem a presença de bolhas internas, foi provocada uma perturbação em forma de pulso por meio da injeção de um traçador que elevou a condutividade elétrica do fluido.

O traçador injetado na corrente foi uma solução saturada de cloreto de sódio com volume de 0,05 mL, com a ajuda de uma seringa (tipo insulina) perfurando o tubo de silicone.

Um condutivímetro on-line (YSI 3200) com célula de escoamento (YSI 3445) monitorou e registrou a condutividade elétrica ao longo do tempo na saída do processo (frequência de aquisição: 1 s).

A temperatura foi registrada dentro da célula usando termômetro digital, como na Figura 3.4.

Para estudar a influência da vazão na distribuição do tempo de retenção, para o caso do sistema de aquisição de dados e tubos de retenção 1 e 2, foram testadas seis vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h. Para o estudo do trocador de calor a placas e do processo de pasteurização, foram testadas três vazões de 15, 20 e 25 L/h que são vazões típicas de operação do equipamento. Todas estas vazões foram verificadas com a ajuda de um rotâmetro calibrado adicionado ao equipamento de pasteurização do laboratório (ARMFIELD, modelo FT-43 A).

Para o estudo de tempos de residência, as variáveis calculadas a partir dos dados experimentais de condutividade elétrica, temperatura e tempo foram as seguintes:

$E(t)$, $F(t)$, θ , $E(\theta)$ e $\bar{t}$.

Valores de concentração do traçador foram calculados com a equação (3.6) usando os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 da curvas de calibração do traçador.

Valores de $E(t)$ e $F(t)$ foram calculados com as equações (2.2) e (2.12) respectivamente. As integrais foram avaliadas pelo método numérico de trapézios usando software Excel (Microsoft). O tempo médio de residência ($\bar{t}$) foi calculado mediante a equação (2.6).

Valores de tempos adimensionais (θ) foram obtidos com a equação (2.14) e os valores de $E(\theta)$ com a equação (2.15). Também foram feitas as respectivas verificações das equações (2.3) e (2.16).

Um exemplo da forma de cálculo utilizada para cada ensaio é apresentado no anexo A (Exemplo de uma planilha de cálculo para obter $E(t)$, $F(t)$, $E(\theta)$ e $\bar{t}$ a partir de dados experimentais), onde a interpretação de $\int_1$, $\int_2$, e $\int_3$ é a seguinte:

$$\int_1 = \int_0^{\infty} C(t) dt = \sum_i \left(\left(\frac{C_{i+1} + C_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right) \quad \text{eq.(3.7)}$$

$$\int_2 = \int_0^{\infty} E(t) dt = \sum_i \left(\left(\frac{E_{i+1} + E_i}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right) \quad \text{eq.(3.8)}$$

$$\int_3 = \int_0^{\infty} tE(t) dt = \sum_i \left(\left(\frac{(E_{i+1}t_{i+1}) + (E_it_i)}{2} \right) (t_{i+1} - t_i) \right) \quad \text{eq.(3.9)}$$

Com os valores obtidos deste tipo de planilha de cálculo (anexo A) é possível obter diferentes curvas típicas de DTR em resposta ao pulso provocado pela injeção do traçador na entrada do processo.

A Figura 3.5 ilustra exemplos de curvas de DTR obtidas.

Figura 3.5 – Exemplo de curvas típicas de DTR para injeção de um traçador em pulso.

a) Curva $E(t)$; b) Curva $F(t)$

Estas curvas fornecem o grau de dispersão ou mistura no escoamento, o tempo mínimo de residência (importante para processos de tratamento térmico) e o grau de assimetria da distribuição.

Como o volume da célula do condutivímetro não é desprezível frente ao volume dos processos analisados, deve-se considerar sua influência sobre a curva de DTR obtida experimentalmente. A Figura 3.6 mostra um exemplo da interferência da célula na determinação da DTR de um processo genérico. Deseja-se obter a curva E do centro da figura, mas tem-se a curva à direita que tem atraso e dispersão maiores.

Figura 3.6 - Influência da célula do sistema de aquisição na determinação de uma DTR.

A curva de DTR obtida experimentalmente pode ser considerada como sendo a convolução da curva do processo com a curva da célula do sistema de aquisição. Então, conhecida a DTR do sistema de aquisição, pode-se fazer uma operação de deconvolução na curva de saída para retirar a interferência do sistema de aquisição. Esta operação matemática não é simples, especialmente quando os dados são discretos.

A solução foi a seguinte: 1) foi utilizada uma curva teórica para representar a DTR do processo e faz-se a sua convolução numérica com a DTR do sistema de aquisição; 2) sobrepõem-se a curva obtida aos dados experimentais e compara-se ambos; 3) ajustou-se os parâmetros do modelo teórico de forma a melhorar a aproximação da curva convolucionada com os dados experimentais. Este ajuste do modelo é feito de forma sistemática resolvendo o problema de otimização da equação (2.17) minimizando a somatória do erro quadrático entre dados experimentais e calculados da curva $E(t)$. Foi utilizado o software Excel para esta tarefa, nele é feita a convolução da curva teórica com a DTR do sistema de aquisição como na tabela 2.1 e a ferramenta Solver foi usada para ajustar os parâmetros para minimizar o erro. Para a representação do modelo matemático e da sua convolução é utilizado um intervalo $\Delta t = 0,05$ s.

3.3.3. Distribuição do tempo de residência do sistema de aquisição

Para estudar a DTR do sistema de aquisição de dados de condutividade elétrica (célula do condutivímetro) foi aplicado o método descrito no item (3.3.2) descrito anteriormente, com exceção da etapa de convolução numérica.

O esquema utilizado para estes ensaios é apresentado nas Figura 3.7 e 3.8, tendo cuidado de fazer a injeção do traçador de forma instantânea e o mais próximo possível da entrada na célula do condutivímetro.

Figura 3.7 – Esquema dos ensaios do estudo experimental do comportamento do sistema de aquisição.

Figura 3.8 – Fotografia dos ensaios para o estudo do sistema de aquisição.

Foram testadas as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h. Foram feitas oito repetições para cada vazão, as quais foram ajustadas a dois modelos matemáticos fazendo uso de planilhas eletrônicas do Excel (Microsoft) e da sua ferramenta Solver, tendo como variáveis os parâmetros do modelo matemático a ser ajustado e como objetivo a minimização da somatória de desvios entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo matemático utilizado.

Os modelos matemáticos testados foram:

- ✓ Modelo (2.3.2) N tanques em série, calculado com a equação (2.24)
- ✓ Modelo (2.3.1) de dispersão axial, calculado com a equação (2.23)

O melhor modelo ajustado foi determinado com a equação (2.17).

Na Figura 3.9, é apresentado um exemplo do ajuste dos dois modelos matemáticos utilizados nos dados experimentais de um ensaio da célula do condutivímetro.

Figura 3.9 –Exemplo de dados experimentais do sistema de aquisição com ajuste de dois modelos matemáticos (N tanques em série e dispersão axial Pe)

3.3.4. Distribuição do tempo de residência dos tubos de retenção

Nos ensaios de distribuição do tempo de residência tanto no tubo de retenção 1 (tubo “S” 75 cm³), como no tubo de retenção 2 (tubo Helicoidal 200 cm³), foi utilizado o método descrito no item (3.3.2). Foram estudadas seis vazões: 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h e para cada vazão foram feitas três repetições.

Para este estudo experimental, foi necessário injetar o traçador o mais próximo possível da entrada do tubo de retenção e colocar o sistema de aquisição de dados imediatamente depois da saída do mesmo como é mostrado na Figura 3.10.

A Figura 3.11 mostra fotos dos tubos de retenção 1 (curva em “S” com 75 mL) e 2 (helicoidal com 200 mL).

Figura 3.10 – Esquema dos ensaios experimentais para o estudo do comportamento do tubo de retenção

Figura 3.11 – Fotografias dos ensaios de DTR nos tubos de retenção 1 e 2

Modelos matemáticos teóricos para DTR dos tubos foram ajustados conforme procedimento descrito em (3.3.2) onde a convolução da curva teórica com a DTR do sistema de aquisição para a mesma vazão deve se aproximar ao máximo do conjunto de pontos experimentais.

O modelo que melhor se ajusta é aquele que tiver menor somatória de erros quadráticos entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo matemático testado (equação 2.17).

Os modelos testados em cada tubo de retenção foram:

- ✓ Modelo laminar modificado (2.3.3)
- ✓ Modelo de N tanques em série (2.3.2)
- ✓ Modelo de dispersão axial (2.3.1)
- ✓ Modelo combinado PFR+CSTR (2.3.4)

Na Figura 3.12 é apresentado um exemplo de dados experimentais de um ensaio com ajuste dos quatro modelos matemáticos mencionados. São apresentadas também as curvas convolucionadas onde é possível ver que se aproximam bem dos pontos experimentais.

Figura 3.12 – Exemplo de dados experimentais de um ensaio do tubo de retenção 1 ajustados com convolução aos quatro modelos matemáticos (modelo laminar modificado, modelo de N tanques em série, modelo de dispersão axial e modelo combinado PFR+CSTR)

3.3.5. Distribuição do tempo de residência do trocador de calor a placas

Para o estudo da distribuição de tempos de residência no trocador de calor a placas, foi verificada a influência da configuração do trocador de calor a temperatura constante. Foram estudadas configurações de arranjos em série com número par de passes de 2x1; 4x1; 6x1; 8x1; 10x1; 12x1; 14x1; 16x1 e 18x1, pois são os arranjos de passes mais usados na operação do equipamento.

Sua configuração padrão é 6x1/6x1 (aquecimento), 10x1/10x1 (regeneração) e 4x1/4x1 (resfriamento).

Para cada uma das configurações, foram testadas três vazões: 15, 20 e 25 L/h. Para cada estudo foram feitas quatro repetições e o método utilizado para a DTR foi o método descrito no item (3.3.2).

Um esquema similar à Figura 3.10 foi utilizado para o estudo experimental do trocador de calor a placas, neste caso, substituindo somente o tubo de retenção pelo trocador de calor e tomando em conta as mesmas recomendações na injeção do traçador (ver Figura 3.13).

Figura 3.13 – Fotografia de um ensaio de DTR no trocador de calor a placas.

Como no caso do estudo da DTR dos tubos de retenção, no trocador de calor a placas também foi necessário fazer uma convolução do modelo matemático com a DTR ajustada para o sistema de aquisição de dados na mesma vazão, e a respectiva comparação desta convolução com os dados experimentais obtidos.

Os modelos testados para o trocador de calor a placas foram:

- ✓ Modelo laminar modificado (2.3.3)
- ✓ Modelo de N tanques em série (2.3.2)
- ✓ Modelo de dispersão axial (2.3.1)
- ✓ Modelo combinado PFR+CSTR (2.3.4)

O modelo melhor ajustado é aquele que tiver menor somatória de erros entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo matemático (equação 2.17).

3.3.6. Distribuição do tempo de residência do processo de pasteurização

Para o estudo da distribuição de tempos de residência no processo de pasteurização foi utilizado o pasteurizador de laboratório ARMFIELD modelo FT-43, no arranjo padrão do equipamento para leite: tubo de retenção 1 e trocador de calor a placas com configuração de arranjos em série com número par de placas de 6x1/6x1 (aquecimento), 10x1/10x1 (regeneração) e 4x1/4x1 (resfriamento).

Para o estudo experimental do processo de pasteurização, a injeção do traçador é feita na entrada do fluido no trocador de calor a placas na etapa de regeneração térmica (Figuras 1.5 e 3.14), e o sistema de aquisição de dados é colocado imediatamente depois da saída de trocador de calor da etapa de resfriamento. Na Figura 3.14 não é possível ver a injeção do traçador (seringa), pois a mesma está localizada atrás do trocador de calor a placas.

Figura 3.14 – Fotografia de um ensaio de DTR no pasteurizador Armfield FT 43

Verificou-se a influência da vazão no processo. Foram testadas vazões de 15, 20 e 25 L/h. Para cada estudo, foram feitas quatro repetições e o método utilizado foi o método descrito no item (3.3.2). Assim como nos estudos anteriores, foi feita a respectiva convolução numérica do modelo matemático com a DTR ajustada para o sistema de aquisição na mesma vazão, e a respectiva comparação desta convolução com os dados experimentais obtidos.

Os modelos testados para o pasteurizador foram:

- ✓ Modelo laminar modificado (2.3.3)
- ✓ Modelo de N tanques em série (2.3.2)
- ✓ Modelo de dispersão axial (2.3.1)
- ✓ Modelo combinado PFR+CSTR (2.3.4)

Os critérios de ajuste de modelos matemáticos, igual aos procedimentos anteriores foi a menor somatória de erros quadráticos entre os dados experimentais e os dados calculados com o modelo testado (equação 2.17).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Curvas de calibração do traçador

As curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio, obtidas mediante o método descrito no item (3.3.1) são apresentadas na Figura 4.1 onde se observa a variação da condutividade elétrica em relação à temperatura à diferentes concentrações de traçador. Como é esperado, a condutividade elétrica aumenta com a concentração e com a temperatura devido aumento no número de íons disponíveis e na agitação térmica, respectivamente.

Figura 4.1 – Curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio

Seguindo o método descrito no item (3.3.1), obtiveram-se dois gráficos para o ajuste das equações (3.2) e (3.3) e determinação dos parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 , os mesmos que são apresentados na Figura 4.2 com seus respectivos valores de coeficientes de determinação linear (R^2).

Figura 4.2 – Gráficos de ajuste das equações (3.2), (3.3) e os parâmetros a_1 , a_2 , b_1 e b_2 para a construção das curvas de calibração para o traçador cloreto de sódio

Os parâmetros ajustados a_1 , a_2 , b_1 e b_2 para a obtenção da condutividade elétrica em função da concentração e temperatura, são apresentados na tabela 4.1.

Tabela 4.1 – Parâmetros ajustados para as curvas de calibração do traçador cloreto de sódio

Parâmetros ajustados para as equações (3.2) e (3.3)	
a_1	9,23E+02
a_2	-5,23E+01
b_1	4,28E+01
b_2	-2,42E+00
As unidades das variáveis nas equações (3.2) e (3.3) são (μS/cm) para condutividade elétrica; g/L para a concentração e °C para a temperatura.	

A variação da condutividade elétrica com a temperatura e concentração do traçador cloreto de sódio em solução aquosa é então calculada com a equação empírica (4.1), onde as unidades são: c (g/L), T (°C) e condutividade elétrica (μS/cm).

$$\text{Condutividade} = (923,23c - 52,31c^2) + (42,82c - 2,42c^2)T \quad \text{eq.(4.1)}$$

$$\text{para } 15^\circ\text{C} \leq T \leq 32^\circ\text{C} \text{ e } 0,75\text{g/L} \leq c \leq 1,75\text{g/L}$$

Escrevendo esta equação em termos da concentração, tem-se a equação (4.2). Esta equação é usada da seguinte forma: para uma dada temperatura T (°C) e condutividade elétrica da solução ($\mu\text{S/cm}$) medidas experimentalmente, a equação fornece o valor da concentração de traçador, $c(\text{g/L})$.

$$c = \frac{-(-52,31 - 2,42T) + \sqrt{(923,30 + 42,85T)^2 - 4(-52,31 - 2,42T)(-Conductiv)}}{2(-52,31 - 2,42T)} \quad \text{eq. (4.2)}$$

para $443\mu\text{S/cm} \leq \text{Conductiv} \leq 3829\mu\text{S/cm}$ e $15^\circ\text{C} \leq T \leq 32^\circ\text{C}$

O gráfico de paridade dos dados de concentração experimentais e dos dados de concentração calculado com a equação (4.2) é apresentado na Figura 4.3, onde verifica-se um bom ajuste utilizando os quatro parâmetros na equação (4.1). O erro absoluto médio na determinação da concentração é 3,6%.

Figura 4.3 –Paridade dos dados calculados com os dados reais de concentração de cloreto de sódio

4.2. Distribuição do tempo de residência do sistema de aquisição

Utilizando o método descrito no item (3.3.3) foi determinada a DTR do sistema de aquisição de dados de condutividade elétrica. Foram testadas as vazões de 10, 15,

20, 25, 30 e 35 L/h. Como a passagem do traçador pela célula do condutivímetro é tão rápida (tempo médio entre 2 e 5 s) quanto a frequência da aquisição de dados (um dado por segundo), foi necessário realizar cada ensaio oito vezes para identificar o comportamento médio.

Os resultados dos ajustes dos dois modelos de N tanques em série e dispersão axial aos dados experimentais do sistema de aquisição, são apresentados para cada uma das seis vazões estudadas nas tabelas 4.2 a 4.7.

O tempo de residência médio foi determinado através dos pontos experimentais usando a equação (2.7). Nas tabelas, o termo Σerro representa a somatória do erro quadrático minimizado através da equação (2.17). Os parâmetros ajustados foram N e Pe nas equações (2.24) e (2.22), respectivamente.

A temperatura média na célula foi de 24,1 °C.

Tabela 4.2 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 10 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	5,4	5,1	24,8	7,8	0,1
	5,4	4,9	80,3	7,8	0,5
	5,3	5,7	62,1	8,7	0,4
	4,1	3,6	23,8	4,6	0,1
	5,3	3,7	29,4	4,8	0,1
	5,3	2,9	37,3	3,5	0,1
	5,4	4,5	62,6	6,9	0,3
	4,7	3,1	56,8	4,7	4,0
Médias	5,1	4,2	47,1	6,1	0,7
Desvio padrão	0,5	1,0	21,1	1,9	1,3

Tabela 4.3 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 15 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	3,8	4,6	16,1	6,4	0,0
	3,6	4,0	14,1	5,7	0,1
	4,1	7,0	20,7	12,3	0,1
	4,5	3,0	59,7	3,8	0,2
	4,2	2,9	2,9	4,8	0,0
	4,8	4,5	73,1	7,4	0,7
	4,3	1,9	76,8	4,9	0,1
	2,9	1,9	9,5	1,3	0,0
Médias	4,0	3,7	34,1	5,8	0,2
Desvio padrão	0,6	1,7	30,4	3,2	0,2

Tabela 4.4 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 20 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	2,8	3,8	24,0	6,0	0,1
	3,0	5,7	52,8	8,8	0,3
	3,2	7,0	9,4	11,5	0,0
	4,3	5,7	35,7	8,9	0,2
	2,8	1,9	5,3	2,7	0,0
	3,7	1,9	96,9	5,9	0,2
	3,7	1,9	86,8	6,4	0,2
	3,9	6,8	26,0	11,0	0,1
Médias	3,4	4,3	42,1	7,6	0,2
Desvio padrão	0,6	2,2	34,2	2,9	0,1

Tabela 4.5 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 25 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	Σerro^2	Pe	Σerro^2
	3,9	11,0	401,8	19,7	3,4
	2,8	7,7	12,4	12,5	0,0
	3,1	6,1	33,5	9,5	0,2
	2,5	3,2	1,3	4,5	0,0
	3,2	5,7	31,8	8,3	0,2
	2,6	1,9	48,5	7,4	0,2
	2,3	1,9	2,8	3,8	0,0
	3,1	5,3	40,3	8,0	0,2
Médias	3,0	5,3	71,6	9,2	0,5
Desvio padrão	0,5	3,1	134,6	5,0	1,2

Tabela 4.6 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 30 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	$\sum \text{erro}^2$	Pe	$\sum \text{erro}^2$
	2,7	2,2	3,8	12,8	0,2
	1,5	3,7	3,4	3,1	0,0
	2,9	6,8	35,1	10,9	0,2
	2,0	80,3	0,9	14,4	0,0
	3,0	6,7	6,2	13,2	0,2
	3,3	5,6	253,8	8,3	2,3
	2,9	9,8	10,9	12,3	0,1
	2,1	4,7	5,3	8,1	0,0
Médias	2,6	15,0	39,9	10,4	0,4
Desvio padrão	0,6	26,5	87,1	3,7	0,8

Tabela 4.7 - Comportamento do sistema de aquisição com a vazão de 35 L/h

	$\bar{t}$ (s)	Tanques em série		Dispersão axial	
		N	$\sum \text{erro}^2$	Pe	$\sum \text{erro}^2$
	2,7	8,0	36,6	12,8	0,2
	2,1	6,6	0,5	11,7	0,0
	2,4	7,5	0,7	11,4	0,0
	1,8	2,6	5,0	3,1	0,0
	2,2	2,4	2,2	4,4	0,0
	1,9	3,2	0,6	6,7	0,0
	1,8	2,4	0,6	3,2	0,0
	2,4	3,3	1,0	5,4	0,0
Médias	2,2	4,5	5,9	7,3	0,0
Desvio padrão	0,3	2,4	12,5	4,0	0,1

Foi possível identificar mediante a análise das médias da somatória de erros que o modelo que melhor se ajustou aos dados experimentais do sistema de aquisição, nas seis vazões, foi o modelo de dispersão axial, cujo parâmetro é o número de Peclet, Pe .

Nas Figuras 4.4 a 4.9 se apresenta o melhor modelo ajustado junto aos dados experimentais para cada uma das seis vazões estudadas.

Figura 4.4 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 10 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.5 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 15 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.6 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 20 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.7 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 25 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.8 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 30 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

Figura 4.9 – Dados experimentais do sistema de aquisição de dados na vazão 35 L/h ajustados ao modelo matemático de dispersão axial

A variabilidade dos dados experimentais foi grande por diferentes motivos: pela dinâmica do sistema de aquisição, já que o registro da variação da condutividade não é instantâneo; pela não idealidade da injeção do traçador; pelo formato que apresenta a célula do condutivímetro (expansão na entrada e contração na saída) que provoca volumes mortos que atrasam a saída do traçador, e também devido ao volume reduzido da célula o tempo de residência é da mesma ordem de grandeza do que o tempo de amostragem, o que dificulta a obtenção de dados confiáveis.

Na análise dos tempos médios experimentais do sistema de aquisição, determinou-se uma equação de variabilidade do tempo de residência médio em função da vazão. Esta equação foi obtida mediante o ajuste do gráfico dos valores de tempos médios experimentais de todos os ensaios em função da vazão.

O tipo de equação que ficou melhor ajustada foi do tipo potência, como foi observada na Figura 4.10.

Figura 4.10 – Variação de tempos médios experimentais do sistema de aquisição de dados com a vazão.

Então, a equação (4.3) define a relação do tempo médio experimental com a vazão, para o sistema de aquisição de dados.

$$\bar{t} = 10,38 v^{-0,667} \quad \text{eq. (4.3)}$$

onde: v = vazão volumétrica (mL/s)

$\bar{t}$ = Tempo de residência médio (s)

De acordo com a equação (2.1), que define o tempo espacial, esperava-se que o tempo de residência médio fosse igual a $15,0 \text{ } v^{-1,0}$, já que o volume interno da célula é de 15 mL. A diferença em relação ao obtido na equação (4.3) pode ser explicada pela proximidade da velocidade de passagem do traçador pela célula com a velocidade da aquisição de dados. As curvas de DTR para resposta ao estímulo em pulso nas figuras 4.4 a 4.9 são resultado não só do escoamento dentro da célula, mas também da dinâmica de funcionamento do sistema de aquisição.

Fazendo uma análise do melhor modelo ajustado, entre as seis vazões testadas para o estudo do sistema de aquisição de dados, se observou que existe uma variabilidade pequena entre todos os valores obtidos para o número de Pe , isto quer dizer que o valor deste parâmetro não é influenciado pela vazão na faixa de operação testada.

Pelo tanto, o valor do parâmetro Pe a ser utilizado para representar o modelo matemático melhor ajustado para o sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro), foi determinado obtendo um valor médio entre os valores de Pe obtidos para cada vazão.

Na tabela 4.8 são apresentados os valores médios do número de Pe que caracteriza o modelo de dispersão axial junto aos valores de tempos médios de residência obtidos para cada vazão estudada através da equação (4.3).

Estes valores serão posteriormente utilizados para fazer a convolução de todos os dados medidos pelo sistema de aquisição de dados, a uma vazão determinada, conforme descrito no item 3.3.2 do texto.

Tabela 4.8 – Valores dos parâmetros do modelo de dispersão axial para o sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro)

Vazão (L/h)	$\bar{t}$ (s)	Pe
10	5,3	7,8
15	4,0	7,8
20	3,3	7,8
25	2,9	7,8
30	2,5	7,8
35	2,3	7,8

A tabela 4.9 apresenta os valores de tempos de residência médios e os tempos espaciais (calculados com a equação (2.1)), para o sistema de aquisição de dados, juntamente com as porcentagens da discrepância entre os dois valores.

Tabela 4.9 – Tempos médios de residência, tempos espaciais e as porcentagens de discrepância para o sistema de aquisição de dados

Vazão (L/h)	Tempo médio de residência $\bar{t}$ (s)	Tempo espacial τ (s)	% de discrepância
10	5,3	5,4	2,8
15	4,0	3,6	10,2
20	3,3	2,7	18,4
25	2,9	2,2	24,3
30	2,5	1,8	28,7
35	2,3	1,5	32,3

Os valores elevados de discrepância devem estar associados às dificuldades mencionadas anteriormente como o formato da célula e as condições de medição de dados experimentais: O desvio é tão maior quanto a vazão, pois nas maiores vazões o tempo de residência médio (2,3 s) é muito próximo da taxa de amostragem (1 s).

4.3. Distribuição do tempo de residência dos tubos de retenção

Os resultados detalhados para a DTR nos tubos de retenção 1 e 2, obtidos nos ajustes com convolução de cada um dos ensaios nos quatro modelos matemáticos e testados para as seis vazões, são apresentados nas Figuras 4.11 e 4.12 respectivamente. Nestas figuras são mostrados os valores de todos os parâmetros de cada um dos modelos matemáticos ajustados em suas formas dimensionais e a somatória dos erros quadráticos para cada ensaio realizado.

A temperatura média para os ensaios foi de 24,2 °C para o tubo de retenção 1 e 25,1 °C para o tubo de retenção 2. A variação do número de Reynolds (densidade * velocidade * diâmetro / viscosidade) foi de 326,7 a 1143,6 para o tubo de retenção 1 e de 392,1 a 1372,3 para o tubo de retenção 2.

Vazão 10 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
1	14,5	2,5	0,5	1	18,2	59,3	9,0	1	23,6	11,5	2,5	1	36,4	34,7	0,4
7	13,5	3,1	0,8	7	17,0	59,4	5,2	7	18,6	27,2	3,7	7	36,1	19,3	0,8
13	14,3	3,8	0,4	13	17,5	59,4	4,3	13	18,6	37,3	4,1	13	37,6	17,4	1,2
Média	14,1	3,1	0,6	Média	17,6	59,4	6,1	Média	20,3	25,3	3,4	Média	36,7	23,8	0,8
Desvpad	0,5	0,6	0,2	Desvpad	0,6	0,1	2,5	Desvpad	2,9	13,0	0,8	Desvpad	0,8	9,5	0,4
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
2	10,5	3,8	2,2	2	12,8	59,4	4,2	2	13,4	50,8	5,5	2	42,7	16,7	1,9
8	10,9	4,2	5,7	8	13,1	59,5	7,8	8	13,5	58,2	6,9	8	42,9	18,1	6,9
14	11,6	4,1	1,2	14	14,1	59,4	3,7	14	14,8	37,3	3,1	14	45,8	20,1	1,8
Média	11,0	4,0	3,0	Média	13,3	59,4	5,2	Média	13,9	48,8	5,2	Média	43,8	18,3	3,5
Desvpad	0,6	0,2	2,4	Desvpad	0,7	0,0	2,2	Desvpad	0,8	10,6	1,9	Desvpad	1,7	1,7	2,9
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
3	8,3	4,2	1,6	3	10,0	59,4	5,2	3	10,4	46,1	4,2	3	43,7	20,0	2,8
9	9,5	7,6	4,0	9	10,8	59,5	6,3	9	11,0	68,2	6,8	9	49,0	16,6	4,5
15	8,0	5,9	1,1	15	9,5	59,4	4,0	15	9,8	51,4	6,8	15	44,4	10,0	1,8
Média	8,6	5,9	2,3	Média	10,1	59,4	5,1	Média	10,4	55,2	5,9	Média	45,7	15,5	3,0
Desvpad	0,8	1,7	1,6	Desvpad	0,7	0,0	1,2	Desvpad	0,6	11,6	1,5	Desvpad	2,9	5,1	1,4
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
4	6,8	5,0	5,2	4	8,1	59,5	5,1	4	8,1	65,9	3,3	4	43,8	16,3	4,9
10	6,1	6,3	0,8	10	7,2	59,4	2,9	10	7,3	69,3	6,6	10	41,9	8,6	1,2
16	6,0	3,7	2,6	16	7,5	59,4	8,2	16	7,8	36,7	2,7	16	40,1	16,5	2,0
Média	6,3	5,0	2,9	Média	7,6	59,5	5,4	Média	7,7	57,3	4,2	Média	42,0	13,8	2,7
Desvpad	0,4	1,3	2,2	Desvpad	0,5	0,0	2,7	Desvpad	0,4	17,9	2,1	Desvpad	1,9	4,5	1,9
Vazão 30 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
5	5,4	4,6	12,2	5	6,6	59,5	12,2	5	6,6	62,3	7,6	5	44,4	13,7	10,8
11	5,2	10,4	10,6	11	5,9	59,5	25,2	11	5,8	1921,2	8,7	11	43,5	4,8	11,0
17	5,3	7,5	8,7	17	6,1	59,5	19,2	17	6,1	431,7	10,0	17	43,8	7,2	8,8
Média	5,3	7,5	10,5	Média	6,2	59,5	18,9	Média	6,2	805,1	8,8	Média	43,9	8,5	10,2
Desvpad	0,1	2,9	1,8	Desvpad	0,4	0,0	6,5	Desvpad	0,4	984,1	1,2	Desvpad	0,4	4,6	1,2
Vazão 35 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
6	4,9	3,9	6,2	6	5,8	59,5	13,9	6	6,1	47,2	10,0	6	46,8	17,0	5,3
12	5,3	29,1	3,3	12	5,7	59,5	12,7	12	5,5	1072,8	2,6	12	51,7	1,9	3,3
18	4,9	6,6	0,8	18	5,5	59,5	1,2	18	5,4	161,9	4,8	18	47,4	9,1	0,5
Média	5,0	13,2	3,4	Média	5,7	59,5	9,3	Média	5,7	427,3	5,8	Média	48,6	9,4	3,0
Desvpad	0,3	13,8	2,7	Desvpad	0,1	0,0	7,0	Desvpad	0,4	562,0	3,8	Desvpad	2,7	7,6	2,4

Figura 4.11 – Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 1 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.

Cabe indicar, que todos os termos presentes nas tabelas das Figuras 4.11 e 4.12 fazem referência aos parâmetros dos modelos matemáticos ajustados.

Vazão 10 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
1	39,5	4,6	0,7	1	45,6	59,4	4,2	1	47,7	64,2	6,0	1	106,9	38,5	1,7
7	38,6	4,7	1,0	7	44,6	59,4	4,8	7	46,1	70,3	5,7	7	105,6	33,3	1,6
13	38,2	4,6	0,6	13	44,3	59,4	4,4	13	45,5	77,9	5,4	13	102,8	36,2	1,8
Média	38,8	4,6	0,8	Média	44,8	59,4	4,5	Média	46,4	70,8	5,7	Média	105,1	36,0	1,7
Desvpad	0,7	0,1	0,2	Desvpad	0,7	0,0	0,3	Desvpad	1,2	6,8	0,3	Desvpad	2,1	2,6	0,1
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
2	28,8	2,3	1,8	2	33,0	59,5	7,4	2	33,1	136,9	8,1	2	118,8	28,4	2,0
8	29,0	6,0	3,6	8	33,3	59,4	11,9	8	33,4	117,4	13,9	8	120,8	26,0	4,4
14	29,0	6,7	2,0	14	32,7	59,5	8,6	14	32,9	126,4	9,3	14	120,8	22,7	3,0
Média	28,9	5,0	2,5	Média	33,0	59,4	9,3	Média	33,1	126,9	10,5	Média	120,1	25,7	3,1
Desvpad	0,1	2,3	1,0	Desvpad	0,3	0,0	2,3	Desvpad	0,2	9,7	3,1	Desvpad	1,2	2,9	1,2
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
3	24,2	5,7	1,6	3	27,7	59,5	9,4	3	28,0	99,8	10,1	3	131,4	34,2	2,9
9	24,5	6,0	1,6	9	28,2	59,4	9,5	9	28,5	108,5	10,8	9	136,1	29,3	2,3
15	25,0	5,8	4,0	15	28,6	59,4	12,0	15	29,0	98,5	13,3	15	138,9	31,5	4,8
Média	24,6	5,8	2,4	Média	28,1	59,4	10,3	Média	28,5	102,3	11,4	Média	135,5	31,7	3,3
Desvpad	0,4	0,1	1,4	Desvpad	0,4	0,0	1,5	Desvpad	0,5	5,4	1,7	Desvpad	3,8	2,5	1,3
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
4	19,0	4,7	2,6	4	22,0	59,4	10,7	4	22,8	122,7	17,5	4	138,9	31,7	7,4
10	20,0	5,7	2,5	10	23,0	59,4	10,3	10	23,4	82,8	12,8	10	138,9	31,9	3,4
16	20,0	6,7	5,5	16	22,6	59,5	16,5	16	22,6	86,3	12,7	16	129,8	36,7	2,7
Média	19,7	5,7	3,5	Média	22,5	59,4	12,5	Média	22,9	97,3	14,3	Média	135,9	33,4	4,5
Desvpad	0,6	1,0	1,7	Desvpad	0,5	0,0	3,5	Desvpad	0,4	22,1	2,8	Desvpad	5,3	2,8	2,5
Vazão 30 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
5	13,7	5,7	2,5	5	15,7	59,5	7,4	5	15,8	123,3	7,3	5	111,4	31,7	7,1
11	15,5	7,8	6,3	11	17,8	59,5	24,6	11	17,7	206,6	22,6	11	125,3	29,9	15,6
17	14,6	7,8	1,8	17	16,5	59,5	14,2	17	16,4	170,9	13,3	17	118,2	25,9	3,5
Média	14,6	7,1	3,5	Média	16,7	59,5	15,4	Média	16,7	166,9	14,4	Média	118,3	29,2	8,7
Desvpad	0,9	1,2	2,4	Desvpad	1,1	0,0	8,7	Desvpad	1,0	41,8	7,7	Desvpad	7,0	3,0	6,2
Vazão 35 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO AXIAL				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$	n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
6	13,2	6,3	7,1	6	15,2	59,5	11,2	6	15,3	133,1	11,1	6	127,2	24,8	7,0
12	13,4	16,2	9,8	12	14,7	59,5	24,7	12	14,3	250,0	22,7	12	129,9	5,1	10,1
18	12,0	7,9	2,3	18	13,8	59,5	14,6	18	13,8	134,6	16,5	18	116,7	18,1	3,1
Média	12,9	10,1	6,4	Média	14,6	59,5	16,8	Média	14,5	172,6	16,8	Média	124,6	16,0	6,7
Desvpad	0,7	5,3	3,8	Desvpad	0,7	0,0	7,0	Desvpad	0,7	67,1	5,8	Desvpad	7,0	10,0	3,5

Figura 4.12 – Resultados do ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais do tubo de retenção 2 para as vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h.

Para facilitar a análise dos valores das Figuras 4.11 e 4.12, apresentam-se as tabelas 4.10 e 4.11 com os valores resumidos (média dos valores da somatória de erros para cada modelo matemático nas seis vazões testadas, que é o critério de escolha do modelo que melhor se ajusta aos dados experimentais).

Tabela 4.10 – Resumo dos resultados da Figura 4.11 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 1

Modelo	Vazão 10 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 15 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 20 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 25 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 30 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 35 L/h Média da $\sum$ erro ²
Laminar modificado	0,6 ± 0,2	3,0 ± 2,4	2,3 ± 1,6	2,9 ± 2,2	10,5 ± 1,8	3,4 ± 2,7
Tanques em série	6,1 ± 2,5	5,2 ± 2,2	5,1 ± 1,2	5,4 ± 2,7	18,9 ± 6,5	9,3 ± 7,0
Dispersão axial	3,4 ± 0,8	5,2 ± 1,9	5,9 ± 1,5	4,2 ± 2,1	8,8 ± 1,2	5,8 ± 8,3
Combinado PFR+CSTR	0,8 ± 0,4	3,5 ± 2,9	3,0 ± 1,4	2,7 ± 1,9	10,2 ± 1,2	3,0 ± 2,4

Tabela 4.11 – Resumo dos resultados da Figura 4.12 de todos os modelos matemáticos ajustados no tubo de retenção 2

Modelo	Vazão 10 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 15 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 20 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 25 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 30 L/h Média da $\sum$ erro ²	Vazão 35 L/h Média da $\sum$ erro ²
Laminar modificado	0,8 ± 0,2	2,5 ± 1	2,4 ± 1,4	3,5 ± 1,7	3,5 ± 2,4	6,4 ± 3,8
Tanques em série	4,5 ± 0,3	9,3 ± 2,3	10,3 ± 1,5	12,5 ± 3,5	15,4 ± 8,7	16,8 ± 7,0
Dispersão axial	5,7 ± 0,3	10,5 ± 3,1	11,4 ± 1,7	14,3 ± 2,8	14,4 ± 7,7	16,,8 ± 5,8
Combinado PFR+CSTR	1,7 ± 0,1	3,1 ± 1,2	3,3 ± 1,3	4,5 ± 2,5	8,7 ± 6,2	6,7 ± 3,5

Mediante a análise das Figuras 4.11 e 4.12 e as tabelas 4.10 e 4.11 foi possível identificar o modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais.

Tanto para o tubo de retenção 1 como para o tubo de retenção 2, os resultados na escolha de melhor modelo matemático foram os mesmos, sendo primeiro o modelo laminar modificado, seguido pelo modelo combinado PFR+CSTR, o modelo de dispersão axial e por último o modelo de N tanques em série.

Nas Figuras 4.13 a 4.18, apresentam-se os dados experimentais do tubo de retenção 1, conforme a vazão estudada junto ao melhor modelo matemático ajustado com sua respectiva convolução com a DTR do sistema de aquisição na tabela 4.8.

As indicações “saída do tubo” e “saída da célula” nestas figuras estão de acordo com a Figura 3.6, onde “saída do tubo” representa a DTR do processo e “saída da célula” representa a convolução da DTR do processo com a do sistema de aquisição (célula do condutivímetro). Os parâmetros do modelo matemático da DTR do processo foram ajustados para aproximar a DTR “saída da célula” aos dados experimentais obtidos.

Figura 4.13 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.14 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.15 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.16 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.17 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.18 - Dados experimentais do tubo de retenção 1 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Observando as Figuras com as respectivas convoluções, é evidente a distorção do sinal provocado pelo sistema de aquisição (escoamento através da célula), o que faz que a convolução seja um fator importante na análise e interpretação dos dados.

Da mesma maneira que para o tubo de retenção 1, nas Figuras 4.19 a 4.24 também são apresentados com as mesmas especificações os resultados para o tubo de retenção 2.

Figura 4.19 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 10 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.20 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 15 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.21 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 20 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.22 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 25 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.23 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 30 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Figura 4.24 - Dados experimentais do tubo de retenção 2 na vazão 35 L/h com ajuste do modelo laminar modificado e sua convolução.

Na análise dos tempos médios experimentais dos tubos de retenção 1 e 2, foram determinadas equações de variabilidade do tempo médio com a vazão, mediante o ajuste dos dados experimentais a equações como são observadas na Figura 4.25.

Figura 4.25 – Variação de tempos médios de residência experimentais com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2

Então, as equações (4.4) e (4.5) definem a relação do tempo médio experimental com a vazão, para os tubos de retenção 1 e 2 respectivamente.

$$\bar{t}_1 = 84,75 v^{-1,0053} \quad \text{eq. (4.4)}$$

$$\bar{t}_2 = 162,82 v^{-0,9306} \quad \text{eq. (4.5)}$$

onde: v = vazão (mL/s)

$\bar{t}$ = Tempo médio (s)

Idealmente, se espera que o tempo médio de residência seja igual ao tempo espacial, (equação (2.1)).

Então também se espera a seguinte proporção:

$$\bar{t} \propto \frac{1}{v} \quad \text{eq. (4.6)}$$

Como os expoentes das equações (4.4) e (4.5) são próximos ao valor de -1,0 podemos fixar os mesmos a este valor teórico. Refazendo o ajuste de parâmetros temos como resultado as equações (4.7) e (4.8).

$$\bar{t}_1 = \frac{83,9}{v} \quad \text{eq. (4.7)}$$

$$\bar{t}_2 = \frac{177,2}{v} \quad \text{eq. (4.8)}$$

Os resultados dos parâmetros encontrados para estas equações deveriam ser próximos aos volumes internos dos tubos, já que τ é igual a V/v (equação 2.1). Lembrando que os volumes dos tubos 1 e 2 são 75 e 200 mL, respectivamente, existe uma diferença entre os parâmetros nas equações (4.7) e (4.8) e os valores esperados.

As tabelas 4.12 para o tubo de retenção 1 e 4.13 para o tubo de retenção 2, indicam os valores de tempos de residência médios subtraindo o tempo de residência da célula na tabela 4.8 e os tempos espaciais, assim como também as porcentagens da discrepância entre estes valores.

Tabela 4.12– Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 1

Vazão (L/h)	Tempo médio de residência $\bar{t}$ (s)	Tempo espacial τ (s)	% de discrepância
10	25,1	27,0	7,6
15	16,2	18,0	11,3
20	11,8	13,5	14,3
25	9,2	10,8	17,0
30	7,5	9,0	19,5
35	6,3	7,7	21,8

Tabela 4.13– Tempos médios de residência, tempos espaciais e suas porcentagens de discrepância para o tubo de retenção 2

Vazão (L/h)	Tempo médio de residência $\bar{t}$ (s)	Tempo espacial τ (s)	% de discrepância
10	57,7	72,0	24,9
15	39,1	48,0	22,7
20	29,7	36,0	21,2
25	24,0	28,8	20,2
30	20,1	24,0	19,3
35	17,3	20,6	18,7

A discrepância entre tempo médio de residência experimental e tempo espacial para os tubos de retenção pode ser atribuída ao volume e formato da célula (Figura 3.3), à presença de curvas nos tubos que geram regiões de estagnação e regiões de escoamento preferencial. O escoamento pulsado provocado pela bomba peristáltica também é um fator importante para avaliar os desvios observados.

A Figura 4.26 apresenta a influência da vazão sobre o parâmetro n (modelo laminar modificado) para as vazões testadas nos tubos 1 e 2. Esta influência foi determinada mediante as equações (4.9) e (4.10) respectivamente.

Figura 4.26 – Variação do parâmetro n (modelo laminar modificado) com a vazão nos tubos de retenção 1 e 2

$$n_1 = 0,244v^2 - 1,826v + 6,942 \quad \text{eq. (4.9)}$$

$$n_2 = 0,145v^2 - 1,118v + 6,906 \quad \text{eq. (4.10)}$$

Nas Figuras 4.27 e 4.28 observa-se a influência da vazão na distribuição de tempos de residência para o modelo laminar modificado, para os tubos de retenção 1 e 2 respectivamente. Nota-se que quanto maior é a vazão, mais rápida é a passagem do traçador no tubo.

Figura 4.27 - Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 1 no modelo laminar modificado

Figura 4.28 - Influência da vazão na DTR do tubo de retenção 2 no modelo laminar modificado

Com os resultados aqui apresentados é possível prever a DTR da água em escoamento à temperatura ambiente com vazão entre 10 e 35 L/h através dos tubos de retenção 1 e 2, usando a bomba peristáltica padrão do equipamento. Estas informações serão úteis para a estimativa da letalidade no tubo durante tratamento térmico, como é descrito no item 2.5.

4.4. Distribuição do tempo de residência do trocador de calor a placas

Foi realizado o estudo de DTR no trocador de calor a placas de acordo com o método descrito no item (3.3.5). Foram testados arranjos em série com número par de passes de: 2x1; 4x1; 6x1; 8x1; 10x1; 12x1; 14x1; 16x1 e 18x1 nas vazões de 15, 20 e 25 L/h.

Os dados experimentais e resultados do ajuste com convolução dos quatro modelos matemáticos a temperatura constante (temperatura média 24,9 °C) são apresentados nas Figuras 4.28 a 4.36, conforme a vazão e configurações de trocador de calor estudadas.

Nas tabelas, para cada ensaio são apresentados os dois parâmetros ajustados de cada modelo em sua forma dimensional e a soma dos erros quadráticos minimizada.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 2x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	2,2	4,3	2,6
4	2,3	4,4	3,9
7	2,2	8,6	7,6
10	2,2	4,8	2,8
Média	2,2	5,5	4,2
Desvpad	0,0	2,1	2,3

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	3,0	59,5	3,5
4	3,0	59,5	2,0
7	2,5	59,4	7,5
10	2,7	59,5	4,3
Média	2,8	59,5	4,4
Desvpad	0,2	0,0	2,3

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	3,0	11,1	1,7
4	3,1	158,5	3,0
7	3,2	4,0	2,6
10	3,1	13,0	3,3
Média	3,1	46,6	2,6
Desvpad	0,1	74,7	0,7

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	4,2	10,4	7,3
4	7,4	5,7	7,6
7	4,0	11,3	3,4
10	7,2	6,0	2,3
Média	5,7	8,4	5,1
Desvpad	1,9	2,9	2,7

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	0,8	2,8	1,1
5	2,2	4,4	0,9
8	1,3	3,2	5,9
11	1,9	2,6	5,7
Média	1,5	3,3	3,4
Desvpad	0,6	0,8	2,8

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	1,6	59,5	2,0
5	2,9	59,5	2,2
8	1,8	59,5	7,6
11	2,9	59,5	6,8
Média	2,3	59,5	4,7
Desvpad	0,7	0,0	3,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	1,4	10,9	1,8
5	3,0	21,9	2,3
8	2,1	6,5	8,4
11	3,0	18,5	2,1
Média	2,4	14,4	3,7
Desvpad	0,8	7,0	3,1

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	4,3	3,7	1,7
5	10,0	7,9	4,3
8	4,3	7,9	8,8
11	9,9	7,8	3,1
Média	7,1	6,8	4,5
Desvpad	3,2	2,1	3,1

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	1,8	13,0	17,1
6	1,8	7,8	10,1
9	1,8	5,5	9,4
12	1,9	61,3	21,3
Média	1,8	21,9	14,5
Desvpad	0,1	26,4	5,7

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	2,1	59,5	18,6
6	2,2	59,5	9,5
9	2,3	59,5	7,8
12	2,0	59,5	25,4
Média	2,1	59,5	15,3
Desvpad	0,1	0,0	8,2

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	2,1	114,8	22,7
6	2,2	52,7	14,7
9	2,3	186,4	7,4
12	1,9	1158,7	21,2
Média	2,1	378,2	16,5
Desvpad	0,2	523,2	7,0

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	12,4	1,3	17,0
6	12,0	2,2	10,0
9	12,3	3,3	9,3
12	13,2	0,2	21,3
Média	12,5	1,8	14,4
Desvpad	0,5	1,3	5,8

Figura 4.29 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 2x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 4x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	4,2	3,7	2,3
4	4,5	2,9	7,7
7	5,0	3,4	1,5
Média	4,6	3,3	3,8
Desvpad	0,4	0,4	3,4

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	5,2	59,4	8,2
4	6,2	59,5	8,8
7	6,3	59,5	3,6
Média	5,9	59,5	6,8
Desvpad	0,6	0,0	2,8

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	6,1	11,2	1,1
4	6,3	40,0	6,2
7	6,4	49,5	2,3
Média	6,3	33,6	3,2
Desvpad	0,2	19,9	2,6

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	13,8	14,2	0,7
4	18,2	11,0	6,3
7	18,4	12,8	3,7
Média	16,8	12,6	3,6
Desvpad	2,6	1,6	2,8

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	3,7	14,2	5,9
5	3,2	4,2	2,2
8	3,3	3,8	0,2
Média	3,4	7,4	2,8
Desvpad	0,3	5,9	2,8

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	4,1	59,4	7,8
5	4,3	59,4	5,4
8	4,5	59,5	2,4
Média	4,3	59,5	5,2
Desvpad	0,2	0,0	2,7

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	4,3	35,3	12,9
5	4,3	26,4	3,3
8	4,5	43,0	1,6
Média	4,4	34,9	5,9
Desvpad	0,1	8,3	6,1

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	20,7	1,7	5,9
5	20,3	3,9	4,5
8	23,5	2,2	2,7
Média	21,5	2,6	4,4
Desvpad	1,7	1,2	1,6

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	2,8	6,6	10,2
6	2,3	3,6	10,0
9	2,8	5,0	3,3
Média	2,6	5,0	7,8
Desvpad	0,3	1,5	3,9

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	3,3	59,5	12,2
6	3,4	59,5	18,4
9	3,4	59,5	6,0
Média	3,4	59,5	12,2
Desvpad	0,0	0,0	6,2

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	3,3	531,2	8,8
6	3,2	11,9	4,2
9	3,5	39,6	6,4
Média	3,3	194,3	6,5
Desvpad	0,2	292,1	2,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	19,0	3,8	10,4
6	13,0	10,7	2,5
9	19,0	5,5	3,7
Média	17,0	6,6	5,5
Desvpad	3,5	3,6	4,2

Figura 4.30 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 4x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 6x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	6,8	3,9	0,6
4	8,2	4,7	1,0
7	7,1	4,5	1,7
10	7,2	4,3	1,4
Média	7,3	4,4	1,1
Desvpad	0,6	0,4	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	8,5	59,4	5,0
4	9,9	59,4	4,6
7	8,7	59,4	4,3
10	8,8	59,4	6,4
Média	9,0	59,4	5,1
Desvpad	0,6	0,0	1,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	8,9	29,7	2,3
4	10,3	42,1	4,1
7	9,1	24,5	3,0
10	9,3	32,7	5,4
Média	9,4	32,3	3,7
Desvpad	0,6	7,4	1,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	26,7	13,6	0,7
4	32,2	13,1	2,3
7	27,1	12,4	2,4
10	28,0	13,0	2,5
Média	28,5	13,0	2,0
Desvpad	2,5	0,5	0,9

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	5,1	7,3	3,8
5	5,8	4,0	1,8
8	5,0	3,1	4,4
11	5,2	3,8	4,0
Média	5,3	4,5	3,5
Desvpad	0,3	1,9	1,2

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	5,8	59,4	5,2
5	7,3	59,4	4,3
8	6,5	59,4	11,5
11	6,7	59,4	8,2
Média	6,6	59,4	7,3
Desvpad	0,6	0,0	3,2

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	5,9	33,0	2,3
5	7,5	40,9	4,6
8	6,9	30,5	5,0
11	7,1	21,2	4,2
Média	6,8	31,4	4,0
Desvpad	0,7	8,1	1,2

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	23,7	10,7	0,6
5	29,7	15,7	4,8
8	27,1	14,9	3,1
11	26,2	14,8	2,3
Média	26,7	14,0	2,7
Desvpad	2,5	2,3	1,8

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	3,9	3,4	3,7
6	4,3	4,7	5,2
9	4,2	5,3	6,6
12	4,7	4,8	4,7
Média	4,2	4,5	5,0
Desvpad	0,3	0,8	1,2

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	5,1	59,5	4,2
6	5,1	59,5	13,6
9	5,0	59,4	7,8
12	5,8	59,4	12,8
Média	5,2	59,4	9,6
Desvpad	0,4	0,0	4,4

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	5,2	31,3	2,4
6	5,3	40,7	13,4
9	5,1	27,9	1,7
12	6,1	45,8	12,5
Média	5,4	36,4	7,5
Desvpad	0,5	8,3	6,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	26,1	12,5	2,4
6	29,2	8,6	6,9
9	23,6	16,3	4,0
12	32,1	9,9	5,2
Média	27,7	11,8	4,6
Desvpad	3,7	3,4	1,9

Figura 4.31 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 6x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 8x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	10,0	3,8	0,9
4	9,5	3,8	1,6
7	9,5	3,5	3,7
10	9,4	3,9	1,3
Média	9,6	3,7	1,9
Desvpad	0,3	0,2	1,3

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	12,1	12,1	59,4
4	11,7	11,7	59,4
7	11,6	11,6	59,4
10	11,5	11,5	59,4
Média	11,7	11,7	59,4
Desvpad	0,2	0,2	0,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	12,7	38,5	3,2
4	12,1	43,3	3,6
7	12,3	33,8	2,8
10	12,0	35,6	1,4
Média	12,3	37,8	2,7
Desvpad	0,3	4,2	1,0

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	39,4	18,7	1,5
4	38,8	15,4	1,0
7	38,5	16,8	2,7
10	38,2	14,8	0,8
Média	38,7	16,4	1,5
Desvpad	0,5	1,8	0,9

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	7,9	4,2	0,8
5	9,4	4,1	0,6
8	7,8	4,6	1,0
11	7,7	4,8	1,6
Média	8,2	4,4	1,0
Desvpad	0,8	0,3	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	9,8	59,5	4,4
5	9,1	59,4	4,7
8	9,3	59,5	6,7
11	9,3	59,4	5,0
Média	9,4	59,4	5,2
Desvpad	0,3	0,0	1,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	9,9	50,0	2,1
5	9,3	43,7	1,8
8	9,6	46,1	3,8
11	9,5	45,2	2,5
Média	9,6	46,3	2,6
Desvpad	0,2	2,7	0,9

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	43,2	14,9	0,5
5	40,0	14,2	0,2
8	42,6	13,0	1,3
11	42,1	12,2	1,9
Média	42,0	13,6	1,0
Desvpad	1,4	1,2	0,8

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	6,0	3,5	4,2
6	5,8	3,7	2,7
9	7,0	4,0	5,7
12	6,4	4,1	1,9
Média	6,3	3,8	3,6
Desvpad	0,5	0,3	1,7

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	7,8	59,5	10,4
6	7,3	59,4	7,7
9	8,5	59,4	6,2
12	7,7	59,5	3,8
Média	7,8	59,4	7,0
Desvpad	0,5	0,0	2,8

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	7,9	32,9	1,8
6	7,7	43,9	7,9
9	8,6	51,4	4,7
12	7,9	53,2	4,1
Média	8,0	45,4	4,6
Desvpad	0,4	9,2	2,5

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	40,9	18,7	2,7
6	39,6	16,5	2,0
9	47,3	17,2	4,2
12	43,3	15,1	1,4
Média	42,8	16,9	2,6
Desvpad	3,4	1,5	1,2

Figura 4.32 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 8x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas Configuração: arranjo em série com passes de 10x1															
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	11,5	3,8	1,3	1	14,1	59,4	6,2	1	14,6	45,1	3,0	1	47,4	18,7	0,6
4	12,5	3,8	2,4	4	15,5	59,4	5,7	4	16,0	48,6	2,1	4	52,1	20,9	1,0
7	12,9	4,0	1,1	7	15,7	59,4	3,0	7	16,2	45,9	0,8	7	51,6	21,7	0,4
10	13,0	4,1	1,4	10	15,7	59,5	4,3	10	16,1	56,5	2,3	10	53,7	19,1	0,6
Média	12,5	3,9	1,5	Média	15,3	59,4	4,8	Média	15,7	49,0	2,1	Média	51,2	20,1	0,7
Desvpad	0,7	0,1	0,6	Desvpad	0,8	0,0	1,4	Desvpad	0,8	5,2	0,9	Desvpad	2,7	1,4	0,3
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	9,5	3,9	3,1	2	11,5	59,5	6,2	2	11,9	49,5	3,4	2	51,9	19,6	1,9
5	9,9	4,3	1,9	5	11,7	59,5	6,4	5	12,1	49,8	2,4	5	52,4	21,8	1,6
8	9,5	4,0	3,4	8	11,3	59,5	7,9	8	12,0	49,0	5,3	8	51,8	18,8	2,3
11	10,5	4,2	1,7	11	12,6	59,4	7,1	11	14,0	47,5	5,2	11	52,0	19,6	1,2
Média	9,8	4,1	2,5	Média	11,8	59,4	6,9	Média	13,2	49,0	4,1	Média	52,0	19,9	1,8
Desvpad	0,5	0,2	0,8	Desvpad	0,6	0,0	0,8	Desvpad	1,0	1,0	1,4	Desvpad	0,3	1,3	0,5
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	8,2	5,3	1,2	3	9,9	59,4	4,3	3	10,1	58,6	1,7	3	54,4	19,2	2,5
6	7,4	4,6	1,2	6	8,7	59,5	8,9	6	9,2	50,8	4,8	6	50,6	15,6	1,3
9	7,5	3,9	2,7	9	9,2	59,4	7,3	9	9,4	51,3	4,0	9	51,1	19,3	1,5
12	7,2	4,5	1,5	12	8,8	59,4	2,8	12	9,0	55,2	2,9	12	49,5	15,3	1,0
Média	7,6	4,6	1,7	Média	9,1	59,4	5,8	Média	9,4	54,0	3,3	Média	51,4	17,4	1,5
Desvpad	0,4	0,6	0,7	Desvpad	0,5	0,0	2,8	Desvpad	0,5	3,6	1,4	Desvpad	2,1	2,2	0,7

Figura 4.33 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 10x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas Configuração: arranjo em série com passes de 12x1															
Vazão 15 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	14,5	3,9	1,4	1	17,6	59,4	4,9	1	18,3	49,7	1,5	1	58,3	25,8	1,2
4	14,5	4,0	3,9	4	17,6	59,4	4,7	4	18,1	49,8	1,6	4	59,9	22,5	2,7
7	15,9	4,5	2,0	7	18,8	59,4	4,5	7	19,5	53,8	2,0	7	64,3	23,3	1,4
10	16,0	4,2	1,7	10	19,1	59,5	3,3	10	19,7	58,7	1,3	10	65,8	22,2	1,1
Média	15,2	4,1	2,2	Média	18,3	59,4	4,3	Média	18,9	53,0	1,6	Média	62,1	23,5	1,6
Desvpad	0,8	0,3	1,1	Desvpad	0,8	0,0	0,7	Desvpad	0,8	4,2	0,3	Desvpad	3,5	1,6	0,8
Vazão 20 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	11,7	4,9	2,2	2	13,6	59,4	4,6	2	14,1	50,8	3,0	2	63,9	17,8	2,3
5	12,0	4,1	2,0	5	14,4	59,4	4,4	5	14,8	56,8	2,1	5	65,6	22,8	0,9
8	11,5	3,9	1,5	8	13,7	59,4	5,1	8	14,3	50,4	2,5	8	62,6	23,2	0,8
11	12,3	4,6	1,8	11	14,5	59,5	5,4	11	14,9	56,9	2,0	11	65,8	24,4	1,0
Média	11,9	4,4	1,9	Média	14,1	59,4	4,9	Média	14,5	53,7	2,4	Média	64,5	22,0	1,3
Desvpad	0,4	0,4	0,3	Desvpad	0,5	0,0	0,5	Desvpad	0,4	3,6	0,5	Desvpad	1,5	2,9	0,7
Vazão 25 L/h															
LAMINAR MODIFICADO				TANQUES EM SÉRIE				DISPERSÃO				PFR + CSTR			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}	n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}	n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	9,5	3,8	6,1	3	11,6	59,5	11,1	3	12,0	50,4	4,5	3	65,2	25,3	4,2
6	9,5	3,9	3,0	6	11,5	59,5	5,5	6	11,9	57,2	2,3	6	65,2	24,3	1,3
9	9,9	4,8	2,6	9	11,7	59,5	6,0	9	11,8	82,6	5,7	9	68,9	18,9	1,8
12	10,0	4,2	2,2	12	11,8	59,5	5,1	12	12,2	59,8	2,7	12	68,0	22,4	1,3
Média	9,7	4,2	3,5	Média	11,7	59,5	6,9	Média	12,0	62,5	3,8	Média	66,8	22,7	2,1
Desvpad	0,3	0,5	1,8	Desvpad	0,1	0,0	2,8	Desvpad	0,1	14,0	1,6	Desvpad	1,9	2,8	1,4

Figura 4.34 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 12x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 14x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum_{\text{erro}}$
1	18,5	4,2	1,8
4	19,0	4,1	1,9
7	18,0	4,2	2,0
10	18,0	4,0	3,0
Média	18,4	4,1	2,2
Desvpad	0,5	0,1	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum_{\text{erro}}$
1	22,0	59,4	3,6
4	22,7	59,5	2,6
7	21,4	59,5	3,1
10	21,9	59,5	3,3
Média	22,0	59,4	3,2
Desvpad	0,5	0,0	0,4

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum_{\text{erro}}$
1	22,7	56,0	1,2
4	23,2	58,3	0,6
7	22,1	61,4	1,4
10	22,5	61,2	1,1
Média	22,6	59,2	1,1
Desvpad	0,4	2,6	0,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum_{\text{erro}}$
1	76,3	25,8	1,0
4	78,2	27,1	1,1
7	74,5	25,2	1,1
10	76,7	25,0	1,5
Média	76,4	25,7	1,2
Desvpad	1,5	1,0	0,2

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum_{\text{erro}}$
2	14,5	3,9	3,8
5	14,0	3,7	3,8
8	14,8	4,9	3,9
11	14,5	4,0	3,9
Média	14,4	4,1	3,9
Desvpad	0,3	0,5	0,1

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum_{\text{erro}}$
2	17,6	59,5	4,4
5	17,2	59,4	3,8
8	17,1	59,4	5,9
11	17,4	59,4	3,3
Média	17,3	59,4	4,4
Desvpad	0,2	0,0	1,1

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum_{\text{erro}}$
2	18,0	63,7	2,3
5	17,5	50,5	1,2
8	17,7	59,8	2,7
11	17,7	58,9	1,4
Média	17,7	58,2	1,9
Desvpad	0,2	5,6	0,7

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum_{\text{erro}}$
2	80,6	30,4	1,9
5	76,5	30,4	2,5
8	79,6	26,5	3,3
11	79,2	27,7	2,7
Média	79,0	28,7	2,6
Desvpad	1,8	2,0	0,6

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum_{\text{erro}}$
3	11,4	4,2	4,9
6	11,5	4,6	1,8
9	11,0	4,0	3,6
12	12,0	4,1	4,8
Média	11,5	4,2	3,8
Desvpad	0,4	0,3	1,4

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum_{\text{erro}}$
3	13,6	59,5	6,1
6	13,5	59,5	6,1
9	13,4	59,5	4,5
12	13,9	59,5	4,5
Média	13,6	59,5	5,3
Desvpad	0,2	0,0	0,9

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum_{\text{erro}}$
3	13,9	67,4	3,6
6	13,8	74,6	4,5
9	13,7	68,3	3,2
12	14,1	86,9	4,0
Média	13,8	74,3	3,8
Desvpad	0,2	9,0	0,6

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum_{\text{erro}}$
3	80,5	21,1	3,8
6	80,9	19,5	2,6
9	75,4	26,9	1,9
12	82,3	21,9	1,7
Média	79,8	22,4	2,5
Desvpad	3,0	3,2	0,9

Figura 4.35 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 14x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas
Configuração: arranjo em série com passes de 16x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum_{\text{erro}}$
1	22,5	4,8	2,2
4	20,0	4,2	2,3
7	21,0	4,3	2,5
10	22,0	4,2	2,3
Média	21,4	4,4	2,3
Desvpad	1,1	0,3	0,1

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum_{\text{erro}}$
1	26,6	59,5	1,9
4	23,9	59,5	2,9
7	25,1	59,5	3,1
10	26,3	59,5	1,6
Média	25,4	59,5	2,4
Desvpad	1,2	0,0	0,7

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum_{\text{erro}}$
1	26,8	87,1	1,2
4	24,4	67,8	1,3
7	25,6	63,2	0,9
10	26,7	74,8	0,9
Média	25,9	73,2	1,1
Desvpad	1,1	10,4	0,2

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum_{\text{erro}}$
1	93,8	27,2	1,2
4	82,2	28,6	1,2
7	87,2	28,6	1,5
10	91,4	31,3	1,4
Média	88,6	28,9	1,3
Desvpad	5,1	1,7	0,2

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum_{\text{erro}}$
2	17,6	5,7	3,1
5	17,3	5,1	2,2
8	16,9	4,8	2,3
11	17,7	5,1	3,8
Média	17,4	5,2	2,9
Desvpad	0,4	0,4	0,8

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum_{\text{erro}}$
2	20,1	59,5	3,0
5	20,1	59,5	3,6
8	19,7	59,5	3,0
11	20,5	59,5	3,3
Média	20,1	59,5	3,2
Desvpad	0,3	0,0	0,3

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum_{\text{erro}}$
2	20,4	74,8	1,7
5	20,4	76,9	2,2
8	20,0	67,9	1,4
11	20,8	71,9	1,5
Média	20,4	72,9	1,7
Desvpad	0,3	3,9	0,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum_{\text{erro}}$
2	95,4	25,8	1,7
5	93,8	28,3	1,1
8	91,2	29,5	1,0
11	94,4	31,5	2,0
Média	93,7	28,8	1,4
Desvpad	1,8	2,4	0,5

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum_{\text{erro}}$
3	13,0	4,7	3,4
6	13,0	4,1	5,2
9	13,0	4,6	3,6
12	13,5	4,4	2,7
Média	13,1	4,4	3,7
Desvpad	0,3	0,2	1,0

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum_{\text{erro}}$
3	15,4	59,5	4,4
6	15,8	59,5	4,3
9	15,2	59,5	6,4
12	15,9	59,5	2,2
Média	15,6	59,5	4,3
Desvpad	0,3	0,0	1,7

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum_{\text{erro}}$
3	15,6	79,5	2,5
6	16,0	72,2	2,7
9	15,7	65,9	4,4
12	16,1	73,6	1,2
Média	15,8	72,8	2,7
Desvpad	0,2	5,6	1,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum_{\text{erro}}$
3	90,3	27,0	1,4
6	90,2	31,6	3,4
9	90,0	27,2	2,7
12	92,8	29,4	1,5
Média	90,8	28,8	2,3
Desvpad	1,3	2,1	1,0

Figura 4.36 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 16x1.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do trocador de calor a placas

Configuração: arranjo em série com passes de 18x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
1	25,8	5,3	2,2
4	25,8	5,3	3,2
7	24,8	4,9	2,6
10	24,0	4,6	2,0
Média	25,1	5,0	2,5
Desvpad	0,9	0,3	0,5

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
1	29,9	59,5	1,7
4	29,5	59,5	1,9
7	28,9	59,5	1,8
10	28,0	59,5	2,2
Média	29,1	59,5	1,9
Desvpad	0,8	0,0	0,2

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
1	30,2	81,3	0,9
4	29,9	80,9	1,0
7	29,3	76,5	0,9
10	28,7	71,8	1,0
Média	29,5	77,6	1,0
Desvpad	0,7	4,5	0,1

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
1	104,2	30,7	1,0
4	104,2	31,7	1,4
7	102,1	27,8	2,1
10	97,9	32,7	1,3
Média	102,1	30,7	1,5
Desvpad	2,9	2,1	0,4

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
2	20,0	4,8	2,0
5	20,0	4,7	3,8
8	19,9	5,1	2,3
11	19,9	4,8	2,7
Média	19,9	4,9	2,7
Desvpad	0,1	0,1	0,8

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
2	23,2	59,5	2,4
5	23,2	59,5	2,4
8	22,8	59,5	2,1
11	23,2	59,5	1,8
Média	23,1	59,5	2,2
Desvpad	0,2	0,0	0,3

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
2	23,5	92,6	2,3
5	23,8	88,4	1,9
8	23,1	80,4	1,3
11	23,4	87,0	1,3
Média	23,5	87,1	1,7
Desvpad	0,3	5,1	0,5

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
2	109,9	30,3	1,3
5	111,0	32,3	2,5
8	109,0	28,1	1,8
11	109,4	29,8	1,9
Média	109,8	30,1	1,9
Desvpad	0,9	1,8	0,5

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	Σ_{erro}
3	15,0	4,5	5,0
6	15,0	4,4	4,2
9	15,0	4,5	4,2
12	15,0	4,9	4,0
Média	15,0	4,5	4,3
Desvpad	0,0	0,2	0,4

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	Σ_{erro}
3	18,0	59,5	3,3
6	17,7	59,5	2,0
9	17,7	59,5	2,2
12	17,6	59,5	3,0
Média	17,7	59,5	2,6
Desvpad	0,2	0,0	0,6

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	Σ_{erro}
3	18,1	84,5	2,3
6	18,0	78,0	1,5
9	17,9	90,4	1,5
12	17,8	87,2	2,5
Média	17,9	85,0	2,0
Desvpad	0,2	5,3	0,5

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	Σ_{erro}
3	105,8	28,1	3,2
6	105,4	25,6	1,7
9	103,9	32,2	2,6
12	104,2	28,7	2,7
Média	104,8	28,7	2,6
Desvpad	0,9	2,7	0,6

Figura 4.37 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do trocador de calor a placas aos quatro modelos matemáticos testados nas vazões de 15, 20, e 25 L/h para arranjo de passes 18x1.

Feita uma análise geral de todos os valores obtidos nos ajustes dos modelos matemáticos para o trocador de calor foi determinado o melhor modelo ajustado, sendo este o modelo combinado PFR+CSTR, seguido pelo modelo de dispersão axial, pelo modelo laminar modificado e por último o modelo de N tanques em série.

Como o total de curvas de DTR ajustadas para o trocador de placas é elevado (9 arranjos $\times$ 3 vazões = 27 curvas), só são apresentados no texto alguns exemplos do ajuste de três diferentes arranjos com uma mesma vazão (Figuras 4.38 a 4.40), incluindo o modelo combinado PFR+CSTR ajustado.

Figura 4.38 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 4x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.

Figura 4.39 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 10x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.

Figura 4.40 - Dados experimentais do trocador de calor com arranjos em série com número par de passes de 16x1 na vazão 20 L/h ajustados ao modelo compartimentado PFR+CSTR.

Foi analisada a influência da vazão e da configuração do trocador de calor nos parâmetros do modelo escolhido mediante os gráficos da Figura 4.41 onde foi possível observar que os parâmetros V_p (volume na região de escoamento pistonado) e V_m (volume na região de escoamento com mistura perfeita) são pouco influenciados pela vazão e são fortemente influenciados pelo número de passes.

Figura 4.41 – Análise da influência da configuração do trocador de calor a placas e da vazão nos parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR

Desprezando a influência da vazão, analisou-se apenas a influência da configuração do trocador nos parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR. Os resultados são apresentados nos gráficos da Figura 4.42.

Figura 4.42 – Análise da influência do número de passes para arranjo em série sobre os parâmetros do modelo combinado PFR+CSTR

As equações (4.11) e (4.12) regem a influência da configuração do trocador de calor no modelo combinado PFR+CSTR.

$$V_p = 8,82 \cdot 10^{-2} P^2 + 4,30P \quad \text{eq. (4.11)}$$

$$V_m = -3,13 \cdot 10^{-2} P^2 + 2,26P \quad \text{eq. (4.12)}$$

onde: $P = N^\circ$ de passes para arranjo em série

V_p = Volume da região de escoamento pistonado (mL)

V_m = Volume da região de escoamento com mistura perfeita (mL)

Para analisar a região de estagnação ou regiões mortas no interior do trocador de calor a placas, foi necessário, inicialmente, obter o volume interno para cada configuração do trocador, o qual foi possível mediante a equação (4.13), específica para configuração do trocador de calor a placas com arranjo em série.

$$V_{PHE} = 2a + Pc + (P - 1)b + d \quad \text{eq. (4.13)}$$

Os parâmetros desta equação foram obtidos do volume interno que apresentam os componentes do trocador, que são placas planas, gaxetas e conectores. Os valores para o trocador estudado são apresentados na tabela 4.14.

A Figura 4.43 traz como exemplo a determinação do volume interno para o arranjo 2×1. A Figura 4.44 traz as dimensões da gaxeta que define o contorno do canal interno do trocador para arranjo em série. A espessura do canal de escoamento é de 1,5 mm e a espessura da placa é de 1,0 mm (ver pacote de placas na Figura 3.13).

Figura 4.43 – Exemplo da determinação do volume interno para arranjo de passes 2×1. Abaixo à esquerda: representação 3D explodida dos volumes internos dos lados quente e frio do trocador referente ao pacote de placas abaixo à direita com arranjo 2×1/2×1 (Galeazzo et al., 2006)

Tabela 4.14– Parâmetros determinados para a equação (4.13). (cálculo do volume interno do trocador de calor)

Parâmetros	Valor	Significado
a	1,46 mL	Volume interno dos conectores de entrada ou saída
b	0,201 mL	Volume da ligação entre dois canais
c	8,99 mL	Volume interno do canal
d	0,126 mL	Volume b, sem a espessura de uma placa

Figura 4.44 – Principais dimensões (mm) da gaxeta do trocador de calor.

Por outro lado, temos a equação (4.14) para o volume interno de um processo genérico:

$$V = V_p + V_m + V_d \quad \text{eq. (4.14)}$$

onde os termos destas equações são:

V_p = Volume da região de escoamento pistonado

V_m = Volume da região de escoamento com mistura perfeita

V_d = Volume da região de estagnação ou morta

Substituindo as equações (4.11), (4.12) e (4.13) na equação (4.14), tem-se a equação (4.15) para o volume morto no trocador a placas em função do número de passes. Esta equação é apresentada graficamente na Figura 4.45. É interessante notar que para $P = 0$, os volumes de escoamento pistonado e de mistura perfeita são

nulos, mas o volume morto é de $2a + d - b = 2,85$ mL. Este é o volume corresponde aos conectores de entrada e saída e ao orifício de uma placa, conforme Figura 4.45.

$$V_d = -5,68.10^{-2}P + 2,64P + 2,85 \quad \text{eq. (4.15)}$$

Figura 4.45 – Variação do volume morto dentro do interior do trocador de calor, em função do número de passes

4.5. Distribuição do tempo de residência no pasteurizador

São apresentados na Figura 4.46 os resultados detalhados dos ajustes com convolução dos dados experimentais do processo de pasteurização no pasteurizador de laboratório ARMFIELD modelo FT-43 no arranjo padrão do equipamento para o processamento do leite (tubo de retenção 1; trocador de calor a placas com configuração de arranjos em série com número par de passes de 6x1/10x1/4x1 para aquecimento/regeneração/resfriamento). Os resultados são apresentados separadamente para cada vazão experimentada no pasteurizador. Quatro modelos de DTR foram ajustados aos dados experimentais. A temperatura média dos ensaios foi de 22,9 °C.

Ajuste com convolução de dados experimentais da DTR do pasteurizador
Configuração padrão: tubo de retenção 1 e trocador de calor com arranjo em série de 6x1/10x1/4x1

Vazão 15 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$
1	68,5	5,6	2,4
4	68,5	5,6	2,4
7	68,5	5,6	2,7
10	68,5	5,6	2,5
Média	68,5	5,6	2,5
Desvpad	0,0	0,0	0,1

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$
1	77,9	86,5	0,6
4	76,1	85,5	0,5
7	77,2	84,1	0,5
10	77,1	84,9	0,5
Média	77,1	85,2	0,6
Desvpad	0,7	1,0	0,0

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$
1	78,1	170,1	0,5
4	76,4	167,7	0,4
7	77,4	165,2	0,4
10	77,4	166,2	0,4
Média	77,3	167,3	0,4
Desvpad	0,7	2,2	0,0

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
1	287,4	63,1	1,8
4	281,3	61,0	1,8
7	285,0	63,0	2,2
10	283,3	64,7	2,0
Média	284,2	63,0	1,9
Desvpad	2,6	1,5	0,2

Vazão 20 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$
2	55,5	5,9	3,0
5	57,0	6,1	2,3
8	56,0	6,1	2,4
11	56,0	6,0	2,8
Média	56,1	6,0	2,6
Desvpad	0,6	0,1	0,3

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$
2	62,8	93,5	0,8
5	63,5	90,4	0,9
8	62,3	96,1	0,9
11	62,7	92,9	0,7
Média	62,8	93,2	0,8
Desvpad	0,5	2,3	0,1

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$
2	62,9	183,7	0,7
5	63,7	177,3	0,8
8	62,5	188,5	0,7
11	62,8	181,2	0,6
Média	63,0	182,7	0,7
Desvpad	0,5	4,7	0,1

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
2	308,3	66,8	2,2
5	314,3	63,2	1,9
8	309,3	62,0	1,9
11	310,6	64,4	2,2
Média	310,6	64,1	2,1
Desvpad	2,6	2,0	0,2

Vazão 25 L/h

LAMINAR MODIFICADO			
n° ensaio	t_i	n	$\sum \text{erro}$
3	43,0	6,5	3,6
6	44,0	6,3	3,4
9	44,4	6,7	3,2
12	44,5	6,2	3,8
Média	44,0	6,4	3,5
Desvpad	0,7	0,2	0,3

TANQUES EM SÉRIE			
n° ensaio	t_m	N	$\sum \text{erro}$
3	48,0	102,9	1,3
6	48,6	102,9	1,1
9	48,6	103,0	1,7
12	49,2	100,5	0,9
Média	48,6	102,3	1,3
Desvpad	0,5	1,2	0,4

DISPERSÃO			
n° ensaio	t_m	Pe	$\sum \text{erro}$
3	48,1	202,9	1,1
6	48,7	204,9	1,0
9	48,6	231,6	1,4
12	49,3	197,1	0,8
Média	48,7	209,1	1,1
Desvpad	0,5	15,3	0,3

PFR + CSTR			
n° ensaio	V_p	V_m	$\sum \text{erro}$
3	297,5	56,2	3,0
6	302,1	62,7	2,8
9	304,9	60,7	3,0
12	305,2	63,9	3,1
Média	302,4	60,9	3,0
Desvpad	3,5	3,4	0,1

Figura 4.46 – Resultados detalhados do ajuste com convolução dos dados experimentais do pasteurizador aos quatro modelos matemáticos a temperatura constante.

O resumo dos valores da Figura 4.46 é apresentado na tabela 4.15.

Tabela 4.15 – Resumo dos resultados da Figura 4.45 dos quatro modelos matemáticos ajustados para o pasteurizador

Modelo	Vazão 15 L/h Média da $\sum \text{erro}^2$	Vazão 20 L/h Média da $\sum \text{erro}^2$	Vazão 25 L/h Média da $\sum \text{erro}^2$
Laminar modificado	2,5 $\pm$ 0,1	2,6 $\pm$ 0,3	3,5 $\pm$ 0,3
Tanques em série	0,6 $\pm$ 0,0	0,8 $\pm$ 0,1	1,3 $\pm$ 0,4
Dispersão axial	0,4 $\pm$ 0,0	0,7 $\pm$ 0,1	1,1 $\pm$ 0,3
Combinado PFR+CSTR	1,9 $\pm$ 0,2	2,1 $\pm$ 0,2	3,0 $\pm$ 0,1

O critério de escolha do modelo matemático foi o mesmo que nos procedimentos dos tubos de retenção e do sistema de aquisição de dados.

O modelo que ficou melhor ajustado foi o modelo de dispersão axial, seguido pelo modelo de N tanques em série, o modelo combinado PFR+CSTR e por último o modelo laminar modificado.

Nas Figuras 4.47, 4.48 e 4.49, apresentam-se os dados experimentais do pasteurizador, conforme a vazão estudada junto ao melhor modelo matemático ajustado com convolução dos dados do sistema de aquisição.

As indicações “saída do pasteurizador” e “saída da célula” nestas figuras estão de acordo com a Figura 3.6, onde “saída do pasteurizador” representa a DTR do processo e “saída da célula” representa a convolução da DTR do processo com a DTR do sistema de aquisição (célula do condutivímetro). Os parâmetros do modelo matemático da DTR do processo são ajustados para aproximar a DTR “saída da célula” aos dados experimentais obtidos.

Figura 4.47 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 15 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.

Figura 4.48 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 20 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.

Figura 4.49 - Dados experimentais do pasteurizador na vazão 25 L/h com ajuste do modelo de dispersão axial e sua convolução.

Observando as figuras com as respectivas convoluções, foi evidente a menor distorção do sinal provocado pela célula, já que o volume interno do processo é bem superior ao da célula.

Analisou-se também a influência da vazão nos parâmetros tempo médio ($\bar{t}$) e número de Peclet (Pe) do modelo escolhido mediante os gráficos da Figura 4.50.

Figura 4.50 – Análise da influência da vazão nos parâmetros $\bar{t}$ e Pe do modelo de dispersão axial para o pasteurizador

As equações (4.16) e (4.17) representam a influência da vazão nos parâmetros do modelo matemático de dispersão axial para o pasteurizador, onde $\bar{t}$ é o tempo médio em segundos (s) e v é a vazão em mL/s.

$$\bar{t} = -10,31v + 120,28 \quad \text{eq. (4.16)}$$

$$Pe = 2,87v^2 - 16,82v + 187,6 \quad \text{eq. (4.17)}$$

As curvas de DTR para o processo de pasteurização completo serão muito úteis experimentalmente quando houver uma alteração nas características do produto processado e deseja-se saber quanto tempo levará para que a saída contenha exclusivamente este novo produto. Por exemplo, costuma-se iniciar o processamento com água mineral até atingir o regime permanente. Feito isso, substitui-se a água pelo produto alimentício (Newtoniano, como leite ou suco de laranja filtrado) e se aguarda até a saída do processo não “aparentar” mais estar diluída pela água residual. Pela Figura 4.48, estima-se que após 100 s na vazão de 20 L/h, será possível recolher o produto pasteurizado.

5. CONCLUSÕES

Para o traçador escolhido cloreto de sódio (NaCl) em solução aquosa, foram obtidas curvas de calibração determinando equações que relacionam a condutividade elétrica com a temperatura e a concentração da solução.

Foi necessário e importante estudar inicialmente a DTR do sistema de aquisição de dados (célula do condutivímetro) porque não é recomendável desprezar o volume e formato deste dispositivo em relação aos sistemas estudados. Foram analisadas vazões de 10, 15, 20, 25, 30 e 35 L/h a temperatura constante e testados os modelos matemáticos de dispersão axial e N tanques em série. O modelo matemático que melhor ficou ajustado aos dados experimentais do sistema de aquisição foi o modelo de dispersão axial.

No estudo da DTR dos tubos de retenção 1 e 2 também foram analisadas as mesmas seis vazões e foram ajustados dados experimentais a quatro modelos matemáticos. Estes estudos foram feitos com a convolução do modelo ajustado com o modelo de DTR do sistema de aquisição de dados. Para os dois tubos, o resultado na escolha do melhor modelo ajustado foi a mesma, sendo o melhor o modelo laminar modificado.

No estudo da DTR do trocador de calor a placas foram analisadas influências da vazão e da configuração do trocador a temperatura constante. Foram testadas três vazões de 15, 20 e 25 L/h e configurações de trocador em arranjos em série com número par de passes de 2x1, 4x1, 6x1, 8x1, 10x1, 12x1, 14x1, 16x1 e 18x1. Testaram-se quatro modelos matemáticos com convolução da DTR do sistema de aquisição de dados. O modelo melhor ajustado para o trocador de calor é o modelo combinado PFR+CSTR. Observa-se que a vazão não tem influência nos parâmetros do modelo combinado, que são dependentes da configuração do trocador de calor (número de passes).

Foram determinadas as equações que relacionam os volumes da região de escoamento pistonado V_m , da região de escoamento com mistura perfeita V_p , e da região de estagnação ou morta V_d em função da configuração do trocador de calor.

Observando os gráficos com as respectivas convoluções, foi evidente a distorção do sinal provocado pela célula. Portanto é importante a implementação do processo de convolução no estudo e tratamento dos dados obtidos mediante este sistema de aquisição de dados.

No estudo do processo de pasteurização, verificou-se a influência da vazão no processo. Foram testadas vazões de 15, 20 e 25 L/h. para o arranjo padrão do equipamento para o processamento do leite (tubo de retenção 1; trocador de calor a placas com configuração de arranjos em série com número par de passes de 6x1/10x1/4x1 para aquecimento/regeneração/retenção), o modelo matemático que ficou melhor ajustado com convolução, a temperatura constante, foi o modelo de dispersão axial.

Os parâmetros ajustados para todos os modelos de DTR são apresentados nesta dissertação e sempre que é possível correlacionados com a vazão de escoamento ou número de passes no trocador de calor a placas. As correlações obtidas serão de grande utilidade para a correta operação do pasteurizador testado e a metodologia aqui descrita pode ser aplicada a outros processos.

6. PERSPECTIVAS PARA TRABALHOS FUTUROS

Algumas opções para continuação desta linha de pesquisa:

- Usar as DTRs dos tubos 1 e 2 para calcular a letalidade no tubo. Testar experimentalmente a letalidade usando indicadores biológicos ou químicos que sofram transformação térmica nas condições de pasteurização.
- Realizar ensaios operacionais não isotérmicos do pasteurizador ou do trocador de calor a placas e verificar influência sobre a DTR, comparando com os resultados isotérmicos aqui apresentados.
- Verificar a influência do número de canais por passe no trocador sobre a sua DTR.
- Identificar os tempos médios de residência em todas as partes do processo de pasteurização (seções do trocador, tubo de retenção, tubulação, conexões, etc.) e comparar a somatória com o tempo médio do processo completo determinado experimentalmente.

REFERÊNCIAS*

AKEMI, S. R. **Distribuição do tempo de residência em sistemas de alimentação com vazão variável**. 2005. 64 p. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

ALFA LAVAL. Warminster. Processes: **Milk and cream pasteurization**. Disponível em: <<http://www.us.thermal.alfalaval.com>>. Acesso em 30 jan. de 2008.

ARMFIELD–Innovators in engineering education equipment and industrial food technology equipment. **Plate heat exchanger-heating, economizing and cooling sections**. Disponível em: <<http://www.armfield.co.uk>>. Acesso em 04 de nov. de 2007.

ÁVILA, I.M.; SILVA, C.L.M. Methodologies to optimize thermal processing conditions: an overview. In: **Processing foods: Quality optimization and process assessment**. Boca Raton, 1999.

BOEKEL, V.M.; JONGEN, W.M.F. Product quality and food processing: How to quantify the healthiness of a product. **Cancer Letters**, v. 114, p. 65-69, 1997.

BRASIL.ANVISA - Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução RDC nº 267. **Regulamento técnico sobre as boas práticas de fabricação para estabelecimentos industrializadores de gelados comestíveis**. Brasília, 2000. Disponível em: <<http://e-legis.bvs.br>>. Acesso em 07 nov. 2007.

CHAKRABANDHU, K. **Aseptic processing of particulate foods: computational models and experimental studies**. 2000. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, 2000.

DANTHERM. **Trocadores de calor a placas**. Disponível em: <<http://www.dantherm.com.br>>. Acesso em 06 de nov. de 2007.

DITCHFIELD, C.; TADINI, C. C.; SINGH, R.K.; TOLEDO..R.T. Velocity and temperature profiles, heat transfer coefficients and residence time distribution of a temperature dependent Herschel-Bulkley fluid in a tubular heat exchanger. **Journal of Food Engineering**, v. 76, p. 632-638, 2006.

(*) De acordo com:

Diretrizes para a apresentação de dissertação e tese da Escola Politécnica de Engenharia da Universidade de São Paulo. 2006.

EFIGÊNIA, M.; POVOA, B.; MORAES-SANTOS, T. Effect of Heat Treatment on the Nutricional Quality of Milk Proteins. **International dairy journal**, v. 7, p. 609-6012, 1997.

FOGLER, H.C. **Elements of chemical reaction engineering**. Upper Saddle River: Prentice Hall PTR, 1999.

GALEAZZO, F.C.C.; MIURA, R.Y.; GUT, J.A.W.; TADINI, C.C. Experimental and numerical heat transfer in a plate heat exchanger. **Chemical Engineering Science**, v. 61, n. 21, p.7133-7138, 2006.

GIÁCOMAN, G.V. Análisis de la hidrodinamica de un reactor de flujo pistón. **Ingeniería Revista Académica**. v.7. p. 7-19. Universidad Autónoma de Yucatán. 2003.

GOULD, G.W. Methods for preservation and extension of shelf life. **International Journal of Food Microbiology**, v. 33, n. 1. p. 51-64, 1996.

GOUVEA, M.T.; PARK,S.W.; GIUDICI, R. **Estimação de coeficientes de dispersão axial em leitos fixos**. 18º Encontro sobre escoamento em meios porosos. Nova Friburgo. 1990.

GRIJSPEERDT, K.; HAZARIKA, B.; VUCINIC, D. Application of computational fluid dynamics to model the hydrodynamics of plate heat exchangers for milk processing. **Journal of Food Engineering**, v. 7, p. 237-242, 2003.

GRIJSPEERDT, K.; MORTIER, L.; de BLOCK, J.; RENTERGHEM, R. Applications of modelling to optimise ultra high temperature milk heat exchangers with respect to fouling. **Food control**, v.15, p. 117-130, 2004.

GUT, J.A.W. ; PINTO, J.M. . Modeling of plate heat exchangers with generalized configurations. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 14, p. 2571-2585, 2003b.

GUT, J.A.W.; PINTO, J.M. Conhecendo os trocadores de calor a placas. **Revista de Graduação da Engenharia Química**. São Paulo, v. 1, n. 11, p. 9-16, 2003a.

GUT, J.A.W.; PINTO, J.M. Selecting optimal configurations for multisection plate heat exchangers in pasteurization processes. **Industrial & Engineering Chemical Research**, v.42, n. 24, p. 6112-6124, 2003c.

IBARROLA, J.J.; SANDOVAL, J. M.; GARCÍA-SANZ, M.; PINZOLAS M. Predictive control of a high temperature–short time pasteurization process. **Control Engineering Practice**, v. 10, n. 7, p. 713-725, 2002.

JORDÁN, M.J.; GOODNER, K.L.; LAENCINA, J. Deaeration and pasteurization effects on the orange juice aromatic fraction, **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v.36, n. 4, p. 391-396, 2003.

KAKAÇ, S.; LIU, H. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. Boca Raton, 2002.

LANDFELD, A.; ZITNÝ, R.; HOUSKA, M.; KÝHOS, K.; NOVOTNÁ, P. Residence time distribution during egg yolk pasteurization. **Czech Journal of Food Science** v. 20, n. 5, p. 193-201, 2002.

LEE, H.S.; COATES, G.A. Effect of thermal pasteurization on valencia orange juice color and pigments, **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v. 36, n. 1, p. 153-156, 2003.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. New York: John Wiley, 1972.

LEVENSPIEL, O. **Chemical Reaction Engineering**. New York: John Wiley & Sons, 2000.

LEWIS, M.; HEPPELL, N. **Continuous thermal processing of foods: pasteurization and UHT sterilization**. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, Inc. 2000.

LEWIS, M.; ROBINSON, R.K. **Heat treatment of milk**. Modern Dairy Technology. Gaithersburg, Maryland: Aspen Publishers, v. 1, 1999.

NASCIMENTO, C.A.O.; GIUDICI, R. Um experimento didático para a determinação de distribuição do tempo de residência em reator de leito fixo. **Revista de Ensino de Engenharia Química**. v. 8, n.1, p. 16-22. 1989.

NOTT, K.P.; HALL, L.D. Advances in temperature validation of foods. **Trends in Food Science & Technology**, v. 10, n. 11, p. 366-374, 1999.

PARTRIDGE. J.A. Pasteurization of milk: historial impact on tuberculosis. **Department of Food Science and Human Nutrition**. Michigan Dairy Review, v 19. July 2000.

PÁTKAI, G.; BARTA, J.; VARSÁNYI, I. Decomposition of anticarcinogen factors of the beetroot during juice and nectar production. **Cancer Letters**, v. 114, p. 105-106, 1997.

RAO, M.A.; LONCIN, M. Residence time distribution and its role in continuous pasteurization (Part I). **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v. 7, p. 5-13, 1974a.

RAO, M.A.; LONCIN, M. Residence time distribution and its role in continuous pasteurization (Part II). **Lebensmittel-Wissenschaft and Technologie**, v. 7, p. 14-17, 1974b.

RUTHVEN D. M. The residence time distribution for ideal laminar flow in a helical tube. **Chemical Engineering Science**, v. 26, p. 1113-1121, 1971.

SOARES, J. H. P. **Uso de traçadores na modelagem de unidades de aeração e decantação em tratamento de esgotos**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal de Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1985.

TOMASULA, P.M.; KOZEMPEL, M.F. Flow characteristics of a pilot-scale high temperature, short time pasteurizer. **Journal of Dairy Science**, v. 87, n. 9, p. 2761-2768, 2004.

TORRES, A.P.; OLIVEIRA, F.A.R. Residence Time distribution of liquids in a continuous tubular thermal processing system - Part II: Relating hold tube efficiency to processing conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 2, p. 165-175, 1998b.

TORRES, A.P.; OLIVEIRA, F.A.R. Residence Time distribution studies in continuous thermal processing of liquid foods: a Review. **Journal of Food Engineering**, v. 36, n. 1, p. 1-30, 1998a.

TORRES, A.P.; OLIVEIRA, F.A.R.; FORTUNA, S. P. Residence time distribution of liquids in a continuous tubular thermal processing system - Part I: Relating RTD to processing conditions. **Journal of Food Engineering**, v. 35, n. 2, p. 147-163, 1998.

TRIBESS, T.B.; TADINI, C.C. Minimally processed orange juice: an alternative to improve the Brazilian orange juice market. **III International Conference On Agri-Food Chain / Networks Economics And Management**, FEARP- USP, Ribeirão Preto, 2001.

ANEXO A - Exemplo de uma planilha de cálculo para obter $E(t)$, $F(t)$, $E(\theta)$ e $\bar{t}$ a partir de dados experimentais

Tubo de Retenção 1

Ensaio n° 1

Vazão 1

Volume do traçador = 0,05 ml

Temperatura real = 27,8 °C

Condutividade (uS)	Concentração (g/L)	C' (C - C ₀)	tempo (t) (seg)	∫ 1	E(t)	∫ 2	F(t)	∫ 3	θ	E(θ)
1082,0	0,7035	0,0000	0	-	0,0000	-	0,0000	-	0,0000	0,0000
1083,0	0,7041	0,0007	2	0,0007	0,0002	0,0002	0,0002	0,0004	0,1208	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	3	0,0007	0,0002	0,0002	0,0004	0,0006	0,1813	0,0037
1084,0	0,7048	0,0013	4	0,0010	0,0004	0,0003	0,0008	0,0012	0,2417	0,0074
1085,0	0,7055	0,0020	5	0,0017	0,0007	0,0006	0,0013	0,0026	0,3021	0,0110
1084,0	0,7048	0,0013	6	0,0013	0,0004	0,0004	0,0018	0,0024	0,3625	0,0074
1083,0	0,7041	0,0007	8	0,0020	0,0002	0,0007	0,0024	0,0044	0,4833	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	9	0,0007	0,0002	0,0002	0,0027	0,0019	0,5438	0,0037
1102,0	0,7169	0,0134	10	0,0067	0,0045	0,0022	0,0049	0,0223	0,6042	0,0737
1322,1	0,8653	0,1619	11	0,0876	0,0538	0,0291	0,0340	0,3181	0,6646	0,8902
1481,1	0,9738	0,2703	12	0,2161	0,0898	0,0718	0,1058	0,8347	0,7250	1,4866
1583,1	1,0439	0,3404	13	0,3054	0,1131	0,1015	0,2073	1,2742	0,7854	1,8722
1837,1	1,2204	0,5169	14	0,4287	0,1718	0,1424	0,3497	1,9375	0,8458	2,8428
1660,1	1,0971	0,3936	15	0,4553	0,1308	0,1513	0,5010	2,1832	0,9063	2,1649
1389,1	0,9109	0,2074	17	0,6011	0,0689	0,1997	0,7007	3,1337	1,0271	1,1409
1300,1	0,8504	0,1469	18	0,1772	0,0488	0,0589	0,7596	1,0253	1,0875	0,8081
1268,1	0,8287	0,1253	19	0,1361	0,0416	0,0452	0,8048	0,8349	1,1479	0,6889
1254,1	0,8192	0,1158	20	0,1205	0,0385	0,0400	0,8449	0,7802	1,2083	0,6368
1193,0	0,7780	0,0746	21	0,0952	0,0248	0,0316	0,8765	0,6449	1,2688	0,4100
1156,0	0,7531	0,0497	22	0,0621	0,0165	0,0206	0,8971	0,4416	1,3292	0,2731
1144,0	0,7450	0,0416	23	0,0456	0,0138	0,0152	0,9123	0,3404	1,3896	0,2287
1125,0	0,7323	0,0288	24	0,0352	0,0096	0,0117	0,9240	0,2738	1,4500	0,1585
1118,0	0,7276	0,0241	25	0,0265	0,0080	0,0088	0,9328	0,2152	1,5104	0,1327
1114,0	0,7249	0,0214	27	0,0456	0,0071	0,0151	0,9479	0,3928	1,6313	0,1179
1107,0	0,7202	0,0168	28	0,0191	0,0056	0,0063	0,9543	0,1741	1,6917	0,0921
1102,0	0,7169	0,0134	29	0,0151	0,0045	0,0050	0,9593	0,1425	1,7521	0,0737
1100,0	0,7155	0,0121	30	0,0127	0,0040	0,0042	0,9635	0,1247	1,8125	0,0663
1100,0	0,7155	0,0121	31	0,0121	0,0040	0,0040	0,9675	0,1222	1,8729	0,0663
1096,0	0,7128	0,0094	32	0,0107	0,0031	0,0036	0,9711	0,1120	1,9334	0,0516
1094,0	0,7115	0,0080	33	0,0087	0,0027	0,0029	0,9740	0,0939	1,9938	0,0442
1095,0	0,7122	0,0087	34	0,0084	0,0029	0,0028	0,9767	0,0932	2,0542	0,0479
1091,0	0,7095	0,0060	36	0,0127	0,0020	0,0042	0,9810	0,1478	2,1750	0,0331
1090,0	0,7088	0,0054	37	0,0057	0,0018	0,0019	0,9829	0,0690	2,2354	0,0295
1088,0	0,7075	0,0040	38	0,0047	0,0013	0,0016	0,9844	0,0583	2,2959	0,0221
1088,0	0,7075	0,0040	39	0,0040	0,0013	0,0013	0,9858	0,0514	2,3563	0,0221
1087,0	0,7068	0,0033	40	0,0037	0,0011	0,0012	0,9870	0,0483	2,4167	0,0184
1093,0	0,7108	0,0074	41	0,0054	0,0024	0,0018	0,9888	0,0724	2,4771	0,0405
1087,0	0,7068	0,0033	42	0,0054	0,0011	0,0018	0,9905	0,0735	2,5375	0,0184
1086,0	0,7061	0,0027	44	0,0054	0,0009	0,0018	0,9923	0,0765	2,6584	0,0147
1085,0	0,7055	0,0020	45	0,0023	0,0007	0,0008	0,9931	0,0346	2,7188	0,0110
1084,0	0,7048	0,0013	46	0,0017	0,0004	0,0006	0,9937	0,0253	2,7792	0,0074
1084,0	0,7048	0,0013	48	0,0027	0,0004	0,0009	0,9945	0,0418	2,9000	0,0074
1082,0	0,7035	0,0000	49	0,0007	0,0000	0,0002	0,9948	0,0107	2,9604	0,0000
1084,0	0,7048	0,0013	50	0,0007	0,0004	0,0002	0,9950	0,0111	3,0209	0,0074
1084,0	0,7048	0,0013	51	0,0013	0,0004	0,0004	0,9954	0,0225	3,0813	0,0074
1083,0	0,7041	0,0007	53	0,0020	0,0002	0,0007	0,9961	0,0345	3,2021	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	54	0,0003	0,0002	0,0001	0,9962	0,0060	3,2625	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	56	0,0013	0,0002	0,0004	0,9967	0,0245	3,3834	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	57	0,0007	0,0002	0,0002	0,9969	0,0126	3,4438	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	58	0,0007	0,0002	0,0002	0,9971	0,0128	3,5042	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	60	0,0013	0,0002	0,0004	0,9976	0,0263	3,6250	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	61	0,0007	0,0002	0,0002	0,9978	0,0135	3,6854	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	62	0,0007	0,0002	0,0002	0,9980	0,0137	3,7459	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	63	0,0007	0,0002	0,0002	0,9982	0,0139	3,8063	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	64	0,0007	0,0002	0,0002	0,9984	0,0141	3,8667	0,0037
1082,0	0,7035	0,0000	65	0,0003	0,0000	0,0001	0,9986	0,0071	3,9271	0,0000
1083,0	0,7041	0,0007	66	0,0003	0,0002	0,0001	0,9987	0,0073	3,9875	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	68	0,0013	0,0002	0,0004	0,9991	0,0298	4,1084	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	69	0,0007	0,0002	0,0002	0,9993	0,0152	4,1688	0,0037
1082,0	0,7035	0,0000	70	0,0003	0,0000	0,0001	0,9994	0,0077	4,2292	0,0000
1082,0	0,7035	0,0000	71	0,0000	0,0000	0,0000	0,9994	0,0000	4,2896	0,0000
1083,0	0,7041	0,0007	72	0,0003	0,0002	0,0001	0,9996	0,0080	4,3500	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	73	0,0007	0,0002	0,0002	0,9998	0,0161	4,4105	0,0037
1083,0	0,7041	0,0007	74	0,0003	0,0002	0,0001	0,9999	0,0082	4,4709	0,0037
1082,0	0,7035	0,0000	75	0,0003	0,0000	0,0001	1,0000	0,0082	4,5313	0,0000
1082,0	0,7035	0,0000	76	0,0000	0,0000	0,0000	1,0000	0,0000	4,5917	0,0000
Σ =				3,0095	Σ =		1,0000	$\bar{t}$ = 16,5516		