


CARMEN CECILIA TADINI



**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
ALIMENTOS LÍQUIDOS UTILIZANDO
TROCADOR DE CALOR TIPO PLACAS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção
do título de Professor Livre
Docente junto ao Departamento
de Engenharia Química, na
especialidade
ENGENHARIA DE ALIMENTOS.

São Paulo
2000

CARMEN CECILIA TADINI

**ESTUDO DA TRANSFERÊNCIA DE CALOR EM
ALIMENTOS LÍQUIDOS UTILIZANDO
TROCADOR DE CALOR TIPO PLACAS**

Tese apresentada à Escola
Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção
do título de Professor Livre
Docente junto ao Departamento
de Engenharia Química, na
especialidade
ENGENHARIA DE ALIMENTOS.

São Paulo
2000

O meu especial carinho as minhas filhas, a jovem *Bruna* e a menina *Giúlia*, que apesar de compreenderem o significado desta etapa da minha carreira académica, peço desculpas pela falta de atenção.

Ao meu marido *Tadini*, pela incentivo permanente e por suportar os meses de separação durante minha estada em *Purdue*.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos alunos que apoiaram, incentivaram e acreditaram neste projeto.

Meus sinceros agradecimentos, em especial, aos meus orientados de I.C.: *Denise, Daniel, Adilson e Fábio*; aos estagiários: *Han* em Purdue, *Bianca, Alessandra, Lúcia, Marcelo e Áurea*; as minhas orientadas de Mestrado: *Denise e Gabriela*.

Ao Prof. Dr. *Rakeshi Singh*, Ph.D., da PURDUE UNIVERSITY que não mediu esforços para colocar disponível todos os recursos de modo que o trabalho de pesquisa fosse realizado da melhor maneira possível, e sobretudo pela sua hospitalidade e amizade. Agradeço também pelas inúmeras discussões sobre o trabalho que contribuíram para melhoria do meu conhecimento.

Aos professores e funcionários do Food Science da Purdue University que me ajudaram durante a minha estada nos EUA.

A *FAPESP*, pela bolsa-auxílio estágio no exterior e pelo Auxílio à Pesquisa concedidos.

A *LATASA Latas de Alumínio S.A.* pelo apoio técnico e fornecimento das latas de alumínio.

As técnicas do Laboratório de Engenharia de Alimentos do Depto. de Eng. Química, *Lindamar e Flávia* pela preciosa colaboração com a parte experimental deste trabalho.

A todos os funcionários do Depto. de Eng. Química que direta ou indiretamente colaboraram na execução deste trabalho.

SUMÁRIO

	Pág.
Lista de Tabelas	iii
Lista de Figuras	vi
Lista de Quadros	xii
Notação	xiv
Resumo	xvi
Abstract	xvii
APRESENTAÇÃO	1
1. INTRODUÇÃO	3
OBJETIVOS	7
2. REVISÃO DA LITERATURA	8
2.1 Trocador de calor tipo placas	8
2.2 Principais fatores de deterioração em suco de laranja	11
2.3 Parâmetros de tempo – temperatura definidos para pasteurização	15
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Matéria-prima	18
3.2 Equipamentos	18
3.3 Reagentes	25
3.4 Parte experimental	26
3.4.1 Calibração dos sensores de temperatura e da bomba de alimentação	26
3.4.2 Desempenho térmico do trocador	27
3.4.3 Dimensionamento do trocador para utilização com suco de laranja natural	29

3.4.4 Pasteurização do suco de laranja natural	29
3.4.4.1 Montagem do trocador	29
3.4.4.2 Fluxograma do processo	32
3.4.4.3 Descrição do processo	33
3.4.4.4 Análises físico-químicas	34
3.4.4.5 Análise da atividade da enzima pectinesterase	35
3.4.4.6 Determinação dos parâmetros reológicos do suco de laranja	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	36
4.1 Calibração dos sensores de temperatura e bomba de alimentação	36
4.2 Desempenho térmico do trocador	42
4.3 Pasteurização do suco de laranja	49
4.3.1 Resumo dos ensaios	49
4.3.2 Análises físico-químicas do suco de laranja	55
4.4 Parâmetros reológicos do suco de laranja	68
4.5 Coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja natural	79
4.6 Cinética de inativação da enzima pectinesterase na pasteurização do suco de laranja natural	89
5. CONCLUSÕES	96
ANEXO I	101
ANEXO II	109
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	128

Lista de Tabelas

	Pág.
TABELA 4.1: Valores médios das temperaturas obtidas através da aquisição da temperatura de cada termopar referentes a fusão do gelo, ebulição da água e da temperatura ambiente da água.	38
TABELA 4.2: Valores dos coeficientes angulares (m) e lineares (n) da curva de calibração para cada termopar, obtidos da regressão linear.	39
TABELA 4.3: Valores das medições de vazão obtidos para cada posição do <i>speed</i> dial da bomba de alimentação do trocador, seus respectivos valores médios e desvios padrão.	40
TABELA 4.4: Dados de temperatura adquiridos através do Data Logger FT 43a-90, para o ensaio com água destilada, na seção de regeneração, com o arranjo de placas 4 de 1/4 de 1, ilustrado na Figura 3.10.	42
TABELA 4.5: Planilha de cálculo Ensaio: Arranjo: 4 de 1/4 de 1	46

- TABELA 4.6:** Dados das características das placas empregadas nos arranjos do trocador de calor tipo placas ARMFIELD, FT 43-A 45
- TABELA 4.7:** Parâmetros da regressão multilinear ajustada ao valores de Nu, Re e Pr, obtidos a partir de dados experimentais, de arranjos simétricos na seção de regeneração, com água destilada, no trocador de calor tipo placas, ARMFIELD, FT 43 A. 45
- TABELA 4.8:** Dados de parâmetros temperatura – tempo de retenção de cada ensaio da pasteurização de suco de laranja realizado no trocador de calor tipo placas ARMFIELD, FT 43 – A. 50
- TABELA 4.9:** Dados de temperatura adquiridos através do Data Logger FT 43a-90 e de termômetro calibrado, para o ensaio com suco de laranja, na seção de regeneração, com o arranjo de placas 6 de 1/ 6 de 1, ilustrado na Figura 3.8. 53
- TABELA 4.10:** Valores médios obtidos nas análises da acidez titulável, ° Brix, pH, teor de sólidos insolúveis, teor de sólidos totais, teor de polpa e a razão da atividade da enzima pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da enzima no suco não processado. 56

TABELA 4.11: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.7, referentes ao Suco de Laranja Natural do ensaio do dia 9 de novembro de 1999.	69
TABELA 4.12: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.8, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura ambiente.	71
TABELA 4.13: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.9, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura de 40 °C.	72
TABELA 4.14: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.10, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura de 60 °C.	73
TABELA 4.15: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.11, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura de 80 °C.	74
TABELA 4.16: Planilha de cálculo do h	82

Lista de Figuras

	Pág.
FIGURA 2.1: Desenho esquemático do arranjo de placas ilustrando a função das gaxetas que não permitem a mistura das duas correntes de líquido.	9
FIGURA 2.2: Corte da laranja. Composição da fruta e principais produtos que podem ser obtidos a partir dela.	12
FIGURA 2.3: Desenho esquemático ilustrando a função da enzima pectinesterase sobre a pectina presente no suco de laranja.	13
FIGURA 3.1: Desenho esquemático do trocador de calor ARMFIELD FT 43-A, sendo utilizado como pasteurizador, com indicação dos pontos de medição da temperatura e sistema de controle	19
FIGURA 3.2: Desenho ilustrando a montagem do trocador ARMFIELD FT 43-A, no processo de pasteurização com instalação do tubo de retenção de 15 segundos	20
FIGURA 3.3: Desenho ilustrando a montagem do trocador ARMFIELD FT 43-A, no processo de pasteurização com instalação do tubo de retenção de 45 segundos	21

- FIGURA 3.4:** Desenho ilustrando o Sistema de Circulação de Água Quente do Trocador de Calor tipo placas ARMFIELD, FT 43-A 22
- FIGURA 3.5:** Desenho ilustrando o Console de Controle do Trocador de Calor tipo placas ARMFIELD, FT 43-A 23
- FIGURA 3.6:** Gráfico da reta obtida da regressão linear referente a medida do termopar, obtida a partir dos pontos experimentais de três condições distintas: fusão do gelo, ambiente e ebulição da água. 26
- FIGURA 3.7:** Representação esquemática de um exemplo de arranjo de placas simétrico utilizado no trocador de calor para ensaios com água destilada. 28
- FIGURA 3.8:** Representação esquemática do arranjo de placas utilizado no trocador de calor para ensaios com suco de laranja natural para atender as temperaturas de pasteurização de 82,5 °C e 85,0 °C. 30

- FIGURA 3.9:** Representação esquemática do arranjo de placas utilizado no trocador de calor para ensaios com suco de laranja natural para atender a temperatura de pasteurização de 87,0 °C. 31
- FIGURA 3.10:** Exemplo de amostragem para um ensaio, com temperatura de pasteurização requerida = 82.5°C e tempos de retenção de 35, 45 e 60 segundos. 34
- FIGURA 4.1:** Medidas da Temperatura referentes a fusão do gelo adquiridas através do Programa FT43A-90IFD Data Logger para Windows. 36
- FIGURA 4.2:** Medidas da Temperatura referentes a temperatura ambiente da água adquiridas através do Programa FT43A-90IFD Data Logger para Windows. 37
- FIGURA 4.3:** Medidas da Temperatura referentes a ebulição da água adquiridas através do Programa FT43A-90IFD Data Logger para Windows. 37
- FIGURA 4.4:** Curva de calibração da bomba de alimentação obtida através de regressão linear dos dados obtidos de três medições 41

- FIGURA 4.5:** Variabilidade da razão do teor de polpa do suco processado em relação ao teor de polpa do suco não processado, em função da temperatura de pasteurização. 65
- FIGURA 4.6:** Variabilidade da razão do teor de polpa do suco processado em relação ao teor de polpa do suco não processado, em função do tempo de retenção. 66
- FIGURA 4.7:** Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes ao ensaio do dia 9 de novembro de 1999, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperaturas desde ambiente até 85 °C. 68
- FIGURA 4.8:** Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura ambiente. 70
- FIGURA 4.9:** Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura de 40 °C. 71

- FIGURA 4.10:** Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura de 60 °C. 72
- FIGURA 4.11:** Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura de 80 °C. 73
- FIGURA 4.12:** Aplicação do modelo de Arrhenius para o índice de consistência do Suco de Laranja Natural no intervalo de temperatura entre 25 °C e 85 °C. 77
- FIGURA 4.13:** Aplicação da regressão polinomial para o índice de escoamento do Suco de Laranja Natural no intervalo de temperatura entre 25 °C e 85 °C. 78
- FIGURA 4.14:** Aplicação do modelo da regressão múltipla linear para h do Suco de Laranja Natural ajustado dos valores experimentais. 88
- FIGURA 4.15:** Inativação da pectinesterase presente no suco de laranja natural em função da temperatura de pasteurização. 90
- FIGURA 4.16:** Inativação da pectinesterase presente no suco de laranja natural em função do tempo de retenção. 91

- FIGURA 4.17:** Inativação da pectinesterase presente no suco de laranja natural em função do pH. 91
- FIGURA 4.18:** Superfície de resposta com as linhas de contorno da variação da razão PEU/PEU_0 em função do tempo de retenção e do pH do suco para uma temperatura de 84,75 °C. 94
- FIGURA 4.19:** Superfície de resposta com as linhas de contorno da variação da razão PEU/PEU_0 em função da temperatura de pasteurização e do tempo de retenção do suco para um valor médio de pH de 3,95. 95
- FIGURA 4.20:** Superfície de resposta com as linhas de contorno da variação da razão PEU/PEU_0 em função da temperatura de pasteurização e do pH do suco para um valor médio de tempo de retenção de 35 s. 96
- FIGURA I.1:** Dimensões principais de uma placa do tipo “Chevron” (a) e dimensões projetada e desenvolvida da placa e sua respectiva seção transversal, normal a direção do fluxo (b). 101
- FIGURA II.1** Tela 1 : Entrada de dados para o programa. 109
- FIGURA II.2:** Tela 2 : Verificação dos resultados. 110
- FIGURA II.3:** Tela 3 : Informações sobre o programa. 111

Lista de Quadros

	Pág.
QUADRO 4.1: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de acidez expressa como % de ácido cítrico do suco de laranja natural.	61
QUADRO 4.2: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de graus Brix expresso como % de sólidos solúveis do suco de laranja natural.	62
QUADRO 4.3: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do pH do suco de laranja natural.	63
QUADRO 4.4: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do teor de sólidos insolúveis (%) do suco de laranja natural.	63
QUADRO 4.5: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do teor de sólidos totais (%) do suco de laranja natural.	64
QUADRO 4.6: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do teor de polpa (%) do suco de laranja natural.	65

QUADRO 4.7: Análise de variância aplicada nos valores obtidos da razão PEU/PEU_0 do suco de laranja natural.	68
QUADRO 4.8: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de índice de consistência do suco de laranja natural	75
QUADRO 4.9: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de índice de escoamento do suco de laranja natural	76
QUADRO 4.10: Análise da regressão múltipla linear aplicada nos valores obtidos do coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja natural	87
QUADRO 4.11: Análise de variância aplicada no modelo de regressão múltipla linear obtido para correlacionar o h do suco de laranja natural.	88
QUADRO 4.12: Análise de variância aplicada nos valores da razão da atividade da enzima pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da enzima presente no suco processado.	89
QUADRO 4.13: Estimativa dos coeficientes do polinômio de 2º grau ajustado para os valores da razão da atividade da enzima pectinesterase presente no suco processado em relação à atividade da enzima presente no suco não processado.	93

NOTAÇÃO

A	Área da placa	m^2
A_e	Área total desenvolvida de todas as placas efetivas	m^2
a_p	Área efetiva da placa	m^2
A_p	Área projetada da placa	m^2
b	Espaçamento médio entre placas	m
B	Grau Brix	
C_p	Calor específico do suco	kJ/kg.K
D_e	Diâmetro equivalente	m
D_p	Diâmetro da conexão	m
E_a	Energia de ativação necessária para fluir	kJ/kmol
G_c	Velocidade mássica do suco no canal	$\text{kg/m}^2.\text{s}$
h	Coefficiente de película de troca térmica por convecção	$\text{W/m}^2.\text{K}$
K	Índice de consistência	Pa.s^n
k	Condutividade térmica do suco	W/m.K
K'	Índice de consistência baseado na equação Weissenbrg-Robinoviwitch-Mooney	Pa.s^n
K_o	Constante de Arrhenius	Pa.s^n
K_p	Condutividade térmica do material da placa	W/m.K
L_c	Comprimento do arranjo de placas comprimido	m
L_h	Distância horizontal entre conexões	m
L_p	Comprimento projetado da placa	m
L_v	Distância vertical entre conexões	m
L_w	Largura do placa dentro da gaxeta	m
\dot{m}	Fluxo mássico	kg/s
n	Índice de escoamento	adimensional
N_{cp}	Número de canais por passe	adimensional
N_p	Número de passes	adimensional
N_t	Número total de placas	adimensional
Nu	Nusselt	adimensional
p	“pitch” da placa(profundidade externa da placa corrugada)	m

Pr	Prandtl	adimensional
Q_e	Carga térmica trocada	W
R	Constante dos gases	kJ/kmol.K
Re	Reynolds	adimensional
T	Temperatura	°C ou K
t	Espessura da placa	m
\bar{v}	Velocidade média no canal	m/s
U	Coefficiente global de troca térmica	W/m ² .K
ΔT_m	Diferença média logarítmica da temperatura	K
ϕ	Fator de aumento de superfície	adimensional
μ_{ap}	Viscosidade aparente do suco	Pa.s
μ_w	Viscosidade da água	Pa.s
μ_c	Viscosidade do fluido frio	Pa.s
ρ	Densidade do suco	kg/m ³

subscritos

c	Fluido frio
h	Fluido quente
m	Média
1	Entrada
2	Saída

RESUMO

Trocadores de calor tipo placas são extensivamente utilizados nas indústrias de alimentos e laticínios, mas muito pouca informação básica tem sido publicada sobre suas características de fluxo e desempenho térmico. As principais vantagens de tais unidades é sua flexibilidade na montagem dos arranjos de placas, possuir altas taxas de transferência de calor e facilidade na limpeza e esterilização para atingir condições sanitárias. Eles são empregados normalmente como aquecedores ou resfriadores, como também como condensadores. A unidade básica deste tipo de trocador de calor é o conjunto compacto de placas com superfícies corrugadas que induzem turbulência mesmo a números de Reynolds baixos na ordem de 200. Aplicações típicas são principalmente fluxo líquido-líquido. O coeficiente de transferência de calor do suco de laranja durante a pasteurização empregando um trocador de calor tipo placas ARMFIELD, com placas em aço inox AISI 316, foi estudado. Modelos matemáticos para prever o coeficiente de transferência de calor do suco são apresentados. Medidas reológicas do suco de laranja foram realizadas, na faixa de temperatura entre 25 °C e 85 °C, usando um reômetro de cilindros coaxiais BROOKFIELD RVD III, com o adaptador UL. Neste trabalho várias temperaturas de processo-tempos de retenção foram estabelecidos para estudar a inativação da pectinesterase em diferentes condições de pasteurização de suco de laranja natural. O comportamento reológico do suco de laranja foi bem descrito pelo modelo da Lei de Potência. Uma equação do tipo Arrhenius foi usada para modelar a variação do índice de consistência com a temperatura, na faixa de 150 a 310 s⁻¹ da velocidade de cisalhamento. O modelo da regressão polinomial foi empregado para modelar a variação do índice de fluxo com a temperatura. Dos dados experimentais de temperatura e vazões, o modelo de regressão múltipla foi empregado para prever o coeficiente de transferência de calor do suco de laranja natural, que foi correlacionado como uma função da velocidade do canal e dos índices de consistência e de fluxo. Os valores do coeficiente de transferência de calor do suco predito pelo modelo variou de 313 a 962 W/m²°C, no intervalo da velocidade do canal entre 0,03617 e 0,1169 m/s, do índice de consistência entre 0,0021 e 0,0045 Pa.sⁿ, do índice de fluxo entre 1,1102 e 1,2570, da temperatura entre 25 e 85 °C e do grau Brix entre 9,61 e 12,65. Este trabalho contribuiu no estudo da transferência de calor de suco de laranja natural para diferentes condições de pasteurização.

ABSTRACT

Plate heat exchangers are used extensively in the food and dairies industries, but very little basic information has been published on their flow and heat-transfer characteristics. The principal advantages of such units are flexibility of flow arrangements, extremely high heat transfer rates, and easy of opening for cleaning and sterilization to meet healthy and sanitary requirements. They are used as conventional process heaters and coolers, as well as condensers. The basic elements of a plate heat exchanger are closely spaced plates with surfaces altered to create turbulence at Reynolds numbers as low as 200. Typical applications are mainly liquid-to-liquid turbulent flow situations. The heat transfer film coefficient of orange juice during pasteurization using an ARMFIELD plate heat exchanger with 316 SS plates was studied. Mathematical models to predict orange juice heat transfer film coefficient are presented. Rheological measurements of orange juice were made, in the temperature range from 25 °C to 85 °C, using a coaxial cylinder viscometer BROOKFIELD RVD III, with UL adapter. In this job, several time-temperatures parameters were established to study different pasteurization conditions of enzyme inactivation, for orange juice, containing natural pectinesterase enzyme. The flow behavior of orange juice was well described by the Power Law model. An Arrhenius type equation was used for modeling the variation of the consistency index with temperature in the shear rate range of 150 – 310 s⁻¹. A polynomial model was used for modeling the variation of the flow index with the temperature. From experimental data of temperatures and flow rates, a multiple regression model was used for predict the heat transfer film coefficient for orange juice, which was correlated as a function of channel velocity and its consistency and flow indexes. The values of OJ heat transfer film coefficient predicted by the model varied from 313 to 962 W/m²°C, at channel velocity range from 0,03617 to 0,1169 m/s, at consistency index range from 0,0021 to 0,0045 Pa.sⁿ, at flow index range from 1,1102 to 1,2570, at temperature range from 25 to 85 °C and at Brix degree range from 9,61 to 12,65. This study has provided a suitable heat transfer correlation to predict the orange juice heat transfer film coefficient as a function of its flow behavior and the channel velocity, that is, this correlation is independent of the plate geometry, for varied conditions of OJ pasteurization process.

APRESENTAÇÃO

Este trabalho de pesquisa é parte integrante da linha de pesquisa TRATAMENTO TÉRMICO DE ALIMENTOS LÍQUIDOS iniciado em 1997, quando realizei o meu estágio no Food Science of PURDUE University, Indiana, USA, no período entre novembro de 1997 a abril de 1998.

Ao retornar ao país, e tendo obtido auxílio pesquisa da FAPESP, foi possível montar um novo laboratório, onde possui como equipamento principal um Trocador de Calor tipo Placas, ARMFIELD, importado da Inglaterra com sistema de aquisição de dados e acessórios, permitindo assim realizar estudos de transferência de calor em processos de pasteurização de alimentos líquidos e modelagem matemática de parâmetros indicadores do processo de pasteurização. O presente trabalho de pesquisa é resultado de estudos a respeito do processo de pasteurização de suco de laranja natural e da cinética de inativação da enzima pectinesterase. Outros alimentos líquidos serão objeto de estudos posteriores.

A linha de pesquisa iniciou em 1997, com o projeto de pesquisa de Iniciação Científica do meu orientado *Daniel*, intitulado DESEMPENHO TÉRMICO DE UM TROCADOR DE CALOR A PLACAS. Neste trabalho foi desenvolvido um programa de cálculo em linguagem Visual Basic de modo a ser possível dimensionar um arranjo do trocador para atender as condições de processo. No ano seguinte, outro orientado de Iniciação Científica *Adilson*, reformulou o programa inserindo as características do trocador da ARMFIELD, recém-chegado ao nosso laboratório e realizou ensaios com água destilada.

Desde 1996, então minha orientada de Iniciação Científica, a *Denise* vem estudando o processo de pasteurização de suco de laranja natural. Inicialmente foi estudado o processo descontínuo e verificada a interação da liga de alumínio 3004-H39 com o suco. Posteriormente estudos foram realizados comparando esta interação com solução simulada.

Em junho de 1999, a *Denise* defendeu o seu título de Mestre, estudando o processo de pasteurização contínuo do suco de laranja natural e a viabilidade do armazenamento do produto em latas de alumínio.

Durante o ano de 1999, ensaios foram realizados com suco de laranja para obtenção das planilhas de temperatura e vazão, em várias condições de temperatura de pasteurização e tempo de retenção. Reogramas do suco de laranja também foram adquiridos utilizando o reômetro da BROOKFIELD, modelo RVT-III, utilizando o programa Rheocalc. Atividade da enzima pectinesterase foi medida através de análises realizadas no pH-Stat, da RADIOMETER, modelo PHM 290.

A minha orientada *Gabriela*, a partir dos dados obtidos nos ensaios com suco, defenderá seu título de Mestre apresentando trabalho referente a cinética de inativação da enzima e a estabilidade físico-química e microbiológica do suco armazenado refrigerado por até 21 dias em latas de alumínio e em garrafas de PEAD.

A partir de março de 2000, o meu orientado de Iniciação Científica *Fábio*, estudará a cinética de inativação das enzimas peroxidase e polifenoloxidase presentes na água de coco, submetida a processo de pasteurização contínuo no trocador.

Assim, com esta prévia Apresentação, pretendo introduzir para o leitor o histórico desta linha de pesquisa, que como idéia surgiu após a conclusão do meu Mestrado, quando foi elaborado um projeto e solicitado recursos para a FINEP, que infelizmente indeferiu o pedido.

Agora com a linha de pesquisa consolidada, é minha intenção dar continuidade com o estudo de outros alimentos líquidos e oferecer novas oportunidades para futuros orientados.

1. INTRODUÇÃO

Tratamentos térmicos de alimentos líquidos são atualmente realizados em trocadores de calor tipo placas, devido as suas características construtivas que induzem fluxo turbulento evitando o sobreaquecimento do alimento sobre a superfície. O sobreaquecimento é indesejável em qualquer tratamento térmico devido à perda de qualidade do alimento e à incrustação da superfície de troca térmica. Este tipo de trocador é amplamente utilizado na indústria de processos de alimentos, pois pode ser facilmente desmontado para limpeza e sanitização. Uma outra característica importante e exclusiva do trocador de calor tipo placas é que através do uso de grades conectadoras especiais é possível prover conexão para fluidos alternados de modo que várias funções de transferência de calor podem ser realizados num mesmo pedestal. Esta característica tornou o trocador de calor tipo placas de uso universal na indústria de alimentos em processos de pasteurização e esterilização de alimentos líquidos (leite, sucos e outros) realizando em um mesmo pedestal operações de resfriamento, regeneração e aquecimento (SCHLÜNDER, 1983 & APV, s.d.).

A pasteurização é um dos mais amplamente processos usados na indústria alimentícia com vistas à destruição térmica de microorganismos patogênicos e deterioradores. O conceito do uso de calor para destruir microorganismos é simples em princípio, mas requer na prática um padrão alto de projeto, operação, manutenção e controle, para assegurar que os resultados desejados sejam alcançados. O processo de pasteurização é projetado para assegurar que cada partícula do produto receba um mínimo tratamento temperatura-tempo definido seguido de um rápido resfriamento para prevenir o crescimento de quaisquer organismos sobreviventes e minimizar injúrias nas propriedades organolépticas e nutricionais do produto. A pasteurização, que tem como principal objetivo matar as células vegetativas causadoras de doenças, geralmente resulta em um aumento de vida de prateleira do produto, pois o tratamento térmico também reduz o nível de bactérias deterioradoras. É importante notar que a pasteurização não resulta na morte total de todos os microorganismos presentes; por exemplo, a maioria dos esporos sobrevivem. Já o processo de esterilização elimina

totalmente os microorganismos presentes, tanto células vegetativas, quanto bactérias formadoras de esporos (HASTING, 1992).

Um típico trocador de calor tipo placas compreende um conjunto de placas corrugadas agrupadas mantidas dentro de um pedestal. Elas possuem juntas de borracha com o objetivo de completa vedação e prevenção da mistura das correntes líquidas, ou seja, eventual contaminação do fluido servidor ao alimento. Uma grande variedade de arranjos de placas (fluxo paralelo, contracorrente ou misto) é possível para atender diferentes necessidades de vazões mássicas, capacitâncias térmicas e faixas de temperatura entre as duas correntes líquidas em fluxo turbulento. Esses trocadores são relativamente compactos, com superfícies de troca de calor relativamente pequenas tornando-os atrativos para uso. A maioria das aplicações são às pressões de operação abaixo de 2000 kN/m² e temperaturas abaixo de 150°C (SCHLÜNDER, 1983 & APV, s.d.).

Geralmente o processo de pasteurização utilizando o trocador de calor tipo placas, compreende quatro estágios principais, cuja descrição simplificada é como segue:

- pré-aquecimento do produto entrando, geralmente usando o produto pasteurizado do tubo de retardamento.
- aquecimento final a temperatura de pasteurização usando água quente ou vapor.
- manutenção da temperatura de pasteurizado por um tempo fixo para atingir o efeito microbiológico desejado.
- resfriamento do produto usando água/ solução refrigerante.

Além desses estágios mencionados acima, outros podem ser incorporados dependendo das necessidades do processo, como por exemplo, homogeneização, separação e desaeração.

Devido ao cada vez maior interesse do consumidor em produtos minimamente processados, ou seja, com qualidade físico-química e microbiológica assegurada pelo processo térmico com máxima retenção de seu valor nutricional, novos parâmetros de temperatura-tempo para melhorar processos contínuos de pasteurização ou esterilização precisam ser definidos.

A escolha do suco de laranja como o primeiro alimento a ser estudado nesta linha de pesquisa reside no fato de ser ele um produto largamente consumido tanto no mercado nacional como no internacional, sendo que o Brasil se destaca como um dos maiores produtores de laranja do mundo, com destaque para o estado de São Paulo, responsável pela maior parte da produção do país. No início da década de 90, a produção de laranja no país beirava cem bilhões de frutos ao ano (BRASIL, 1994). Atualmente o Brasil é o maior produtor mundial de suco de laranja, sendo este um de seus principais produtos de exportação. Apenas no Estado de São Paulo existem 11 indústrias processadoras de suco, que são responsáveis pela geração de 8000 empregos diretos e 420 mil empregos no campo. A título de ilustração, a cada dez copos de suco que se tomam no mundo, exceto os EUA, oito são brasileiros (OLIVEIRA, 1999).

Combinação perfeita entre sabor e saúde, o suco de laranja possui vitaminas e nutrientes suficientes para ser considerado um alimento saudável pelo FDA (Food and Drug Administration - EUA), além de possuir quantidade de gordura, colesterol e sódio dentro dos padrões estabelecidos para ser considerado como tal. Seus principais nutrientes são: Vitaminas C e B, potássio, fibra e ferro.(ONJUS,1998).

Como no caso da maioria dos produtos alimentícios, o consumidor também busca um suco de laranja com o mínimo de processamento e “pronto para beber”. Dessa forma, o suco de laranja concentrado vem perdendo mercado para o suco de laranja fresco, uma vez que o primeiro apresenta perda na qualidade organoléptica do produto, no entanto, o suco de laranja fresco apresenta uma vida de prateleira muito limitada. Estudos brasileiros mostraram que grande parte do suco de laranja natural comercializado, está em desacordo com os padrões estabelecidos pela legislação vigente do país, quanto aos aspectos microbiológicos (ARRUDA & CARDONHA, 1998; IHA et al,1998; TOCCHINI, 1993). Os dados sugerem a necessidade do processamento do suco de laranja natural, de forma a aumentar a sua vida de prateleira e garantir a saúde do consumidor, mas mantendo suas características organolépticas mais próximas as do produto natural “fresco”, seguindo uma grande tendência de preferência do consumidor, em especial o brasileiro, a quem o suco de laranja natural é muito acessível (ALVES & GARCIA,1993; FOX, 1994; CORRÊA NETO & FARIA, 1999). Dessa forma, a pasteurização do suco apresenta-se como uma opção

intermediária, que pode garantir tanto a qualidade físico-química bem como a microbiológica do produto, garantindo a vida de prateleira, desde que procedida corretamente (NICKDEL, 1993).

A pasteurização, é uma opção de tratamento que elimina as formas vegetativas dos microrganismos causadores de doenças e deterioradores, e inativa enzimas presentes no suco. Este processo combinado com uma embalagem e temperatura de armazenamento adequadas torna possível a obtenção de um produto “minimamente processado”. A inativação da enzima pectinesterase no processamento térmico do suco de laranja natural é muito importante. A princípio esta enzima é responsável por grande perda de qualidade do suco não processado, devido sua atuação como catalisadora na hidrólise de grupos metoxi, presentes na pectina, a grupos carboxilas livres, causando perda de turbidez, gelatinização e sedimentação do produto. No entanto sua maior importância está associada ao estabelecimento dos parâmetros de tempo-temperatura de pasteurização, uma vez que possui resistência térmica superior a de bactérias e fungos presentes no suco, ou seja, sua inativação é a garantia de que toda forma vegetativa de microrganismos foi destruída devido ao tratamento térmico (FELLERS & CARTER, 1993).

Estudos indicam que a resistência térmica de bactérias e fungos de ocorrência comum em sucos cítricos é menor do que a resistência térmica da pectinesterase (MURDOCK, 1952; PATRICK & HILL, 1957, 1959; apud EARGEMAN & ROUSE, 1976). A condição de tratamento típico é de 91°C por 10-60s (NICKDEL, 1993; VEERSTEG, 1980), porém FELLERS & CARTER (1993) observaram que 91°C por 1s é suficiente para reduzir adequadamente tanto a atividade enzimática quanto a microbiana durante um período típico de armazenamento.

OBJETIVOS

- Estudar a transferência de calor em alimentos líquidos utilizando um trocador de calor tipo placas com monitoramento das temperaturas do processo através de um sistema de aquisição de dados “on line” computadorizado. O estudo abrange o processo contínuo de pasteurização de suco de laranja natural, sob diferentes condições de temperatura, taxas de fluxo e tempos de retenção.
- Estudar a cinética da inativação da enzima pectinesterase na pasteurização de suco de laranja natural, e correlacioná-la com outros atributos de qualidade do suco para estabelecer a melhor condição de temperatura de pasteurização e tempo de retenção visando um processamento mínimo deste produto.
- Correlacionar o coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja natural no canal da placa, em função da velocidade média e das características reológicas do suco.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1 Trocador de calor tipo placas

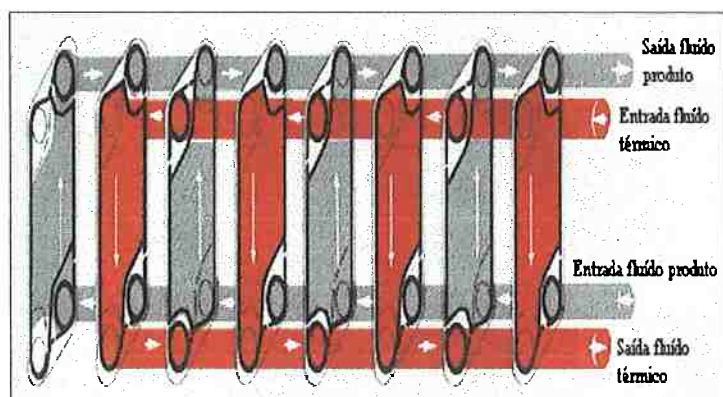
Por décadas, os processos de transferência de calor foram realizados nos familiares trocadores de calor Casco e Tubo (Shell and Tube em inglês). Entretanto, atualmente é cada vez maior o número de operações de troca térmica que são realizados nos trocadores de calor à placas. Introduzido por volta de 1930, principalmente na indústria alimentícia, atingiu a popularidade após 1960, devido ao desenvolvimento de geometria de placas mais efetiva e materiais alternativos das gaxetas, o que ampliaram suas aplicações (KAKAÇ & LIU, 1998).

Os trocadores de calor à placas são em princípio aplicados a transferência de calor entre líquidos. Mas eles já estão sendo utilizados em processos que utilizam a evaporação e a condensação, nas quais o tamanho compacto do equipamento e a necessidade de pouco material para a construção das placas oferecem vantagens sobre outros tipos de equipamentos de transferência de calor. Para reações que ocorram a pressões superiores a 20 atmosferas e temperaturas acima de 150°C e que além disso envolvam a utilização de fluidos altamente tóxicos, os trocadores conhecidos como casco e tubo permanecem como sendo a melhor escolha. Entretanto, para a maior parte dos processos químicos, os trocadores de calor à placas superam os anteriores em preço e tamanho (HASTING, 1992; SCHLÜNDER, 1983; VINÇONNEAU & CREVEL, 1976).

O desenvolvimento comercial dos trocadores de calor à placas foi estimulado por dois objetivos básicos de processo: altas taxas de transferência de calor com uma baixa diferença de temperatura e facilidade de limpeza com total acesso a ambas as faces das superfícies de transferência de calor.

Um típico trocador de calor tipo placas compreende um conjunto de placas corrugadas agrupadas mantidas dentro de um pedestal. Elas possuem juntas de borracha com o objetivo de completa vedação e prevenção da mistura das correntes líquidas, ou seja, eventual contaminação do fluido servido ao alimento, como mostra a Figura 2.1). A corrugação das placas induz ao fluxo turbulento, mesmo a baixas vazões e promove

rigidez mecânica a placa (HASTING, 1992; SCHLÜNDER, 1983; VINÇONNEAU & CREVEL, 1976).



Fonte: APV

FIGURA 2.1: Desenho esquemático do arranjo de placas ilustrando a função das gaxetas que não permitem a mistura das duas correntes de líquido.

Dependendo do modelo e função, o trocador pode ter três seções:

- **Aquecimento:** mediante entrada de um fluido térmico, o fluido produto ao entrar nesta seção será aquecido até a temperatura desejada. Como exemplo para esta situação tem-se a pasteurização do suco de laranja (fluido produto), que será aquecido pela água quente.

- **Regeneração:** Nesta seção o fluido produto será pré-aquecido mediante o retorno do fluido produto da seção de aquecimento. Com isso tem-se um melhor aproveitamento do calor trocado no equipamento e conseqüentemente uma maior eficiência e economia de energia térmica.

- **Resfriamento:** Mediante água gelada, onde no caso do suco de laranja, antes da sua retirada do trocador é necessário que sua temperatura seja abaixada, para a sua conservação.

Dentre as vantagens na utilização dos trocadores de calor tipo placas, destacam-se (HASTING, 1992; SCHLÜNDER, 1983; VINÇONNEAU & CREVEL, 1976):

- **Alta transferência de calor:** Coeficientes de película de três a cinco vezes maiores, além de baixa resistência térmica das placas (devido a pequena espessura das placas), permitem obter altas taxas de transferência de calor quando comparados a outros modelos de trocadores de calor.

- **Compacto:** Este tipo de trocador pode ser instalado em um espaço correspondente de um quarto a um décimo do espaço ocupado por outro tipo de trocador.

- **Facilidade de limpeza:** A limpeza de toda a área de troca térmica é feita com facilidade, já que o equipamento pode ser desmontado e suas placas podem ser limpas. Caso seja necessário soluções podem ser usadas para efetuar essa limpeza.

- **Flexibilidade:** Ao contrário de outros equipamentos, os trocadores de calor permitem mudanças em seus arranjos, visando assim uma otimização do processo. Isto dificilmente pode ocorrer em trocadores Casco e Tubo por exemplo, nos quais uma vez determinado o número de tubos e o comprimento do casco, somente são possíveis algumas pequenas mudanças em sua configuração, que muitas vezes não são suficientes para melhorar o processo.

- **Economia:** A alta capacidade de transferência de calor reduz a necessidade de área de troca térmica, diminuindo assim o custo inicial do equipamento, isto sem mencionar a economia com espaço e manutenção.

Atualmente tratamentos térmicos de alimentos líquidos são realizados em trocadores de calor tipo placas, sendo o processo de pasteurização um dos mais empregados com vista à destruição térmica de microorganismos patogênicos e deterioradores. Contudo, tem-se observado um maior interesse do consumidor em produtos minimamente processados, ou seja, produtos não somente com características microbiológicas assegurada pelo processo térmico, como também na sua qualidade físico-química e seu valor nutricional. Dessa forma, novos parâmetros de temperatura-tempo precisam ser definidos para melhorar os processos de pasteurização.

Os parâmetros mais importantes para o projeto térmico de um trocador de calor tipo placas são: capacidade de fluxo e faixa de NTU (Number of Transfer Units), definido como a razão entre a mudança de temperatura de um fluido e a diferença de temperatura média logarítmica (LMTD).

O projeto de trocadores de calor tipo placas é altamente especializado, considerando a variedade de arranjos disponíveis para as placas. Diferente do trocador “shell and tube”, cujos dados de projeto e métodos são facilmente disponíveis, o projeto do trocador de calor tipo placas continua sendo proprietário por natureza. Os fabricantes desenvolveram seus próprios projetos computadorizados aplicáveis aos trocadores de sua manufatura. Nenhuma publicação está disponível a respeito de um projeto rigoroso para este tipo de trocador (KAKAÇ & LIU, 1998).

Trocadores de calor tipo placas foram detalhadamente descritos por MCKILLOP & DUNKLEY, 1960; BUONOPANE et al, 1963, JACKSON & TROUBE, 1964; USHER, 1970; MARRIOT, 1971; SCHLÜNDER, 1983; BASSIOUNY & MARTIN, 1985 e KAKAÇ & LIU, 1998. MCKILLOP & DUNKLEY, 1960; BUONOPANE et al, 1963 e BASSIOUNY & MARTIN, 1985 apresentaram excelentes estudos sobre correlações da transferência de calor em trocador de calor tipo placas usando água. KIM et al, 1999b, correlacionaram o coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja em função da viscosidade e da velocidade do canal em um trocador de calor durante experimentos de pasteurização do suco em escala planta-piloto.

2.2 Principais fatores de deterioração em suco de laranja

Segundo CORRÊA NETO & FARIA,1999, a qualidade do suco é influenciada basicamente por fatores microbiológicos, enzimáticos, químicos e físicos, que comprometem suas características organolépticas e nutricionais .

O suco de laranja é considerado um alimento ácido, e portanto sua deterioração de natureza microbiológica está associada a proliferação de bactérias lácticas, leveduras e fungos que lhe conferem sabor e odor indesejáveis. (HATCHER et al, 1992; KIMBALL,1991).

Dentre as bactérias, as do gêneros *Lactobacillus* e *Leuconostoc* são as que mais afetam a qualidade do suco, já que são responsáveis pela produção de substâncias, como ácido láctico, etanol, dióxido de carbono e diacetil, este último conferindo um sabor amanteigado e odor indesejável ao suco. Suas condições ótimas de crescimento são

temperatura entre 30 e 40°C e pH entre 5.5 e 5.8 e temperatura entre 20 e 30°C e pH entre 5.5 e 6.5 respectivamente (HATCHER et al, 1992; KIMBALL,1991).

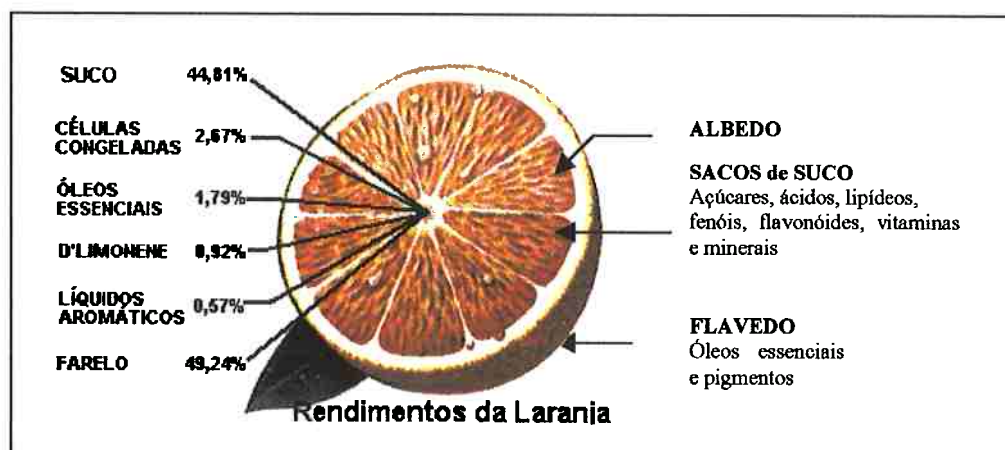
Para as leveduras a temperatura ótima de crescimento está entre 20 e 30°C e geralmente são mais resistentes ao calor do que bactérias e bolores. As leveduras mais comuns em sucos cítricos pasteurizados são as das espécies *Saccharomyces Cerevisiae*, *Rhodoturula* e *Zygosaccharomyces* (KIMBALL,1991).

Os bolores, por sua vez, não apresentam muitas exigências em relação a nutrientes, atividade de água, temperatura e acidez para seu crescimento, podendo se proliferar em temperaturas de até 60°C e pH próximos de zero. Os mais comuns encontrados em suco de laranja pasteurizado são *Aureobasidium pullulans* e *Penicilium*, espécies estas que não causam danos consideráveis ao produto e nem ao consumidor. Existem, porém, alguns fungos termoresistentes , como os do gênero *Byssochlamys*, que podem vir a deteriorar o produto (KIMBALL,1991; CORRÊA NETO & FARIA, 1999), mas que, segundo GRAUMLICH et al, 1986, não devem crescer em embalagens que contenham baixo nível de oxigênio.

A presença da enzima pectinesterase (PE) (ou metil esterase) em sucos cítricos é causa de um dos maiores problemas estudados em tecnologia de alimentos (CHAMARRO et al,1991).

A princípio é importante conhecermos as partes que compõe a laranja, que são basicamente: flavedo, a parte externa colorida da casca, albedo, a porção branca esponjosa da laranja, sementes e pequenos sacos, formados por membranas onde se localiza o suco. A Figura 2.2 mostra um corte de laranja, sua composição e produtos que podem ser obtidos a partir da fruta.

ROUSE 1953, estudou a concentração de pectina e a atividade da enzima pectinesterase nas diferentes partes da laranja. Segundo este autor, os componentes que apresentam maior atividade de PE em base seca e ordem decrescente são: sacos de suco, membranas, flavedo, albedo, sementes e suco centrifugado. A pectina por sua vez, localiza-se principalmente nas membranas e flavedo. Os sacos de suco e resíduos de membranas são os principais componentes da polpa, e portanto é onde aparece a maior atividade da pectinesterase e também a maior concentração de pectina.



Fonte: Abecitrus

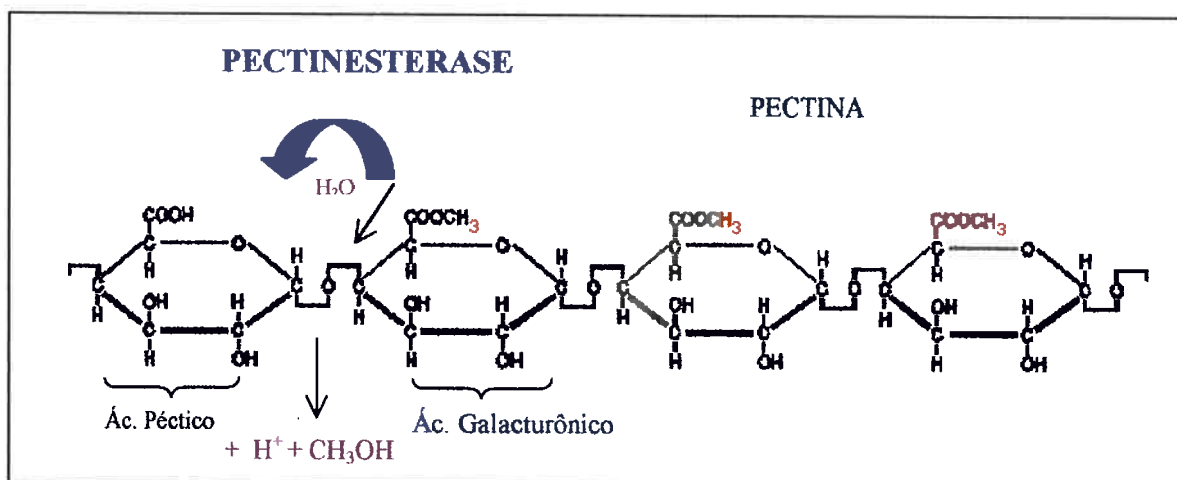
FIGURA 2.2: Corte da laranja. Composição da fruta e principais produtos que podem ser obtidos a partir dela.

ROUSE 1953, estudou a concentração de pectina e a atividade da enzima pectinesterase nas diferentes partes da laranja. Segundo este autor, os componentes que apresentam maior atividade de PE em base seca e ordem decrescente são: sacos de suco, membranas, flavedo, albedo, sementes e suco centrifugado. A pectina por sua vez, localiza-se principalmente nas membranas e flavedo. Os sacos de suco e resíduos de membranas são os principais componentes da polpa, e portanto é onde aparece a maior atividade da pectinesterase e também a maior concentração de pectina.

A pectina é uma molécula formada pela cadeia de ácidos galacturônicos, funciona como um emulsificante, ajudando a manter a suspensão do suco e desta forma proporciona sua turbidez (BABYLON, 1998).

Na extração do suco de laranja, ocorre o rompimento das membranas da casca e vesículas (ou sacos de suco), fazendo com que a pectinesterase entre em contato com o suco, que contém o substrato pectina e sua atuação é hidrolisar as ligações éster-metílicas da molécula de pectina, formando ácido péctico e metanol (BABYLON, 1998; CHAMARRO et al, 1991; CORRÊA NETO & FARIA, 1999).

A Figura 2.3 ilustra uma molécula de pectina com três resíduos metil-ésterificados (em vermelho) e um que já sofreu a ação da enzima pectinesterase.



Fonte: Babylon

FIGURA 2.3: Desenho esquemático ilustrando a função da enzima pectinesterase sobre a pectina presente no suco de laranja.

Conforme TOCCHINI et al. 1995 apud CORRÊA NETO & FARIA 1999, a pectinesterase agindo sobre as substâncias pécnicas do suco de laranja forma complexos insolúveis, que se precipitam em virtude da acidez e presença de cátions. Se o conteúdo original de pectina for relativamente baixo, os ácidos pécnicos precipitam arrastando outras matérias coloidais suspensas, responsáveis pela turbidez do suco, caso contrário, se o conteúdo de pectina original for elevado, haverá a formação de um gel semi-rígido

De acordo com VERSTEEG et al, 1980, existe múltiplas formas de pectinesterase, e estas isoenzimas apresentam diferenças como por exemplo: em relação a atividade a baixos valores de pH e afinidade ao substrato de pectina. Estas diferenças sugerem que cada enzima pode desempenhar um diferente papel no fenômeno de perda de turbidez.

Para se ter uma idéia da complexidade do aroma do suco de laranja, ele é composto de 217 substâncias voláteis: diferente álcoois, aldeídos, ésteres, ácidos e cetonas. Frequentemente ocorrem reações entre estas substâncias, que podem originar produtos responsáveis por alterações de aroma e sabor, principalmente naqueles armazenados sob altas temperaturas (ALBEROLA & IZQUIERDO, 1978).

De uma forma geral o sabor indesejável do suco de laranja pode ser não só proveniente da formação de produtos, como também da variação quantitativa de seus componentes. O sabor de vinagre e amanteigado podem ocorrer devido ao crescimento de bactérias, como citado anteriormente.

2.3 Parâmetros de tempo - temperatura definidos para pasteurização

A princípio é importante lembrar que a legislação vigente no Brasil não estabelece limites microbiológicos para suco de laranja pasteurizado, apenas para o suco natural fresco e que o nível de tratamento térmico do suco de laranja é estabelecido utilizando a pectinesterase como parâmetro, já que esta é mais termoresistente que os microrganismos.

Segundo estudo realizado por ROUSE & ATKINS 1952, a enzima pectinesterase foi totalmente inativada quando o suco da laranja da espécie "Pineapple", com 5% de polpa, e pH 4.1, foi submetido a tratamentos de 96°C por 3 segundos ou 93.5°C por 5 segundos ou 90.5°C por 15 segundos ou 88°C por 120 segundos. Para sucos com 10% de polpa, e pH = 4.1, submetidos as mesmas temperaturas, foram encontrados tempos de retenção de 10, 30, 60 e 120 segundos respectivamente para a inativação completa da enzima. Para a temperatura de 85°C e tempo de retenção de 120 segundos, 98.5% da enzima foi inativada, no suco com 5% de polpa e 97.6% no suco com 10% de polpa. Para inativação completa da atividade da pectinesterase em suco de laranja da espécie "Hamlin", os autores sugerem aquecimento de 48 segundos e temperatura variando de acordo com o pH do suco: 93.5°C para pH 3.2, 99°C para pH 3.8 a 4.2. Para o mesmo tempo de retenção, total inativação é conseguida para suco da espécie "Pineapple" pH 3.2 a 3.8 a temperatura de 96°C e pH 4.2 a temperatura de 99°C.

De acordo com ROTHSCHILD et al. 1975, 100% de inativação da enzima implica em uma atividade de pectinesterase residual menor do que 1×10^{-4} PEU por grama de amostra, que pode ser obtida com um tratamento à temperatura de 85°C por 45 segundos.

EAGERMAN & ROUSE, 1976, notaram que tratamento com tempo de retenção de 1 minuto à temperatura entre 87.5 e 90°C (de acordo com a variedade da laranja) foram suficientes para reduzir a atividade enzimática em dois ciclos logarítmicos e obter uma atividade de pectinesterase da ordem de 10^{-4} PEU/°Brix ou, como eles sugeriram, atingir a estabilidade comercial.

VERSTEEG et al 1980, estudaram a inativação das diferentes formas de pectinesterase e determinaram um tratamento térmico de 90°C por 48 segundos, para o suco de laranja, afim de obter 99% de inativação da pectinesterase de molécula de maior peso molecular e maior estabilidade térmica.

WICKER & TEMELLI 1988, obtiveram uma redução de 96% na atividade de pectinesterase em polpa de suco de laranja, quando submetida à 80°C por 19 segundos, e segundo eles, as condições utilizadas industrialmente são 101°C e 33 segundos.

Para FELLERS & CARTER 1993, um processamento sob temperatura de 82°C por 2 segundos resultou em 90% de redução na atividade da pectinesterase. Os autores sugeriram a temperatura de 91°C por um segundo como tratamento térmico mínimo que garanta a redução de microrganismos a nível de esterilização comercial e reduza 97% da atividade da pectinesterase.

Segundo KIM et al. 1999a, a atividade pectinesterase foi 90% reduzida quando o suco foi submetido a uma temperatura de 80°C por 33,27 segundos, ou 85°C por 26,08 segundos, ou ainda à uma temperatura de 90°C por 17,85 segundos, o que não representa inativação total da enzima, mas garante danos mínimos às propriedades organolépticas. Este tratamento térmico mínimo causa perda parcial de turbidez, que é um fato que vem sendo atualmente aceito pelo consumidor. Apesar do crescente interesse pelo produto minimamente processado, este tema ainda é bastante recente e a maioria dos trabalhos publicados com referência à análise microbiológica versa sobre sucos concentrados, sucos reconstituídos de concentrados ou sucos não-processados (ARRUDA & CARDONHA, 1998; FELLERS, 1988; FURLANETTO et al., 1982; IHA et al., 1998; NASCIMENTO & FURLANETTO, 1981; TOCCHINI et al., 1993).

Neste trabalho, estudo da transferência de calor durante a pasteurização do suco de laranja natural foi realizado, visando obter um produto minimamente processado. Estudo da cinética da inativação enzimática da pectinesterase foi conduzido, de forma a obter os parâmetros temperatura de pasteurização – tempo de retenção mais adequados ao tratamento térmico mínimo. Correlações foram obtidas entre o coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja no canal da placa com as características físico-químicas do suco.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Matéria-prima

As laranjas da variedade pêra (*Citrus sinensis* (L) Osbeck) foram adquiridas no CEAGESP no período entre outubro de 1998 a janeiro de 2000.

3.2 Equipamentos

3.2.1 Trocador de calor tipo placas:

Pasteurizador de laboratório, marca ARMFIELD, modelo FT43A fornecido com os seguintes componentes e acessórios:

Unidade processadora de pasteurização

Console de controle

Embalagem contendo placas e juntas sobressalentes

Tanque de alimentação de 4 litros

Bandeja de polietileno

Dois tubos de retenção

Registrador controlador de temperatura

Circulador de água gelada

“Data logger” procedência ARMFIELD, modelo FT43A-90IFD

Transformadores 10 A

A Unidade Processadora de Pasteurização possui as seguintes especificações básicas:

- ✓ Vazão do processo: variável desde 0 a 30 litros/hora.
- ✓ Tubos de retenção: 15 s a 20 L/h e 45 s a 20 L/h
- ✓ Temperatura: qualquer temperatura entre a ambiente e 90°C
- ✓ Limite de viscosidade: 2,0 mPa.s
- ✓ Bomba de alimentação: peristáltica, velocidade variável, construção higiênica

- ✓ Sistema de aquecimento: bomba centrífuga de circulação de água quente aquecida por uma resistência elétrica 1.5 kW imersa em um tanque de água. A vazão de água quente é variável até 1.2 L/min usando a válvula de agulha do rotâmetro.
- ✓ Válvula de desvio: de aço inoxidável, do tipo três vias solenóide
- ✓ Controlador de temperatura: microprocessador com ação P+I+D para o aquecedor de água, faixa de 0 a 100 °C.
- ✓ Sensores de temperatura: seis sensores semi-condutores, providos de poço de aço inoxidável para uso em nove possíveis pontos de medição.
- ✓ Tanque de alimentação: de vidro de 4 litros de capacidade.

A Figura 3.1 mostra o diagrama esquemático da utilização do trocador de calor como pasteurizador com o monitoramento da temperatura on-line:

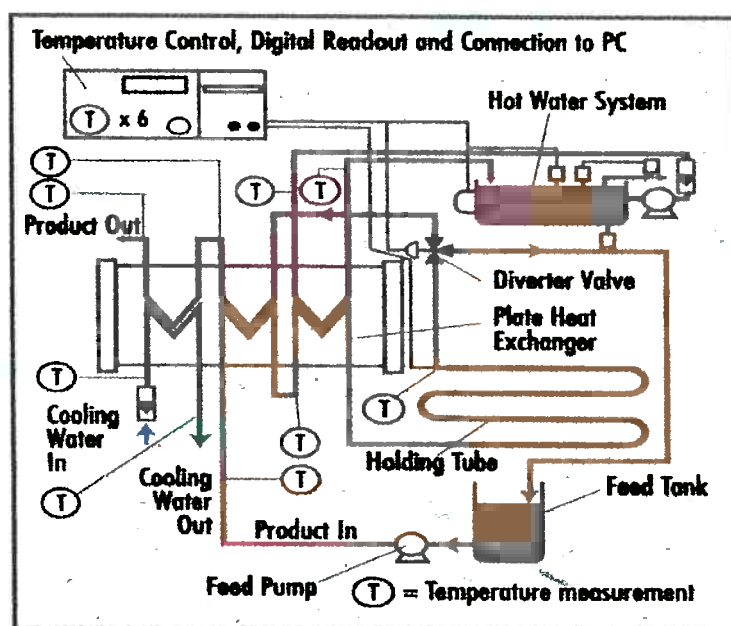


FIGURA 3.1: Desenho esquemático do trocador de calor ARMFIELD FT-43A, sendo utilizado como pasteurizador, com indicação dos pontos de medição da temperatura e sistema de controle.

As seções de aquecimento, resfriamento e regeneração aparecem na forma de trocadores de placas e são incorporados em um único pedestal, como mostram as Figuras 3.2 e 3.3 a seguir.

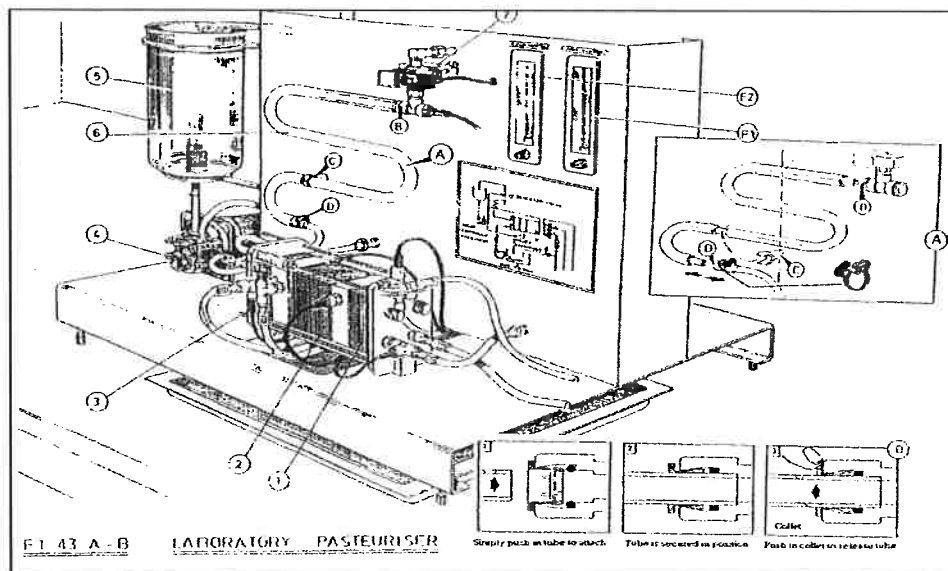


FIGURA 3.2: Desenho ilustrando a montagem do trocador de calor ARMFIELD FT 43-A, no processo de pasteurização com instalação do tubo de retenção de 15 segundos.

As Figuras 3.2 e 3.3 mostram a unidade dotada do tubo de retenção de 15 segundos e 45 segundos respectivamente. Estes tempos são estimados para uma vazão de produto de 20 litros/hora (aproximadamente a marca 8 na variável *speed dial*) Variando a vazão, este tempo de retenção pode ser modificado como requerido. Para tempo de retenção de 15 segundos o tubo com volume de $75,8 \text{ cm}^3$ deve ser utilizado, enquanto que para tempo de retenção de 45 segundos, o tubo com volume de $240,0 \text{ cm}^3$ deve ser instalado.

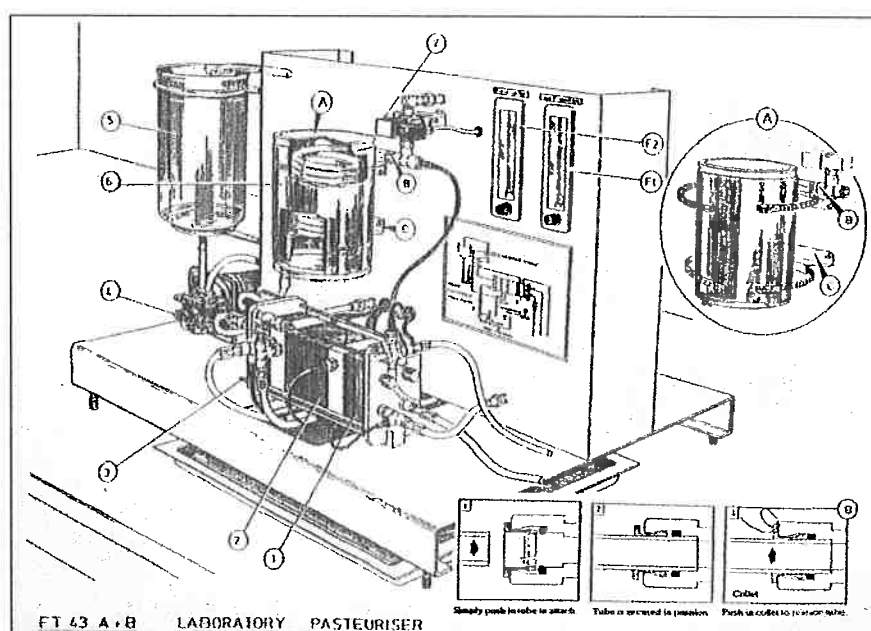


FIGURA 3.3: Desenho ilustrando a montagem do trocador de calor ARMFIELD FT 43-A, no processo de pasteurização com instalação do tubo de retenção de 45 segundos.

O Sistema de Circulação de Água Quente é composto pelos seguintes componentes (ver Figura 3.4):

- ✓ Tanque de água quente (12)
- ✓ Elemento de aquecimento (9)
- ✓ Termostato (14)
- ✓ Sensores de nível (alto e baixo) (13)
- ✓ Válvula solenóide (16)
- ✓ Bomba de circulação (15)

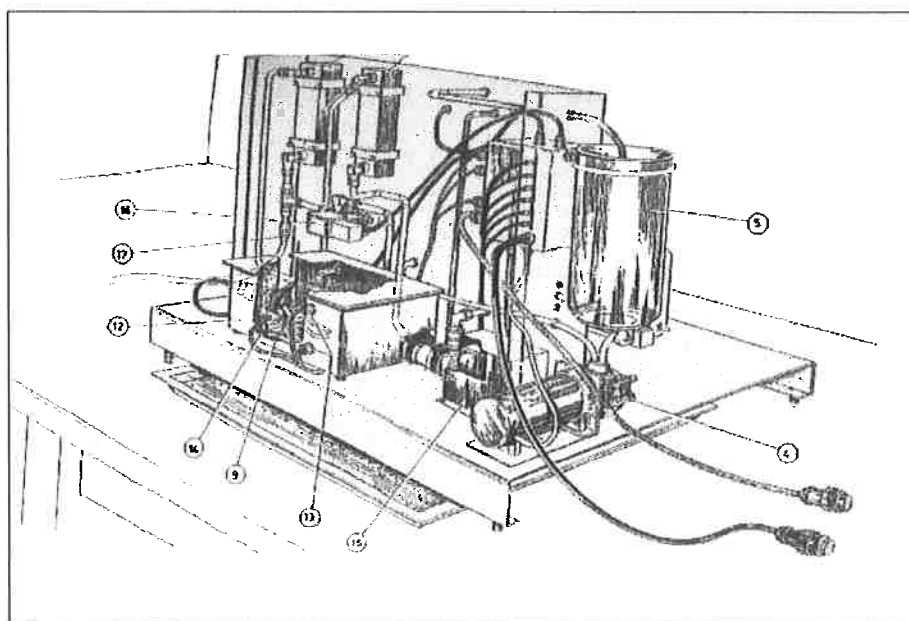


FIGURA 3.4: Desenho ilustrando o sistema de circulação de água quente do trocador de calor ARMFIELD FT 43-A.

Os sensores de nível do tanque são utilizados com a intenção de proteger o elemento de aquecimento. Se por alguma razão o nível cair a um nível inferior ao do marcador, o elemento de aquecimento se desliga e não voltará a funcionar até que o nível seja recuperado com a adição de água. Este sistema é capaz de aquecer água a uma temperatura superior a 95°C. A bomba de circulação é do tipo centrífuga acoplada magneticamente de modo que quando o circuito de aquecimento está em operação, a bomba opera continuamente e a vazão requerida é controlada pela válvula tipo agulha do medidor de vazão (F2) (ver Figura 3.2 ou 3.3).

O Console de Controle apresenta as seguintes características (ver Figura 3.5):

- ✓ Leitura digital de temperatura (11): apresenta uma das seis temperaturas medidas, pré-selecionada pelo seletor, localizado logo abaixo deste.

- ✓ Controlador de temperatura (10): indica e controla continuamente a temperatura de pasteurização pré estabelecida pelo processo através da variável *PV setting* (variável de processo).

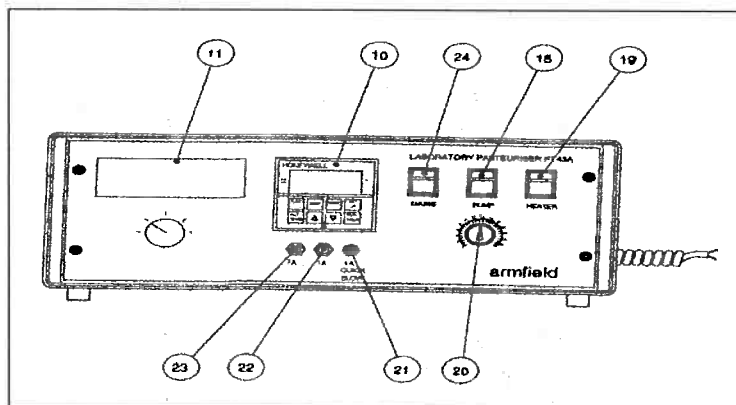


FIGURA 3.5: Desenho ilustrando o console de controle do trocador de calor ARMFIELD FT43-A.

A temperatura de pasteurização é controlada pelo elemento de aquecimento . O controlador é pré programado pelo fabricante para dar uma ação de controle correta. Esta unidade também controla a válvula de três vias, que desvia o fluido sub-processado (que não atinge a temperatura requerida para a pasteurização) de volta para o tanque de alimentação. O *set point* para esta operação é chamado de alarme (AL).

Os interruptores (24), (18) e (19) acionam respectivamente suprimento de energia ao equipamento, a bomba peristáltica e o circuito de aquecimento. A vazão da bomba de alimentação é ajustada através do dial graduado *speed drive* (20).

O console de controle é provido de fusíveis (21) e (22) e (23) para proteção do controlador de temperatura, bomba de alimentação e circuito de aquecimento, respectivamente.

A Unidade de Circulação de Água Gelada é composta por um reservatório, bomba de circulação de água e de um trocador de calor, onde a água é resfriada mediante líquido refrigerante Freon.

A saída de água da unidade de resfriamento a temperatura desejada para o processo é conectada por uma mangueira e grampos adequados, à entrada do módulo do processo (17) (ver Figura 3.4). A água fria, que retorna da seção de resfriamento do trocador de calor é conectada à entrada do refrigerador, constituindo assim um sistema fechado. O reservatório deve ser suprido com água potável.

- 3.2.2 Máquina extratora de suco, marca FMC FRESH, com capacidade de processo de 20 frutas por minuto.
- 3.2.3 pH Stat, marca RADIOMETER, modelo PHM - 290
- 3.2.4 Reômetro marca BROOKFIELD, modelo RDV III, programável e aquisição através do programa RHEOCALC v. 1.1.
- 3.2.5 Refratômetro, marca CARLZEISSJENA, modelo I, precisão 0,1°Brix.
- 3.2.6 Estufa, marca FABBE, modelo 119, 110V, 1200W.
- 3.2.7 Estufa a vácuo, marca WC HERAEUS GMBH HANAU, modelo RVL 500, 220V.
- 3.2.8 Bomba a vácuo, marca GENERAL ELETRIC, modelo 5KC42JGIEX, motor A.C., 1725 rpm, 115/230 V.
- 3.2.9 Centrífuga, marca TOMINAGA, modelo TD - 65
- 3.2.10 Refrigerador doméstico.
- 3.2.11 Balança digital, marca MICRONAL, modelo B-6000, precisão 0,1g, 110V, 60 Hz.
- 3.2.12 Balança analítica, marca CHYO, modelo JK 200, precisão 0,0001g, 220V, 60 Hz.

3.2.12 Recravadeira elétrica, marca WISCONSIN ALUMINUM FOUNDRY CO., INC., modelo EI-12253.

3.2.13. Vidraria comum de laboratório.

3.3. Reagentes

3.3.1 Solução de hidróxido de sódio 0,1 N.

3.3.2 Solução de hidróxido de sódio 0,01 N

3.3.3 Solução de hidróxido de sódio 0,001 N

3.3.4 Pectina Cítrica, procedência SIGMA, P-9436 com grau de metoxilação de 67%

3.3.5. Solução tampão pH $7,00 \pm 0,01$, procedência MERCK.

3.3.6. Solução tampão pH $4,00 \pm 0,01$, procedência MERCK.

3.3.7. Solução tampão pH $10,00 \pm 0,01$, procedência MERCK.

3.3.8 Cloreto de cálcio anidro para dessecador.

3.4 Parte Experimental

3.4.1 Calibração dos Sensores de Temperatura e da Bomba de Alimentação

Para obter as curvas de calibração dos termopares, regressão linear de três medidas de cada termopar, foi ajustada aos pontos experimentais conforme ilustra a Figura 3.6.

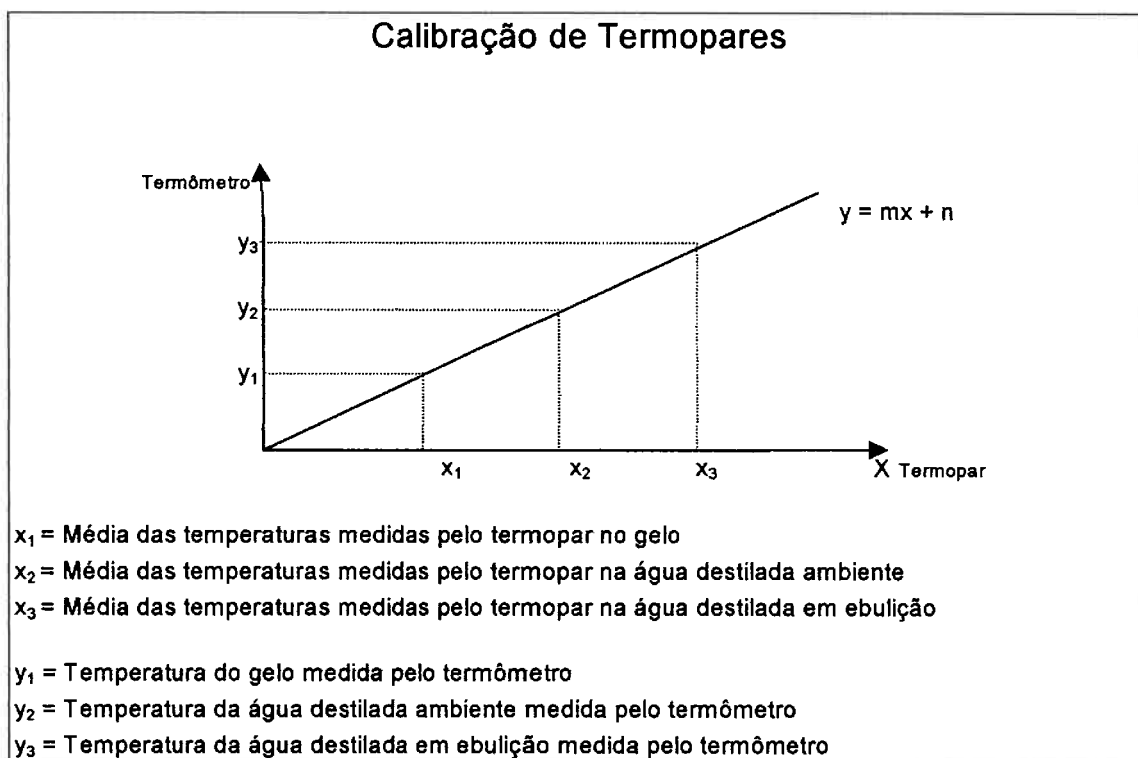


FIGURA 3.6: Gráfico da reta obtida da regressão linear referente a medida do termopar, obtida a partir dos pontos experimentais de três condições distintas: fusão do gelo, ambiente e ebulição da água.

Para levantar as curvas de calibração foram considerados três pontos de referência correspondentes a temperatura de ebulição da água, a temperatura de fusão do gelo e a temperatura ambiente da água, utilizando sempre água destilada. A aquisição das temperaturas foi realizada normalmente, considerando inicialmente como hipóteses para a correção $m = 1$ e $n = 0$, isto é, as temperaturas adquiridas sem correção. Para cada ponto de

referência da curva de cada termopar a aquisição dos dados foi conduzida por dez minutos com uma frequência de aquisição de 1 dado a cada 10 segundos (0,1 Hz).

Durante cada ensaio, ao mesmo tempo as temperaturas foram adquiridas através de termômetros calibrados providos de Certificado de Calibração pela Norma ASTM 63C (- 8°C a + 32°C, menor divisão 0,1 °C) e pela Norma ASTM 94C (+ 80°C a + 110°C, menor divisão 0,1 °C).

Para obter a curva de calibração da bomba de alimentação foi realizado o procedimento indicado no manual do trocador, descrito a seguir: o tubo de saída da bomba de alimentação é conectado na entrada da seção de regeneração do trocador por um clipe. Este clipe foi aberto desconectando o tubo. Quatro litros de água destilada foram colocados no tanque de alimentação. Com o speed dial na posição 0, os interruptores principal e bomba foram ligados, enquanto que o interruptor do sistema de aquecimento permaneceu desligado. Na saída do tubo de alimentação foi colocada uma proveta graduada, para que fosse possível determinar a massa correspondente ao volume coletado referente a um tempo cronometrado. As medidas foram realizadas com o speed dial nas posições 2, 4, 6,20 e 22. As medidas foram realizadas em tréplica.

3.4.2 Desempenho térmico do trocador

A metodologia consiste basicamente em determinar experimentalmente um número estatisticamente considerável de parâmetros de troca térmica correlacionados com o escoamento através do canal formado pela corrente do fluido que passa entre duas placas de modo a possibilitar a obtenção de uma correlação que modele nos aspectos matemáticos e físicos o processo de troca térmica do trocador de calor de placas. A partir desta correlação o coeficiente global de troca térmica do trocador de calor pode ser determinado.

O fluido produto utilizado para este estudo foi água destilada com os fluidos de serviço água como fluido aquecedor e também água como fluido resfriador.

Como foi mencionado anteriormente, foram obtidos diversos valores dos parâmetros de troca térmica para diferentes vazões de alimentação de fluido produto (água destilada) e para diferentes tipos de arranjos (diferentes números de passos e passagens). As

vazões utilizadas variaram de 05 a 09 na escala do speed dial da bomba, ou seja, entre 5 e 25 kg/h. Os arranjos de placas utilizados (sempre simétricos, ou seja, o arranjo do fluido térmico é igual ao arranjo do fluido produto) foram 2 de 1 a 6 de 1 e também 1 de 2 a 1 de 4, em que o primeiro índice denota o número de passes do fluido pelo trocador e o segundo índice significa o número de passagens pelo trocador. A Figura 3.7 ilustra um exemplo de arranjo simétrico utilizado nesta etapa da parte experimental.

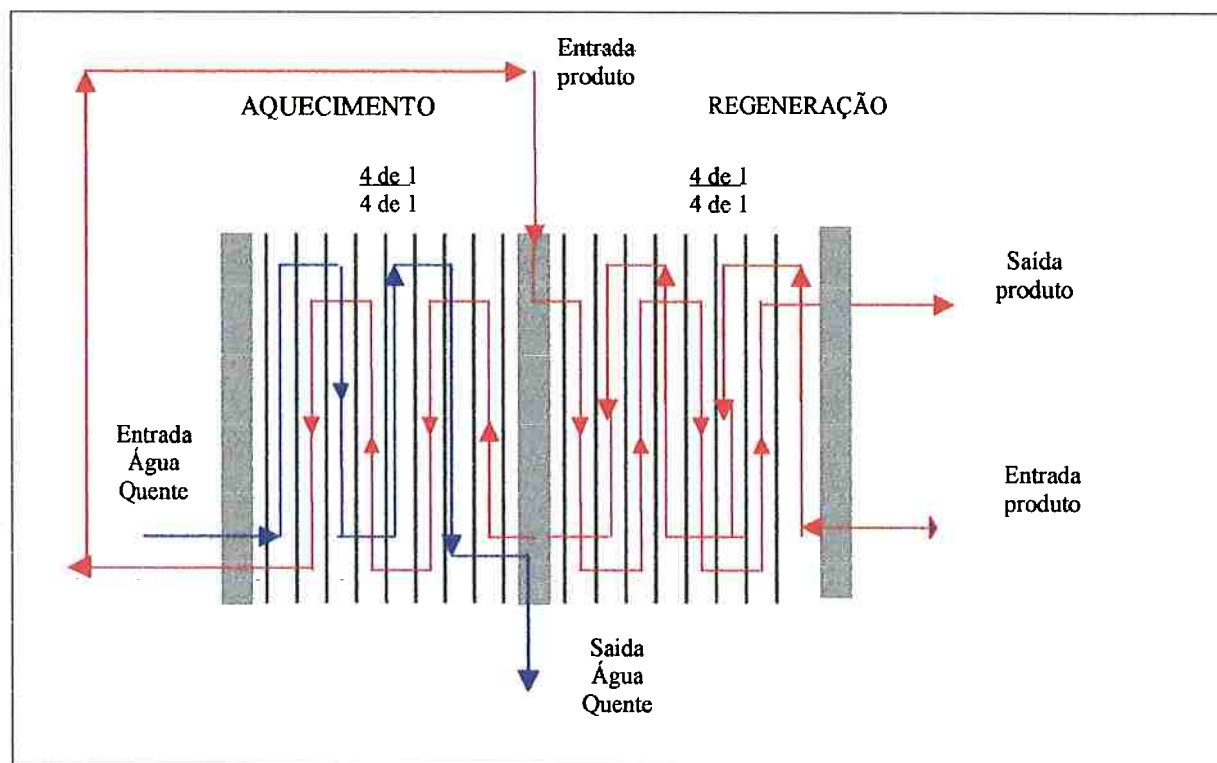


FIGURA 3.7: Representação esquemática de um exemplo de arranjo de placas simétrico utilizado no trocador de calor para ensaios com água destilada.

Para obter o desempenho térmico do trocador, foi empregada a metodologia de cálculo constante no Anexo I. A partir dos dados de temperatura e vazões obtidos nos diversos ensaios, foi feito o ajuste dos dados através de regressão multilinear e obtida a equação empírica que rege a transferência de calor.

3.4.3 Dimensionamento do trocador para utilização com suco de laranja natural

O dimensionamento do arranjo de placas adequado para as condições desejadas para a pasteurização do suco de laranja foi realizado através de simulação da transferência de calor no programa desenvolvido em linguagem VISUAL BASIC versão 4.0, a partir da relação empírica obtida do desempenho térmico do trocador com água destilada e das propriedades termofísicas do suco de laranja obtidas na bibliografia (PEACOCK, 1995).

Cópias das telas do programa Visual Basic para o dimensionamento do trocador e a listagem do programa, ambas desenvolvidas no Laboratório de Engenharia de Alimentos, estão apresentadas no Anexo II (MATHIAS & TADINI, 1998; MARQUES & TADINI, 1999).

3.4.4 Pasteurização do suco de laranja natural

3.4.4.1 Montagem do trocador:

O processo de pasteurização foi conduzido no trocador de calor de placas de bancada, marca ARMFIELD FT43A e as temperaturas de projeto estabelecidas foram 82.5°C, 85.0°C e 87.5°C. Para cada temperatura foram estabelecidos os seguintes tempos de retenção: 10, 15, 20, 35, 45 e 60 segundos.

O trocador de calor é provido de dois tubos de retenção, 0.078 L e 0.24 L, de modo que para cada ensaio, um ou outro foi acoplado ao trocador com o objetivo de atingir o tempo de retenção preestabelecido.

Os arranjos de placas necessários para atingir as temperaturas de pasteurização preestabelecidas para o projeto estão apresentados nas figuras 3.8 e 3.9.

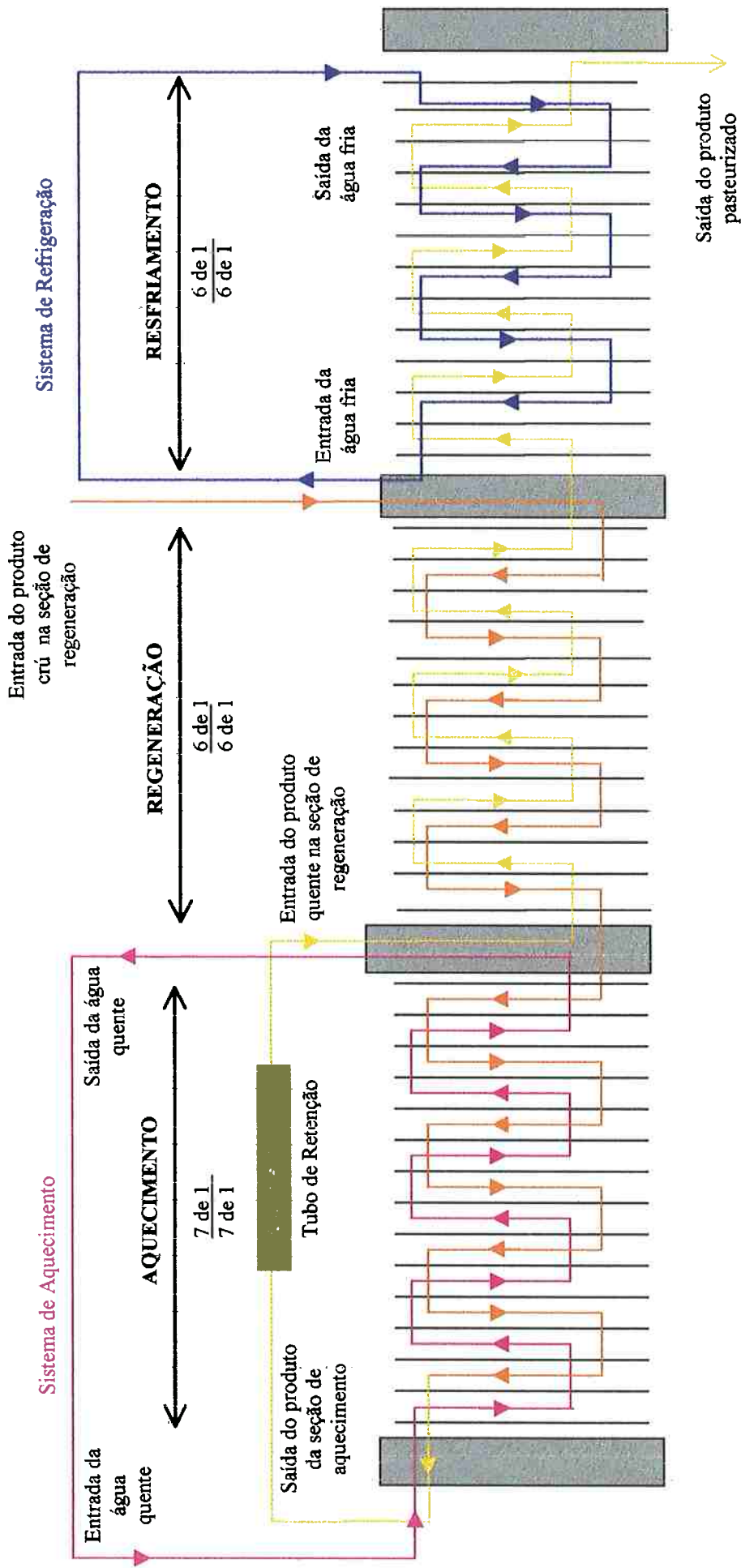


FIGURA 3.8: Representação esquemática do arranjo de placas utilizado no trocador de calor para ensaios com suco de laranja natural para atender as temperaturas de pasteurização de 82,5 °C e 85,0 °C.

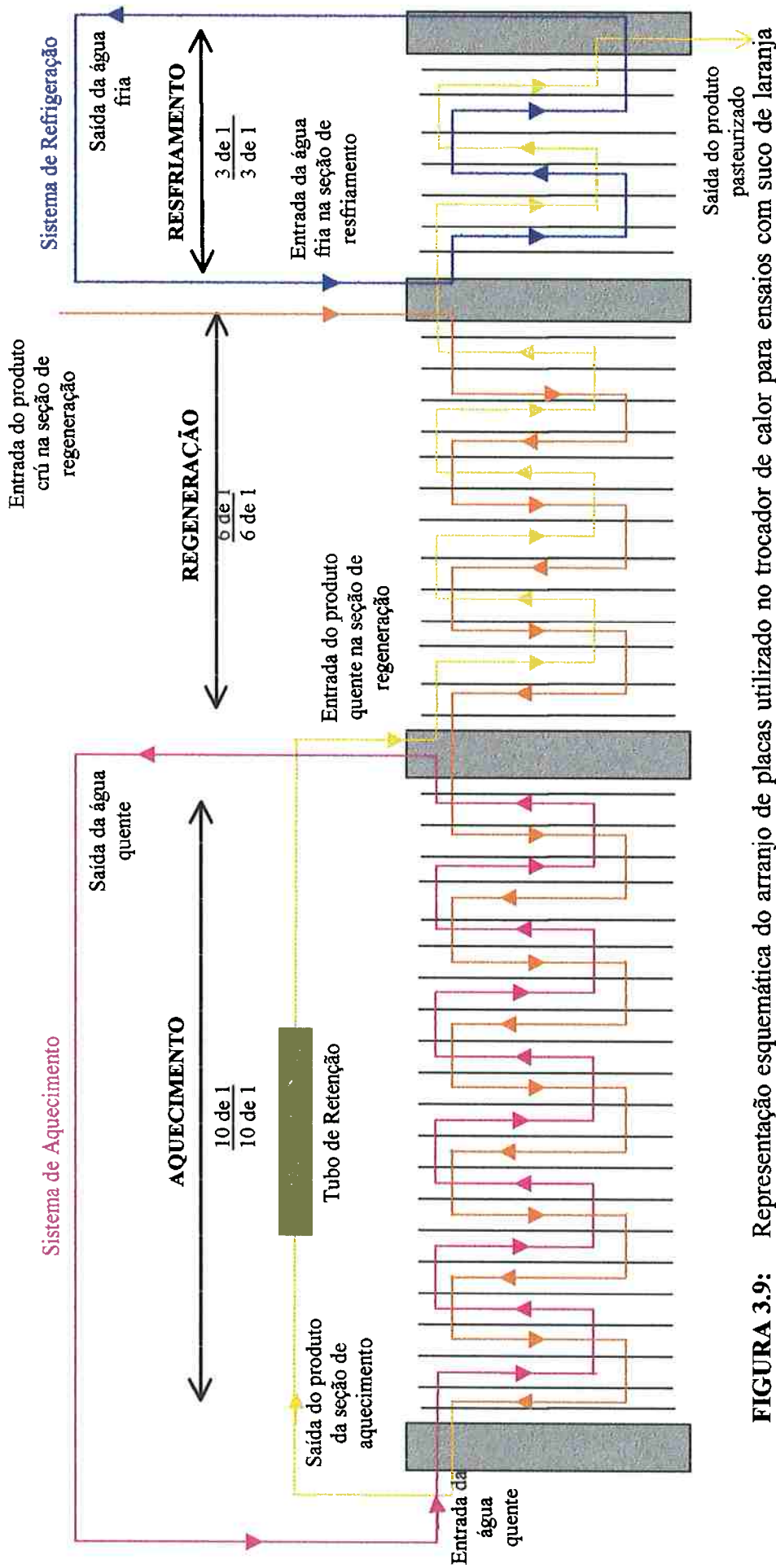
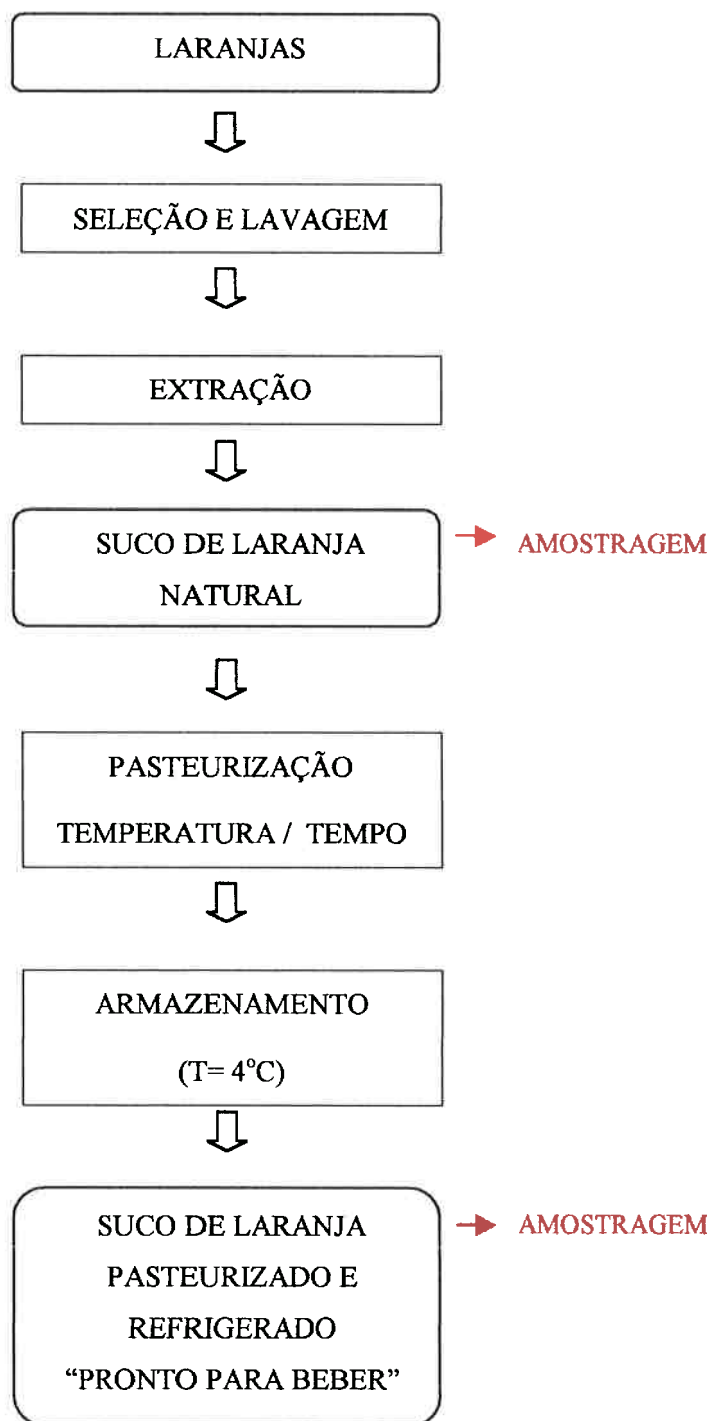


FIGURA 3.9: Representação esquemática do arranjo de placas utilizado no trocador de calor para ensaios com suco de laranja natural para atender as temperaturas de pasteurização de 87,0 °C.

3.4.4.2 Fluxograma do processo:



3.4.4.3: Descrição do processo:

As laranjas utilizadas no processamento do suco foram da variedade Pêra (*Citrus sinensis* (L.) Osbeck), que foram obtidas no CEAGESP (Companhia de Entrepósitos e Armazéns Gerais do Estado de São Paulo). Para cada ensaio foram utilizadas três caixas de 20,8 kg cada uma, podendo conter de 10 a 15 dúzias de laranja (de acordo com o seu tamanho). As laranjas foram adquiridas um dia antes de seu processamento e sua seleção e lavagem foram realizadas previamente ao início do ensaio. A lavagem foi realizada utilizando apenas água, a fim de retirar alguma sujeira ou inseto aderido a casca.

Segundo HATCHER et al, 1992, a lavagem das frutas pode reduzir até 90% o número de microorganismos presentes.

A extração do suco foi realizada em uma máquina extratora FMC fresh e o suco foi parte reservado para amostragem do suco natural não pasteurizado e parte conduzido diretamente para o tanque de alimentação do pasteurizador.

O processo de pasteurização foi conduzido em um trocador de calor de placas de bancada, marca ARMFIELD FT43A na temperatura de projeto pré-estabelecida. Para cada temperatura foram estabelecidos os seguintes tempos de retenção: 10, 15, 20, 35, 45 e 60 segundos.

O trocador de calor é provido de dois tubos de retenção, 0,078 L e 0,24 L, de modo que para cada ensaio, um ou outro foi acoplado ao trocador com o objetivo de atingir o tempo de retenção preestabelecido.

Os ensaios foram constituídos de uma matriz de duas variáveis: temperatura de pasteurização a 3 níveis (82,5°C; 85,0°C e 87,0°C); tempo de retenção a 6 níveis (10, 15, 20, 35, 45 e 60 s).

Análises físico-químicas e análise da atividade da pectinesterase, foram conduzidas nas amostras do suco processado e não-processado. As amostras foram coletadas e armazenadas em geladeira, para a realização das análises físico-químicas. Também foram coletadas amostras em 2 tubos de vidro com tampa de capacidade 10 mL para cada condição de suco, que logo após a coleta foram imersos em um banho de gelo e em seguida armazenados no congelador. Estas amostras foram utilizadas para as análises de atividade da enzima pectinesterase.

A Figuras 3.10 ilustra a amostragem para cada ensaio realizado.


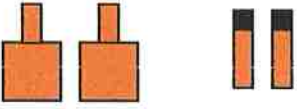
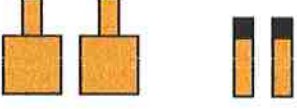
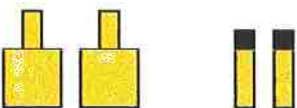
Tratamento	Análises 1º dia
Não processado	
Temperatura= 82,5°C Tempo= 35 s	
Temperatura= 82,5°C Tempo= 45 s	
Temperatura= 82,5°C Tempo= 60 s	

FIGURA 3.10: Exemplo de amostragem para um ensaio, com temperatura de pasteurização requerida = 82,5°C e tempos de retenção de 35, 45 e 60 segundos.

3.4.4.4 Análises físico-químicas

- **pH** : Medido em pH-Stat Radiometer modelo PHM - 290.
- **Acidez titulável:** Realizado conforme o método da AOAC, conduzido no pH-Stat até atingir pH de 8.2 (referente ao pH de mudança de coloração do indicador fenolftaleína) (AOAC, 1995).
- **°Brix:** Medido em refratômetro marca Carlzeiss Jena (711849), com correções de acidez e temperatura (KIMBALL, 1991).
- **Sólidos totais:** Segundo método da AOAC, 1995.

- **Sólidos insolúveis em água:** Segundo método da AOAC, 1995.

- **Determinação do teor de polpa:** Segundo método dado por Kimball, 1991.

3.4.4.5 Análise da atividade da enzima pectinesterase

Foi conduzida conforme ROUSE & ATKINS 1953, utilizando o pH-Stat da Radiometer modelo PHM - 290. A reação da amostra foi feita utilizando substrato Pectina Cítrica (Sigma P-9436 com grau de metoxilação de 67%) e conduzida a pH 7.5 e temperatura de 30°C , condições de máxima atividade da enzima pectinesterase.

3.4.4.6 Determinação dos parâmetros reológicos do suco de laranja

Foi conduzida no reômetro BRROKFIELD, modelo RDV III, acoplado com o adaptador UL, provido de camisa de aquecimento e sensor de temperatura, de modo que a aquisição de dados foi efetuada a temperatura constante. Para cada dia do ensaio, amostra do suco natural não processado foi introduzida no adaptador e realizadas aquisições através do programa RHEOCALC v. 1.1. As curvas ascendentes foram obtidas para cada uma das seguintes temperaturas: ambiente, 30 °C, 40 °C, 50 °C, 60 °C, 70 °C, 75 °C, 80 °C e 85 °C, simulando as condições do processo.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Calibração dos Sensores de Temperatura e Bomba de Alimentação

As Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 ilustram a aquisição das medidas das temperaturas para cada um dos seis termopares referentes a temperatura da fusão do gelo, temperatura ambiente da água e ebulição da água, respectivamente.

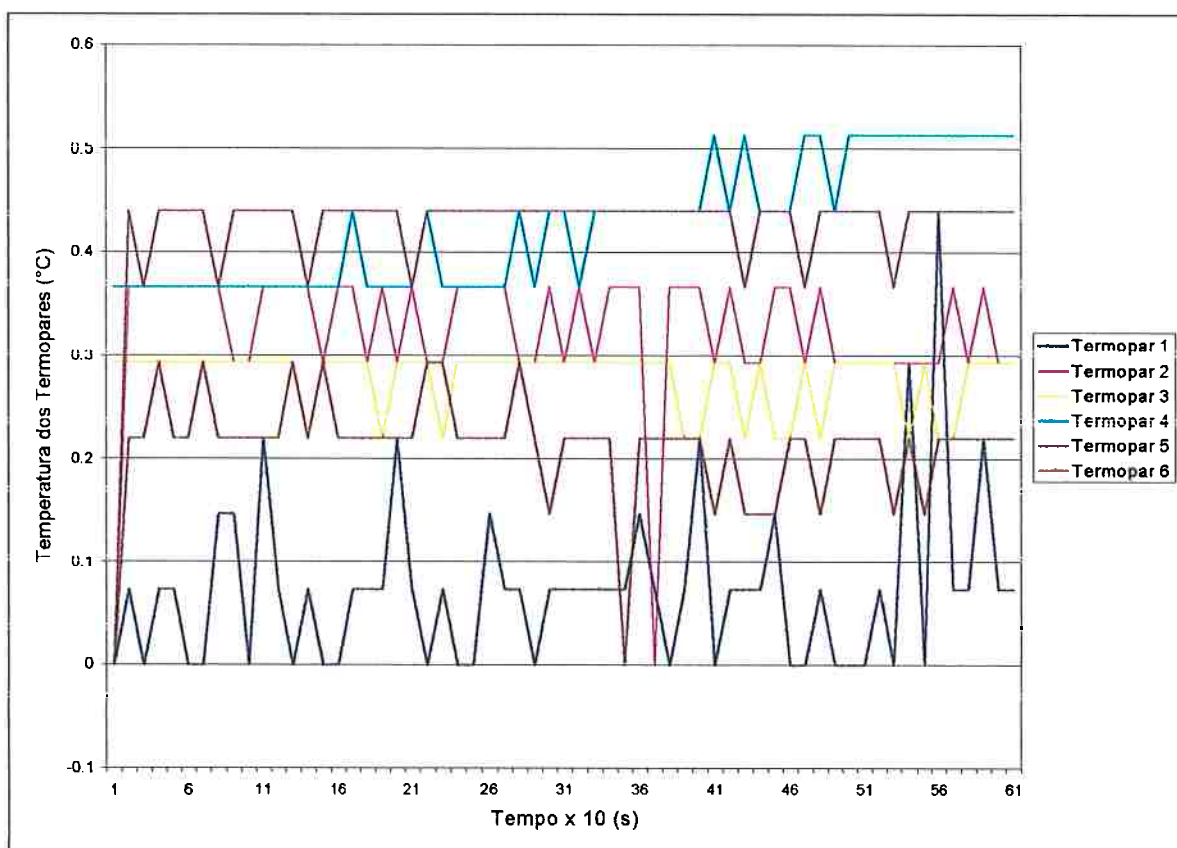


FIGURA 4.1: Medidas da Temperatura referentes a fusão do gelo adquiridas através do Programa FT43A-90IFD Data Logger para Windows.

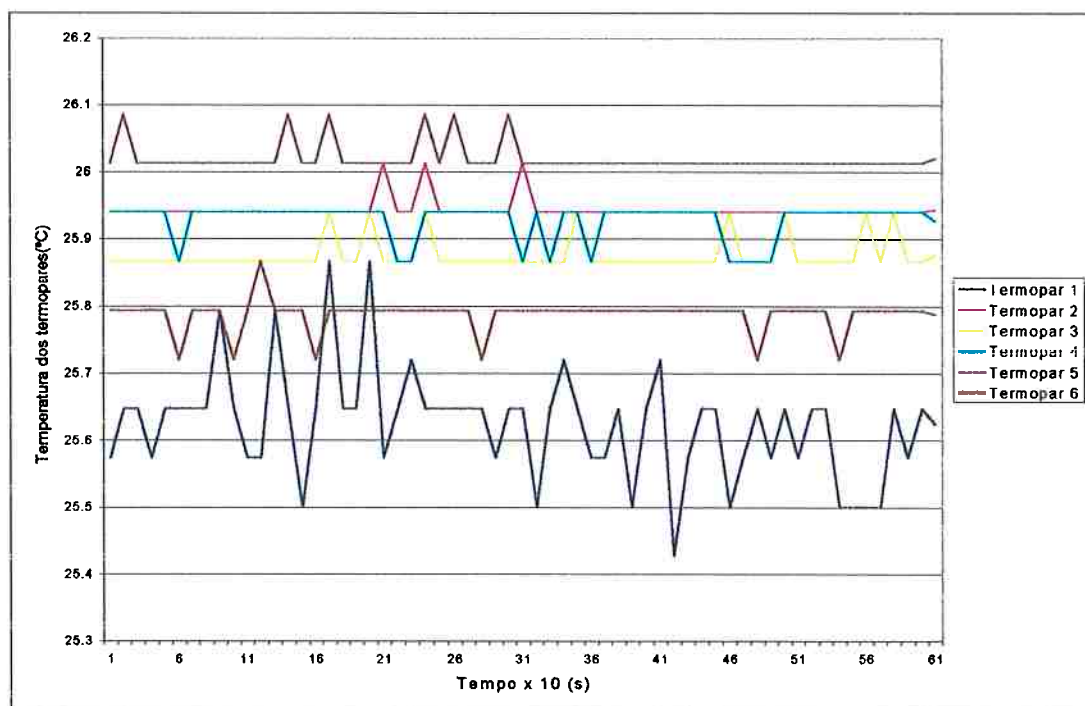


FIGURA 4.2: Medidas da Temperatura referentes a temperatura ambiente da água adquiridas através do Programa FT43A-90IFD Data Logger para Windows.

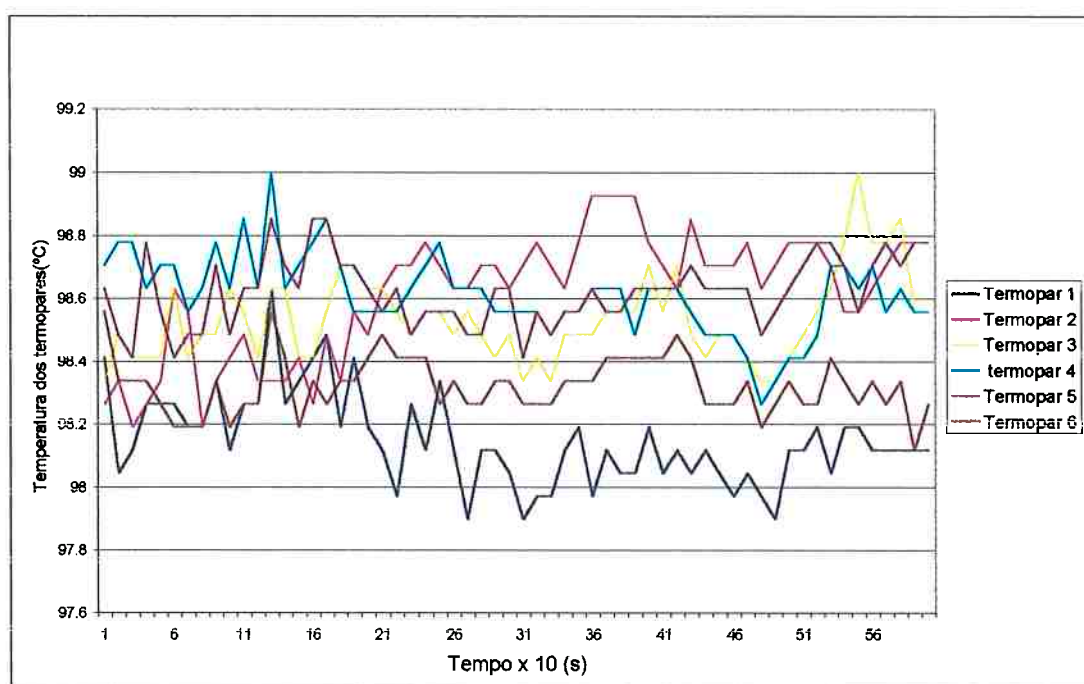


FIGURA 4.3: Medidas da Temperatura referentes a ebulição da água adquiridas através do Programa FT43A-90IFD Data Logger para Windows.

Através das três temperaturas médias obtidas pelos dados fornecidos pelo programa que geraram os gráficos das Figuras 4.1, 4.2 e 4.3 e das respectivas temperaturas medidas através dos termômetros calibrados, para cada um dos termopares, foi possível obter as suas respectivas curvas de calibração por meio da regressão linear dos três pontos. A Tabela 4.1 a seguir mostra os valores médios das temperaturas obtidas e seus respectivos desvios.

TABELA 4.1: Valores médios das temperaturas obtidas através da aquisição da temperatura de cada termopar referentes a fusão do gelo, ebulição da água e da temperatura ambiente da água.

Termopar	T da Fusão do Gelo (°C)		T da Ebulição da Água (°C)		T Ambiente da Água (°C)	
	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão	Média	Desvio Padrão
1	0,07	0,08	98,15	0,15	25,62	0,08
2	0,33	0,06	98,61	0,20	25,94	0,02
3	0,28	0,03	98,53	0,13	25,88	0,02
4	0,43	0,06	98,61	0,13	25,93	0,03
5	0,43	0,02	98,62	0,11	26,02	0,02
6	0,21	0,05	99,32	0,09	25,79	0,02

A Tabela 4.2 indica os valores dos coeficientes angulares (m) e lineares (n) da curva de calibração para cada termopar, obtidos da regressão linear entre os valores médios das temperaturas indicados na Tabela 4.1 e os respectivos valores medidos nos termômetros calibrados.

Como pode ser observado, para todos os termopares, os valores dos coeficientes angulares foram muito próximos de 1,0000 e os valores dos coeficientes lineares foram baixos, todos inferiores a 0,4 °C, o que denota a boa qualidade tanto dos sensores, quanto da interface entre os sensores e o Data Logger. A partir dos arquivos gerados

pelo programa Data Logger, foi possível exportar os dados para o programa Excel, onde todos os cálculos foram feitos a partir das temperaturas corrigidas.

TABELA 4.2: Valores dos coeficientes angulares (m) e lineares (n) da curva de calibração para cada termopar, obtidos da regressão linear.

Termopar	T da Fusão		T da Ebulição		T Ambiente		m	n	R ²
	do Gelo (°C)		da Água (°C)		da Água (°C)				
	Média	ΔT	Média	ΔT	Média	ΔT			
1	0,07	0,08	98,15	0,15	25,62	0,08	0,9938	0,0063	1,0000
2	0,33	0,06	98,61	0,20	25,94	0,02	0,9959	0,2659	1,0000
3	0,28	0,03	98,53	0,13	25,88	0,02	0,9964	0,1452	1,0000
4	0,43	0,06	98,61	0,13	25,93	0,03	0,9960	0,2578	1,0000
5	0,43	0,02	98,62	0,11	26,02	0,02	0,9949	0,3678	1,0000
6	0,21	0,05	99,32	0,09	25,79	0,02	0,9941	0,1534	1,0000

A Tabela 4.3 indica os resultados obtidos nas medições de vazão da bomba de alimentação, para cada posição do *speed* dial da bomba e seus respectivos valores médios e desvios padrão.

TABELA 4.3: Valores das medições de vazão obtidos para cada posição do *speed dial* da bomba de alimentação do trocador, seus respectivos valores médios e desvios padrão.

Posição do Speed Dial	Medição 1 (kg/h)	Medição 2 (kg/h)	Medição 3 (kg/h)	Vazão Média (kg/h)	Desvio Padrão (kg/h)
2	2,904	2,910	2,935	2,92	0,02
4	6,978	7,024	6,962	7,00	0,03
6	12,70	12,70	12,56	12,7	0,10
8	18,86	18,79	18,78	18,8	0,10
10	24,10	24,02	24,01	24,04	0,10
12	29,77	29,78	30,03	29,9	0,10
14	35,77	35,80	35,97	35,8	0,10
16	45,08	45,63	45,83	45,5	0,40
18	52,15	52,38	52,66	52,4	0,30
20	63,46	63,67	64,75	64,0	0,70
22	77,50	78,53	78,82	78,3	0,70

A Figura 4.4 mostra a curva de calibração obtida pela regressão linear onde podemos observar um bom coeficiente de correlação. Nota-se também um desvio da reta obtida para vazões mais altas, pois apesar de ser uma bomba tipo peristáltica, para valores de vazão acima de 45,5 kg/h a perda de carga na tubulação influenciou os resultados alcançados. A indicação das duas linhas de tendência, linear e exponencial, apresentadas na Figura 4.4, se deve ao fato de que consta do manual do fabricante a curva de calibração reta, porém a exponencial apresentou um coeficiente de determinação R^2 melhor, no valor de 0,9976. No entanto, para vazões menores que 14 Kg/h, a curva de calibração se ajustou bem, com um coeficiente de determinação de R^2 0,9981.

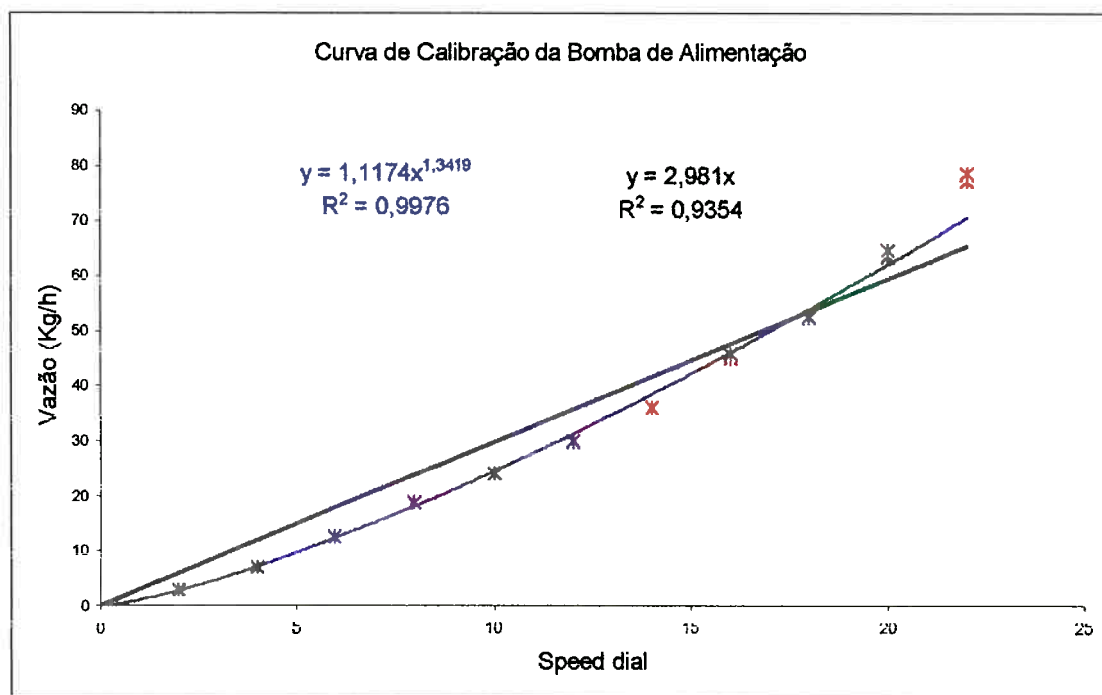


FIGURA 4.4: Curva de calibração da bomba de alimentação obtida através de regressão linear dos dados obtidos de três medições

4.2 Desempenho Térmico do Trocador

Como foi mencionado anteriormente, foram realizadas aquisições das temperaturas e vazões de ambas as correntes da seção de regeneração do trocador de calor, utilizando como fluido produto água destilada. As aquisições foram feitas para diferentes tipos de arranjos (diferentes números de passes e passagens), na frequência de 1 aquisição a cada 10 segundos, no total de 60 pontos para cada arranjo. As vazões utilizadas variaram de 05 a 09 na escala do speed dial da bomba, ou seja, entre 5 e 25 kg/h. Os arranjos de placas utilizados (sempre simétricos, ou seja, o arranjo do fluido térmico é igual ao arranjo do fluido produto) foram 2 de 1 a 6 de 1 e também 1 de 2 a 1 de 4, em que o primeiro índice denota o número de passes do fluido pelo trocador e o segundo índice significa o número de passagens pelo trocador. O escoamento, em todos os ensaios, foi sempre contracorrente.

Como exemplo, a Tabela 4.4 mostra os dados obtidos na aquisição já corrigidos, durante o ensaio com água destilada utilizando o arranjo 4 de 1/ 4 de 1 (ilustrado na Figura 3.10), na seção de regeneração, com o speed dial na posição 6.

TABELA 4.4: Dados de temperatura adquiridos através do Data Logger FT 43a-90, para o ensaio com água destilada, na seção de regeneração, com o arranjo de placas 4 de 1/ 4 de 1, ilustrado na Figura 3.10.

Ensaio:		Arranjo: 4 de 1/ 4 de 1			
FT43a-90	Date:	4th May 1999			
		Fluido Frio		Fluido Quente	
	Time:	T _{e2}	T _{e1}	T _{h1}	T _{h2}
		°C	°C	°C	°C
	15:15:02	31,84125	23,4784	32,8555	31,0574
	15:15:12	31,84125	23,4055	32,9286	31,0574
	15:15:22	31,69556	23,3326	32,7825	30,9114
	15:15:32	31,62271	23,3326	32,7095	30,9114
	15:15:42	31,69556	23,2597	32,7095	30,9114
	15:15:52	31,76840	23,2597	32,7095	30,9844
	15:16:02	31,91409	23,4784	32,7825	31,1304

Ensaio:		Arranjo: 4 de 1/ 4 de 1		
FT43a-90	Date:	4th May 1999		
Time:	Fluido Frio		Fluido Quente	
	T _{c2} °C	T _{c1} °C	T _{h1} °C	T _{h2} °C
15:16:12	31,84125	23,4784	32,7825	31,2034
15:16:22	31,76840	23,4055	32,7095	31,0574
15:16:32	31,69556	23,3326	32,5635	30,9844
15:16:42	31,69556	23,2597	32,4905	30,9844
15:16:52	31,69556	23,3326	32,5635	31,0574
15:17:02	31,76840	23,4055	32,6365	31,0574
15:17:12	31,76840	23,3326	32,4905	31,0574
15:17:22	31,76840	23,4055	32,4905	31,0574
15:17:32	31,69556	23,4055	32,4175	31,0574
15:17:42	31,69556	23,2597	32,4905	30,9844
15:17:52	31,84125	23,4055	32,5635	31,2034
15:18:02	31,69556	23,3326	32,4175	31,0574
15:18:12	31,69556	23,2597	32,3444	30,9844
15:18:22	31,69556	23,3326	32,4175	30,9844
15:18:32	31,76840	23,4055	32,4175	30,9844
15:18:42	31,91409	23,4784	32,5635	31,0574
15:18:52	31,91409	23,4055	32,5635	31,1304
15:19:02	31,91409	23,4055	32,4905	31,0574
15:19:12	31,76840	23,4055	32,4175	30,9844
15:19:22	31,91409	23,4784	32,4905	31,0574
15:19:32	31,91409	23,4784	32,4905	31,1304
15:19:42	31,91409	23,4784	32,5635	31,2764
15:19:52	31,91409	23,4784	32,4905	31,2764
15:20:02	31,76840	23,3326	32,3444	31,1304
15:20:12	31,84125	23,4055	32,4905	31,3493
15:20:22	31,84125	23,4055	32,4905	31,2034
15:20:32	31,98694	23,4784	32,4905	31,3493
15:20:42	31,84125	23,3326	32,3444	31,2034
15:20:52	31,91409	23,3326	32,3444	31,2034
15:21:02	31,84125	23,2597	32,2714	31,1304
15:21:12	31,98694	23,4784	32,4175	31,3493
15:21:22	31,98694	23,4784	32,4175	31,3493
15:21:32	31,84125	23,3326	32,2714	31,2764

Ensaio:		Arranjo: 4 de 1/ 4 de 1			
FT43a-90	Date:	4th May 1999			
		Fluido Frio		Fluido Quente	
	Time:	T_{c2}	T_{c1}	T_{h1}	T_{h2}
		°C	°C	°C	°C
	15:21:42	31,76840	23,3326	32,1984	31,2034
	15:22:02	31,76840	23,3326	32,2714	31,2034
	15:22:12	31,91409	23,4784	32,4175	31,3493
	15:22:22	31,69556	23,3326	32,1984	31,2034
	15:22:32	31,84125	23,4055	32,3444	31,2764
	15:22:42	31,76840	23,3326	32,3444	31,1304
	15:22:52	31,91409	23,4784	32,4905	31,2034
	15:23:02	31,76840	23,4055	32,4175	31,1304
	15:23:12	32,13263	23,4055	32,4175	31,1304
	15:23:22	31,76840	23,4055	32,4175	31,0574
	15:23:32	31,91409	23,4784	32,4175	31,2034
	15:23:42	31,76840	23,3326	32,2714	31,1304
	15:23:52	31,84125	23,4784	32,4175	31,2034
	15:24:02	31,91409	23,4784	32,4175	31,2034
	15:24:12	31,91409	23,4784	32,4175	31,2034
	15:24:22	31,76840	23,3326	32,2714	31,0574
	15:24:32	31,76840	23,3326	32,3444	31,2034
	15:24:42	31,91409	23,4784	32,4175	31,0574
	15:24:52	31,98694	23,4784	32,3444	31,2034
	Média °C	31,82304	23,3910	32,4722	31,1304
	Desvio padrão °C	0,100923	0,07327	0,16054	0,11792

Para cada arquivo gerado pelo Data Logger e a partir de outros dados obtidos em cada ensaio, foram geradas planilhas de cálculo, utilizando o Programa Excel, aplicando a metodologia de cálculo apresentada no Anexo I. Estas planilhas geraram dados dos números adimensionais Nu, Re e Pr, para cada ensaio, totalizando no final uma matriz de 1020 linhas.

A Tabela 4.5 apresenta a planilha de cálculo obtida com os dados experimentais referentes ao ensaio com água destilada, na seção de regeneração com arranjo 4 de 1/ 4 de 1 e com as características da placa apresentadas na Tabela 4.6.

TABELA 4.6: Dados das características das placas empregadas nos arranjos do trocador de calor tipo placas ARMFIELD, FT 43 – A.

Descrição	Notação	Valor
Espaçamento médio entre placas	b	0,001464 m
Distância horizontal entre conexões	L_w	0,0598 m
Diâmetro equivalente	D_e	0,002927 m
Número de canais por passe	N_{cp}	1
Número total de placas	N_t	9
Número de passes	N_p	4
Área efetiva da placa	a_p	0,0049843m ²
Espessura da placa	t	0,001 m

Com os valores de Nu, Re e Pr obtidos de todos os ensaios com água destilada, utilizando o programa de estatística Statgraphics for Windows v. 1.04, regressão multilinear foi ajustada aos dados, cujo resultado está apresentado na Tabela 4.7, a seguir.

TABELA 4.7: Parâmetros da regressão multilinear ajustada ao valores de Nu, Re e Pr, obtidos a partir de dados experimentais, de arranjos simétricos na seção de regeneração, com água destilada, no trocador de calor tipo placas, ARMFIELD, FT 43 A.

<i>Coefficiente</i>	<i>Estimativa</i>
Constante (Ln a)	-4,8585
Ln Re	1,003420
Ln Pr	0,658694

O ajuste foi obtido com um coeficiente de determinação R^2 de 0,8932, considerado bastante satisfatório para o procedimento experimental.

A equação da correlação empírica que modela o fenômeno de transferência de calor para este trocador de calor de placas ARMFIELD FT 43 - A operando em regime de escoamento turbulento, fluxo contracorrente para aplicações líquido-líquido foi então determinada:

$$Nu = 0,0078 * Re^{1,003} * Pr^{0,659} \quad (4.1)$$

$$151,577 < Re < 214,950$$

$$5,841 < Pr < 6,250$$

TABELA 4.5: Planilha de Cálculo

Ensaio: Arranjo: 4 de 1/4 de 1 FT 43a-90 Date: 4th May 1999

Time:	Fluido Quente													
	T _{e2} °C	T _{e1} °C	T _{cm} °C	T _{h1} °C	T _{h2} °C	T _{hm} °C	ΔT _m °C	G _c Kg/m ² .s	Re	Pr	Q W	U W/m ² .K	h W/m ² .K	Nu
15:15:02	31.84125	23.47844	27.65985	32.85555	31.05741	31.95648	3.26408	47.5288	165.142	5.688	90.742	697.193	1470.917	6.939
15:15:12	31.84125	23.40555	27.62340	32.92856	31.05741	31.99299	3.36430	47.5288	165.010	5.693	92.045	686.140	1446.338	6.824
15:15:22	31.69556	23.33264	27.51410	32.78253	30.91143	31.84698	3.34293	47.5288	164.616	5.708	91.393	685.635	1445.218	6.821
15:15:32	31.62271	23.33264	27.47767	32.70951	30.91143	31.81047	3.34275	47.5288	164.484	5.713	90.090	675.895	1423.596	6.719
15:15:42	31.69556	23.25973	27.47764	32.70951	30.91143	31.81047	3.28428	47.5288	164.484	5.713	91.392	697.866	1472.415	6.949
15:15:52	31.76840	23.25973	27.51407	32.70951	30.98442	31.84697	3.22242	47.5288	164.616	5.708	91.390	711.252	1502.241	7.090
15:16:02	31.91409	23.47844	27.69627	32.78253	31.13039	31.95646	3.11740	47.5288	165.274	5.683	90.088	724.740	1532.358	7.229
15:16:12	31.84125	23.47844	27.65985	32.78253	31.20338	31.99296	3.22269	47.5288	165.142	5.688	88.786	690.924	1456.971	6.874
15:16:22	31.76840	23.40555	27.58697	32.70951	31.05741	31.88346	3.20224	47.5288	164.879	5.698	89.437	700.438	1478.140	6.975
15:16:32	31.69556	23.33264	27.51410	32.56349	30.98442	31.77396	3.11675	47.5288	164.616	5.708	88.784	714.396	1509.256	7.123
15:16:42	31.69556	23.25973	27.47764	32.49048	30.98442	31.73745	3.04748	47.5288	164.484	5.713	88.782	730.622	1545.511	7.294
15:16:52	31.69556	23.33264	27.51410	32.56349	31.05741	31.81045	3.13660	47.5288	164.616	5.708	88.132	704.662	1487.549	7.020
15:17:02	31.76840	23.40555	27.58697	32.63651	31.05741	31.84696	3.11697	47.5288	164.879	5.698	88.785	714.350	1509.152	7.121
15:17:12	31.76840	23.33264	27.55052	32.49048	31.05741	31.77394	2.95465	47.5288	164.747	5.703	88.131	748.044	1584.543	7.477
15:17:22	31.76840	23.40555	27.58697	32.49048	31.05741	31.77394	2.93563	47.5288	164.879	5.698	87.480	747.331	1582.943	7.469
15:17:32	31.69556	23.40555	27.55055	32.41746	31.05741	31.73743	2.93541	47.5288	164.747	5.703	86.177	736.252	1558.114	7.353
15:17:42	31.69556	23.25973	27.47764	32.49048	30.98442	31.73745	3.04748	47.5288	164.484	5.713	88.782	730.622	1545.511	7.294
15:17:52	31.84125	23.40555	27.62340	32.56349	31.20338	31.88344	2.97388	47.5288	165.010	5.693	87.479	737.711	1561.380	7.367
15:18:02	31.69556	23.33264	27.51410	32.41746	31.05741	31.73743	2.95443	47.5288	164.616	5.708	86.827	737.037	1559.871	7.362
15:18:12	31.69556	23.25973	27.47764	32.34444	30.98442	31.66443	2.85670	47.5288	164.484	5.713	87.478	767.961	1629.298	7.690
15:18:22	31.69556	23.33264	27.51410	32.41746	30.98442	31.70094	2.93539	47.5288	164.616	5.708	87.479	747.387	1583.070	7.471
15:18:32	31.76840	23.40555	27.58697	32.41746	30.98442	31.70094	2.81975	47.5288	164.879	5.698	87.480	778.040	1651.999	7.795
15:18:42	31.91409	23.47844	27.69627	32.56349	31.05741	31.81045	2.82024	47.5288	165.274	5.683	88.783	789.497	1677.849	7.915

Ensaio: Arranjo: 4 de 1/4 de 1 FT 43a-90 Date: 4th May 1999

Time:	Fluido Frio										Fluido Quente									
	T _{e2} °C	T _{e1} °C	T _{cm} °C	T _{h1} °C	T _{h2} °C	T _{hm} °C	ΔT _m °C	G _c Kg/m ² .s	Re	Pr	Q W	U W/m ² .K	h W/m ² .K	Nu						
15:18:52	31.91409	23.40555	27.65982	32.56349	31.13039	31.84694	2.85744	47.5288	165.142	5.688	88.782	779.206	1654.628	7.806						
15:19:02	31.91409	23.40555	27.65982	32.49048	31.05741	31.77394	2.73615	47.5288	165.142	5.688	88.782	813.746	1732.715	8.175						
15:19:12	31.76840	23.40555	27.58697	32.41746	30.98442	31.70094	2.81975	47.5288	164.879	5.698	87.480	778.040	1651.999	7.795						
15:19:22	31.91409	23.47844	27.69627	32.49048	31.05741	31.77394	2.71802	47.5288	165.274	5.683	88.131	813.170	1731.410	8.168						
15:19:32	31.91409	23.47844	27.69627	32.49048	31.13039	31.81043	2.73617	47.5288	165.274	5.683	87.479	801.800	1705.659	8.046						
15:19:42	31.91409	23.47844	27.69627	32.56349	31.27637	31.91993	2.87602	47.5288	165.274	5.683	86.827	757.129	1604.940	7.571						
15:19:52	31.91409	23.47844	27.69627	32.49048	31.27637	31.88342	2.77236	47.5288	165.274	5.683	86.175	779.537	1655.374	7.809						
15:20:02	31.76840	23.33264	27.55052	32.34444	31.13039	31.73742	2.77181	47.5288	164.747	5.703	86.174	779.682	1655.702	7.813						
15:20:12	31.84125	23.40555	27.62340	32.49048	31.34934	31.91991	2.91274	47.5288	165.010	5.693	85.523	736.352	1558.338	7.353						
15:20:22	31.84125	23.40555	27.62340	32.49048	31.20338	31.84693	2.87575	47.5288	165.010	5.693	86.827	757.195	1605.089	7.573						
15:20:32	31.98694	23.47844	27.73269	32.49048	31.34934	31.91991	2.67976	47.5288	165.405	5.678	86.174	806.465	1716.219	8.095						
15:20:42	31.84125	23.33264	27.58695	32.34444	31.20338	31.77391	2.67917	47.5288	164.879	5.698	86.173	806.631	1716.594	8.100						
15:20:52	31.91409	23.33264	27.62336	32.34444	31.20338	31.77391	2.56009	47.5288	165.010	5.693	86.823	850.525	1816.337	8.570						
15:21:02	31.84125	23.25973	27.55049	32.27144	31.13039	31.70092	2.55978	47.5288	164.747	5.703	86.823	850.624	1816.561	8.572						
15:21:12	31.98694	23.47844	27.73269	32.41746	31.34934	31.88340	2.56041	47.5288	165.405	5.678	85.521	837.664	1787.041	8.429						
15:21:22	31.98694	23.47844	27.73269	32.41746	31.34934	31.88340	2.56041	47.5288	165.405	5.678	85.521	837.664	1787.041	8.429						
15:21:32	31.84125	23.33264	27.58695	32.27144	31.27637	31.77390	2.57673	47.5288	164.879	5.698	84.868	826.004	1760.532	8.307						
15:21:42	31.76840	23.33264	27.55052	32.19842	31.20338	31.70090	2.55952	47.5288	164.747	5.703	84.217	825.179	1758.658	8.299						
15:21:52	31.76840	23.33264	27.55052	32.27144	31.27637	31.77390	2.69641	47.5288	164.747	5.703	84.217	783.289	1663.836	7.852						
15:22:02	31.76840	23.33264	27.55052	32.27144	31.20338	31.73741	2.67892	47.5288	164.747	5.703	84.869	794.506	1689.166	7.971						
15:22:12	31.91409	23.47844	27.69627	32.41746	31.34934	31.88340	2.67949	47.5288	165.274	5.683	84.870	794.347	1688.806	7.967						
15:22:22	31.69556	23.33264	27.51410	32.19842	31.20338	31.70090	2.67866	47.5288	164.616	5.708	83.566	782.384	1661.795	7.843						
15:22:32	31.84125	23.40555	27.62340	32.34444	31.27637	31.81041	2.67919	47.5288	165.010	5.693	84.870	794.431	1688.995	7.969						

Ensaio: Arranjo: 4 de 1/4 de 1 FT 43a-90 Date: 4th May 1999

Time:	Fluido Frio										Fluido Quente									
	T _{e2} °C	T _{e1} °C	T _{em} °C	T _{h1} °C	T _{h2} °C	T _{hm} °C	ΔT _m °C	G _c Kg/m ² .s	Re	Pr	Q W	U W/m ² .K	h W/m ² .K	Nu						
15:22:42	31.76840	23.33264	27.55052	32.34444	31.13039	31.73742	2.77181	47.5288	164.747	5.703	86.174	779.682	1655.702	7.813						
15:22:52	31.91409	23.47844	27.69627	32.49048	31.20338	31.84693	2.75428	47.5288	165.274	5.683	86.827	790.590	1680.317	7.927						
15:23:02	31.76840	23.40555	27.58697	32.41746	31.13039	31.77393	2.85697	47.5288	164.879	5.698	86.176	756.457	1603.431	7.566						
15:23:12	32.13263	23.40555	27.76909	32.41746	31.13039	31.77393	2.25434	47.5288	165.537	5.673	89.430	994.875	2149.325	10.13						
15:23:22	31.76840	23.40555	27.58697	32.41746	31.05741	31.73743	2.83838	47.5288	164.879	5.698	86.828	767.172	1627.523	7.680						
15:23:32	31.91409	23.47844	27.69627	32.41746	31.20338	31.81042	2.64441	47.5288	165.274	5.683	86.174	817.252	1740.666	8.211						
15:23:42	31.76840	23.33264	27.55052	32.27144	31.13039	31.70092	2.66140	47.5288	164.747	5.703	85.522	805.882	1714.898	8.093						
15:23:52	31.84125	23.47844	27.65985	32.41746	31.20338	31.81042	2.75402	47.5288	165.142	5.688	85.524	778.798	1653.708	7.802						
15:24:02	31.91409	23.47844	27.69627	32.41746	31.20338	31.81042	2.64441	47.5288	165.274	5.683	86.174	817.252	1740.666	8.211						
15:24:12	31.91409	23.47844	27.69627	32.41746	31.20338	31.81042	2.64441	47.5288	165.274	5.683	86.174	817.252	1740.666	8.211						
15:24:22	31.76840	23.33264	27.55052	32.27144	31.05741	31.66442	2.64384	47.5288	164.747	5.703	86.174	817.418	1741.042	8.216						
15:24:32	31.76840	23.33264	27.55052	32.34444	31.20338	31.77391	2.78985	47.5288	164.747	5.703	85.522	768.780	1631.141	7.697						
15:24:42	31.91409	23.47844	27.69627	32.41746	31.05741	31.73743	2.60918	47.5288	165.274	5.683	87.479	840.820	1794.223	8.464						
15:24:52	31.98694	23.47844	27.73269	32.34444	31.20338	31.77391	2.39743	47.5288	165.405	5.678	86.173	901.428	1932.882	9.117						
Média	31.82304	23.3910	27.6070	32.4722	31.1304	31.8013	2.8417	47.5288	164.951	5.695	87.283	774.887	1645.464	7.763						
Des Pad	0.100923	0.073272	0.080615	0.160544	0.117916	0.079415	0.2453	0	0.2911	0.01	1.938	56.902	128.709	0.606						

A partir da correlação empírica da transferência de calor para o trocador ARMFIELD, modelo FT 43 – A, dada pela equação 4.1, foi desenvolvido o algoritmo para cálculo da área térmica necessária para uma dada aplicação, em linguagem Visual Basic v. 4.0, baseado na metodologia de cálculo apresentada no Anexo I. O cálculo da área térmica necessária para uma dada aplicação, constitui de um processo iterativo com o qual poderá ser determinado o número de placas e número de passes, que correspondem a área térmica necessária em comparação com um arranjo inicialmente proposto. O procedimento é repetido tantas vezes quantas necessárias até que a razão entre a área proposta e a área necessária se iguale a 1,10. As telas e a listagem do programa estão apresentadas no Anexo II.

4.3 Pasteurização do suco de laranja

4.3.1 Resumo dos ensaios:

A Tabela 4.8 apresenta as condições temperatura – tempo de retenção empregados durante os ensaios, na pasteurização de suco de laranja, utilizando os arranjos ilustrados nas Figuras 3.8 e 3.9.

TABELA 4.8: Dados de parâmetros temperatura – tempo de retenção de cada ensaio da pasteurização de suco de laranja realizado no trocador de calor tipo placas ARMFIELD, FT 43 – A.

Ensaio	T °C	Tempo s	T real °C	Tempo real s	Arranjos Fig nº
20/07/99	Não processado	0,00	19,70	0,00	
	82,5	11,09	82,12	11,45	3.8
	82,5	13,87	82,24	13,09	3.8
	82,5	18,49	82,19	14,93	3.8
27/07/99	Não processado	0,00	19,20	0,00	
	85,0	11,09	84,26	10,55	3.8
	85,0	13,87	84,25	13,56	3.8
	85,0	18,49	84,64	17,97	3.8
03/08/99	Não processado	0,00	17,00	0,00	
	82,5	35,13	82,21	13,62	3.8
	82,5	43,91	82,33	15,95	3.8
	82,5	58,55	82,21	19,43	3.8
10/08/99	Não processado	0,00	18,10	0,00	
	85,0	35,13	82,93	32,31	3.8
	85,0	43,91	83,57	42,00	3.8
	85,0	58,55	84,31	57,16	3.8
17/08/99	Não processado	0,00	14,80	0,00	
	87,0	43,91	86,93	44,11	3.9
	87,0	50,09	86,81	48,34	3.9
	87,0	58,55	86,53	56,13	3.9
14/09/99	Não processado	0,00	19,70	0,00	
	87,0	13,87	85,17	13,62	3.9
	87,0	15,82	86,20	15,95	3.9
	87,0	18,49	86,37	19,43	3.9
21/09/99	Não processado	0,00	20,6	0,00	
	85,0	12,29	84,63	11,44	3.8
	85,0	13,87	84,33	12,08	3.8
	85,0	15,82	84,04	16,21	3.8

Ensaio	T °C	Tempo s	T real °C	Tempo real s	Arranjos Fig nº
21/09/99	85,0	21,34	83,78	23,90	3.8
29/09/99	Não processado	0,00	20,5	0,00	
	82,5	12,29	79,18	13,29	3.8
	82,5	15,82	81,87	15,55	3.8
	82,5	18,49	80,71	18,93	3.8
05/10/99	Não processado	0,00	17,0	0,00	
	82,5	12,29	82,16	11,45	3.8
	82,5	15,82	82,24	14,93	3.8
	82,5	13,87	82,14	13,09	3.8
09/11/99	Não processado	0,00	21,4	0,00	
	82,5	43,91	82,37	42,11	3.8
	82,5	50,09	82,22	47,93	3.8
	82,5	58,55	81,97	59,95	3.8
16/11/99	Não processado	0,00	18,4	0,00	
	82,5	11,09	80,76	11,54	3.8
	82,5	13,87	81,54	13,28	3.8
	82,5	18,49	81,42	19,65	3.8
24/11/99	Não processado	0,00	24,0	0,00	
	82,5	13,87	82,18	11,79	3.8
	82,5	15,82	82,05	14,95	3.8
	82,5	18,49	82,18	17,69	3.8
25/11/99	Não processado	0,00	24,3	0,00	
	85,0	43,91	84,70	36,30	3.8
	85,0	50,09	84,80	44,48	3.8
	85,0	58,55	84,44	60,13	3.8
01/12/99	Não processado	0,00	25,5	0,00	
	87,0	43,91	83,81	39,29	3.9
	87,0	50,09	83,25	44,38	3.9
	87,0	58,55	83,75	56,93	3.9
02/12/99	Não processado	0,00	23,2	0,00	
	85,0	13,87	84,43	12,11	3.8

Ensaio	T °C	Tempo s	T real °C	Tempo real s	Arranjos Fig nº
02/12/99	85,0	15,82	84,77	13,98	3.8
	85,0	18,49	84,17	16,99	3.8
07/12/99	Não processado	0,00	23,2	0,00	
	87,0	43,91	86,55	38,29	3.9*
	87,0	50,09	86,77	44,79	3.9*
	87,0	58,55	86,55	58,17	3.9*
11/01/00	Não processado	0,00	24,9	0,00	
	87,0	11,09	86,12	9,88	3.9*
	87,0	13,87	86,24	12,87	3.9*
	87,0	18,49	85,55	16,62	3.9*
18/01/00	Não processado	0,00	26,1	0,00	
	85,0	11,09	81,34	8,29	3.8
	85,0	13,87	83,89	9,48	3.8
	85,0	18,49	83,92	11,55	3.8
08/02/00	Não processado	0,00	23,5	0,00	
	87,0	35,13	84,55	23,58	3.9*
	87,0	43,91	85,51	30,95	3.9*
	87,0	50,09	86,06	37,32	3.9*

T: temperatura de pasteurização pré-estabelecida

Tempo: tempo de retenção pré-estabelecido

T real: temperatura de pasteurização média real

Tempo real: tempo de retenção real calculado a partir da medição da vazão mássica

* aumento do arranjo para 10 de 1/ 10 de 1 na seção de regeneração

Como exemplo, a Tabela 4.9 mostra os dados obtidos na aquisição já corrigidos, durante ensaio de pasteurização de suco de laranja, utilizando o arranjo de placas ilustrado na Figura 3.8, ou seja, 6 de 1/ 6 de 1 na seção de regeneração, com o speed dial na posição 6.

TABELA 4.9: Dados de temperatura adquiridos através do Data Logger FT 43a-90 e de termômetro calibrado, para o ensaio com suco de laranja, na seção de regeneração, com o arranjo de placas 6 de 1/ 6 de 1, ilustrado na Figura 3.8.

Ensaio:		Arranjo: 6 de 1/ 6 de 1		
FT43a-90		Date:	2nd Dec 1999	
Time:	Suco de laranja Frio		Suco de laranja Quente	
	T_{e2} °C	T_{e1} °C	T_{h1} °C	T_{h2} °C
2:00:27 PM	63,46396	19,20000	84,77744	40,51348
2:00:37 PM	63,24484	19,20000	84,69794	40,65310
2:00:47 PM	63,09544	19,20000	84,12153	40,22609
2:00:57 PM	62,95600	19,20000	83,68426	39,92826
2:01:07 PM	62,87632	19,20000	83,60476	39,92844
2:01:17 PM	62,95600	19,20000	82,80972	39,05372
2:01:27 PM	62,87632	19,20000	82,87928	39,20296
2:01:37 PM	63,39424	19,20000	82,80972	38,61548
2:01:47 PM	63,46396	19,20000	82,66065	38,39669
2:01:57 PM	63,75280	19,20000	82,44201	37,88921
2:02:07 PM	63,61336	19,20000	82,44201	38,02865
2:02:17 PM	63,46396	19,20000	82,94885	38,68489
2:02:27 PM	63,83248	19,20000	83,90290	39,27042
2:02:37 PM	63,97192	19,20000	84,12153	39,34961
2:02:47 PM	63,46396	19,20000	83,75383	39,48987
2:02:57 PM	63,39424	19,20000	83,97246	39,77822
2:03:07 PM	63,17512	19,20000	84,12153	40,14641
2:03:17 PM	63,17512	19,20000	84,12153	40,14641
2:03:27 PM	63,53368	19,20000	84,34017	40,00649
2:03:37 PM	63,83248	19,20000	84,55880	39,92632
2:03:47 PM	63,97192	19,20000	84,84701	40,07509
2:03:57 PM	63,83248	19,20000	84,34017	39,70769
2:04:47 PM	63,24484	19,20000	84,26066	40,21582
2:04:57 PM	63,53368	19,20000	84,69794	40,36426
2:05:07 PM	63,46396	19,20000	84,62837	40,36441
2:05:17 PM	63,61336	19,20000	84,26066	39,84730
2:05:27 PM	63,53368	19,20000	84,47930	40,14562

Ensaio:		Arranjo: 6 de 1/ 6 de 1		
FT43a-90	Date:	2nd Dec 1999		
	Suco de laranja Frio		Suco de laranja Quente	
Time:	T _{e2}	T _{e1}	T _{h1}	T _{h2}
	°C	°C	°C	°C
2:05:37 PM	63,53368	19,20000	83,60476	39,27108
2:05:47 PM	63,53368	19,20000	83,90290	39,56922
2:05:57 PM	63,75280	19,20000	84,04203	39,48923
2:06:07 PM	63,39424	19,20000	83,82339	39,62915
2:06:17 PM	63,68308	19,20000	83,82339	39,34031
2:06:27 PM	63,39424	19,20000	82,87928	38,68504
2:06:37 PM	63,53368	19,20000	82,44201	38,10833
2:06:47 PM	63,61336	19,20000	83,75383	39,34047
2:06:57 PM	63,53368	19,20000	84,47930	40,14562
2:07:07 PM	63,46396	19,20000	84,40973	40,14577
2:07:17 PM	63,31456	19,20000	84,12153	40,00697
2:07:27 PM	63,31456	19,20000	84,40973	40,29517
2:07:37 PM	63,31456	19,20000	84,69794	40,58338
2:07:47 PM	63,46396	19,20000	84,69794	40,43398
2:07:57 PM	63,83248	19,20000	84,77744	40,14496
2:08:07 PM	63,75280	19,20000	84,77744	40,22464
2:08:17 PM	63,31456	19,20000	84,47930	40,36474
2:08:27 PM	63,02572	19,20000	84,77744	40,95172
2:08:37 PM	62,87632	19,20000	84,77744	41,10112
2:08:47 PM	62,95600	19,20000	84,99608	41,24008
2:08:57 PM	62,87632	19,20000	84,40973	40,73341
2:09:07 PM	62,80660	19,20000	84,55880	40,95220
2:09:17 PM	62,95600	19,20000	84,47930	40,72330
2:09:27 PM	63,31456	19,20000	84,91657	40,80201
2:09:37 PM	63,31456	19,20000	84,69794	40,58338
2:09:47 PM	63,31456	19,20000	84,47930	40,36474
2:09:57 PM	62,80660	19,20000	84,69794	41,09134
2:10:07 PM	62,58748	19,20000	84,47930	41,09182
2:10:17 PM	62,43808	19,20000	84,69794	41,45986
2:10:27 PM	62,36836	19,20000	84,84701	41,67865
2:10:37 PM	62,51776	19,20000	84,84701	41,52925
2:10:47 PM	62,95600	19,20000	84,84701	41,09101
2:10:57 PM	62,73688	19,20000	84,4793	40,94242

Ensaio:		Arranjo: 6 de 1/ 6 de 1			
FT43a-90		Date:		2nd Dec 1999	
		Suco de laranja Frio		Suco de laranja Quente	
Time:	T _{c2}	T _{c1}	T _{h1}	T _{h2}	
	°C	°C	°C	°C	
2:11:07 PM	62,21896	19,20000	84,69794	41,67898	
2:11:17 PM	61,86040	19,20000	84,62837	41,96797	
2:11:27 PM	62,21896	19,20000	84,4793	41,46034	
2:11:37 PM	62,21896	19,20000	83,97246	40,9535	
2:11:47 PM	62,43808	19,20000	83,60476	40,36668	
2:11:57 PM	62,58748	19,20000	83,9029	40,51542	
Média	°C 63,24754	19,20000	84,17435	40,12680	
Desvio padrão	°C 0,496629	0	0,678337	0,888533	

4.3.2 Análises físico-químicas do suco de laranja:

A Tabela 4.10 apresenta os valores médios obtidos nas análises da acidez titulável expressa em % de ácido cítrico, ° Brix corrigido pela temperatura e pela acidez, pH, teor de sólidos insolúveis, teor de sólidos totais, teor de polpa e a razão da atividade da enzima pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da enzima no suco não processado.

TABELA 4.10: Valores médios obtidos nas análises da acidez titulável, ° Brix, pH, teor de sólidos insolúveis, teor de sólidos totais, teor de polpa e a razão da atividade da enzima pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da enzima no suco não processado.

Ensaio	T	t	T _r	t _r	Acidez	Brix	pH	S.I.	S.T.	Polpa	PEU/ PEU ₀
	°C	s	°C	s	%	°		%	%	%	
20/07/99	Nat	0,00	19,70	0,00	0,92	10,96	3,73	0,14	11,15	-	1,00E+00
					0,88	10,75	3,66	0,13	10,92	-	1,00E+00
	82,5	11,09	82,12	10,81	0,89	9,76	3,66	0,20	10,09	-	3,22E-02
					0,93	10,16	3,66	0,20	10,06	-	1,85E-02
	82,5	13,87	82,24	14,10	0,86	11,25	3,71	0,24	11,19	-	1,71E-02
					0,86	10,85	3,74	0,22	11,07	-	1,10E-02
82,5	18,49	82,19	20,35	0,84	11,35	3,69	0,18	11,13	-	1,19E-02	
				0,82	11,14	3,76	0,24	11,22	-	6,02E-03	
27/07/99	Nat	0,00	19,20	0,00	0,58	10,10	3,86	0,24	10,13	-	1,00E+00
					0,57	9,79	3,86	0,14	10,11	-	1,00E+00
	85,0	11,09	84,26	10,55	0,61	9,90	3,92	0,16	9,74	-	1,09E-02
					0,61	9,70	3,92	0,12	9,73	-	1,05E-02
	85,0	13,87	84,25	13,56	0,64	9,71	3,89	0,20	20,27	-	2,21E-03
					0,64	9,81	3,89	0,16	9,95	-	4,63E-03
85,0	18,49	84,64	17,97	0,64	9,91	3,86	0,23	9,93	-	1,30E-03	
				0,65	9,61	3,86	0,14	10,01	-	1,21E-03	
03/08/99	Nat,	0,00	17,00	0,00	0,87	10,25	3,44	0,25	11,62	-	1,00E+00
					0,82	10,14	3,46	0,23	11,65	-	1,00E+00
	82,5	35,13	82,21	32,72	0,78	10,53	3,48	0,26	10,98	-	1,28E-02
					0,79	10,54	3,50	0,20	11,07	-	1,34E-02
	82,5	43,91	82,33	42,41	0,79	10,64	3,47	0,27	11,14	-	7,48E-03
					0,77	10,83	3,47	0,22	11,27	-	5,87E-03
82,5	58,55	82,21	59,49	0,82	10,34	3,43	0,21	11,54	-	1,46E-03	
				0,85	10,25	3,44	0,25	11,52	-	1,52E-03	
10/08/99	Nat	0,00	18,10	0,00	0,51	10,70	3,83	0,18	10,96	-	1,00E+00
					0,52	10,80	3,85	0,16	11,05	-	1,00E+00
	85,0	35,13	82,93	32,31	0,49	9,79	3,91	0,24	11,40	-	1,47E-02

Ensaio	T	t	T _r	t _r	Acidez	Brix	pH	S.I.	S.T.	Polpa	PEU/ PEU ₀				
	°C	s	°C	s	%	°		%	%	%					
10/08/99	85,0	43,91	83,57	42,00	0,49	10,59	3,90	0,25	11,23	-	1,12E-02				
					0,50	9,79	3,87	0,26	11,23	-	8,86E-03				
	85,0	58,55	84,31	57,16	0,52	10,50	3,89	0,19	10,88	-	4,97E-03				
					0,52	10,60	3,90	0,22	10,82	-	4,66E-03				
17/08/99	Nat	0,00	14,80	0,00	0,90	10,29	3,35	0,21	11,58	-	1,00E+00				
					0,86	9,69	3,34	0,20	11,13	-	1,00E+00				
	87,0	43,91	86,93	44,11	0,84	9,88	3,33	0,22	11,20	-	2,39E-04				
					0,84	9,78	3,34	0,20	11,02	-	1,04E-03				
	87,0	50,09	86,81	48,34	0,87	9,79	3,31	0,18	11,23	-	6,74E-04				
					0,87	9,89	3,31	0,27	11,20	-	1,09E-03				
	87,0	58,55	86,53	56,18	0,81	9,78	3,32	0,24	11,16	-	1,41E-03				
					0,81	9,88	3,32	0,20	11,14	-	1,46E-03				
14/09/99					Nat	0,00	19,70	0,00	0,60	10,21	3,93	0,29	10,36	-	1,00E+00
									0,60	10,31	3,86	0,25	10,63	-	1,00E+00
87,0	13,87	85,17	13,62	0,58	10,50	3,87	0,23	10,79	-	3,91E-03					
				0,61	10,61	3,89	0,15	10,80	-	3,81E-03					
87,0	15,82	86,20	15,95	0,61	10,51	3,88	0,19	10,64	-	9,95E-04					
				0,60	10,51	3,88	0,21	10,66	-	1,21E-03					
87,0	18,49	86,37	19,43	0,59	10,60	3,89	0,19	10,73	-	6,85E-04					
				0,58	10,60	3,90	0,22	10,78	-	6,68E-05					
				21/09/99	Nat	0,00	20,6	0,00	0,47	10,25	4,10	0,30	11,50	-	1,00E+00
									0,47	10,45	4,09	0,47	11,52	-	1,00E+00
85,0	12,29	84,63	11,43	0,47	10,55	4,11	0,37	11,63	-	6,28E-03					
				0,47	10,65	4,10	0,41	11,58	-	3,93E-03					
85,0	13,87	84,33	12,08	0,47	10,45	4,12	0,33	11,47	-	1,29E-03					
				0,46	10,55	4,11	0,41	11,36	-	1,42E-03					
85,0	15,82	84,04	16,21	0,44	10,45	4,10	0,46	11,52	-	1,70E-03					
				0,48	10,55	4,10	0,28	11,49	-	3,85E-03					
85,0	21,34	83,78	23,90	0,45	10,54	4,14	0,34	11,50	-	0,00					
				0,45	10,45	4,13	0,35	11,57	-	0,00					
29/09/99	Nat.	0,00	20,5	0,00	0,52	10,21	4,03	0,37	11,40	-	1,00E+00				

Ensaio	T	t	T _r	t _r	Acidez	Brix	pH	S.I.	S.T.	Polpa	PEU/ PEU ₀
	°C	s	°C	s	%	°		%	%	%	
29/09/99	Nat.	0,00	20,5	0,00	0,51	10,61	3,95	0,40	11,82	-	1,00E+00
	82,5	12,29	79,18	13,29	0,53	10,41	4,00	0,27	11,62	-	1,77E-02
					0,52	10,51	4,02	0,14	11,66	-	1,71E-02
	82,5	15,82	81,87	15,55	0,52	10,22	3,99	0,37	11,49	-	1,82E-02
					0,53	10,24	4,01	0,27	11,40	-	1,17E-02
	82,5	18,49	80,71	18,93	0,59	10,53	3,93	0,20	11,62	-	7,85E-03
0,56					10,42	3,93	0,17	11,59	-	4,52E-03	
05/10/99	Nat.	0,00	17,0	0,00	0,58	10,35	3,83	0,17	10,74	-	1,00E+00
	82,5	12,29	82,16	11,45	0,58	10,45	3,86	0,18	10,51	-	1,00E+00
					0,56	10,65	3,82	0,23	10,92	-	1,02E-02
	82,5	13,87	82,12	13,09	0,59	10,45	3,80	0,22	10,70	-	5,32E-03
					0,57	10,35	3,82	0,31	10,76	-	2,52E-03
	82,5	15,82	82,24	14,93	0,57	10,55	3,80	0,14	10,68	-	3,66E-03
0,57					10,45	3,79	0,15	10,65	-	1,24E-03	
				0,57	10,55	3,79	0,14	10,65	-	0,00	
09/11/99	Nat.	0,00	21,4	0,00	0,55	10,26	3,92	0,47	10,67	13,63	1,00E+00
	82,5	43,91	82,37	42,11	0,62	10,08	3,85	0,36	11,26	13,87	1,00E+00
					0,61	9,78	3,90	0,36	13,40	11,75	6,18E-03
	82,5	50,09	82,22	47,94	0,61	9,88	3,90	0,32	10,67	10,55	9,21E-03
					0,58	9,87	3,88	0,35	11,10	12,95	1,58E-03
	82,5	58,55	81,97	59,95	0,57	9,87	3,88	0,32	11,12	12,23	2,87E-03
0,58					9,97	3,89	0,35	10,17	12,47	3,03E-03	
				0,59	9,87	3,89	0,37	11,06	11,99	5,09E-03	
16/11/99	Nat.	0,00	18,4	0,00	0,37	12,44	4,40	0,37	12,86	14,60	1,00E+00
	82,5	11,09	80,76	11,54	0,37	12,44	4,38	0,55	12,77	14,36	1,00E+00
					0,33	12,13	4,41	0,50	12,22	12,63	5,11E-03
	82,5	13,87	81,54	13,28	0,33	12,23	4,40	0,61	12,31	13,13	6,35E-03
					0,31	12,03	4,47	0,38	12,01	12,88	7,30E-03
	82,5	18,49	81,42	19,65	0,31	12,03	4,47	0,48	12,05	12,12	8,02E-03
0,31					12,03	4,47	0,53	12,03	14,39	6,03E-03	
				0,32	11,93	4,47	0,66	11,93	13,64	5,98E-03	

Ensaio	T	t	T_r	t_r	Acidez	Brix	pH	S.I.	S.T.	Polpa	PEU/ PEU₀	
	°C	s	°C	s	%	°		%	%	%		
24/11/99	Nat.	0,00	24,0	0,00	0,75	10,88	3,60	0,36	11,54	12,20	1,00E+00	
					0,74	11,08	3,60	0,45	11,20	11,95	1,00E+00	
	82,5	13,87	82,19	11,79	0,62	11,66	3,79	0,41	11,99	9,73	6,08E-03	
					0,63	11,66	3,80	0,41	12,02	10,22	1,17E-02	
	82,5	15,82	82,05	14,95	0,71	11,47	3,65	0,31	11,73	9,00	6,82E-03	
					0,71	11,17	3,65	0,39	11,46	8,76	5,26E-03	
	82,5	18,49	82,18	17,69	0,76	10,98	3,60	0,39	11,19	9,27	3,08E-03	
					0,75	11,08	3,60	0,32	10,86	9,51	1,46E-03	
	25/11/99	Nat.	0,00	24,3	0,00	0,88	11,90	3,46	0,45	11,13	15,56	1,00E+00
						0,88	11,70	3,46	0,41	11,77	15,31	1,00E+00
85,0		43,91	84,70	36,30	0,60	12,25	3,93	0,32	12,17	12,25	5,30E-03	
					0,59	12,24	3,93	0,40	12,30	12,50	5,00E-03	
85,0		50,09	84,80	44,48	0,65	12,15	3,88	0,85	12,15	12,01	4,39E-03	
					0,61	12,15	3,89	0,59	12,34	12,50	3,42E-03	
85,0		58,55	84,44	60,13	0,63	12,15	3,86	0,58	12,40	14,07	2,66E-03	
					0,63	12,25	3,86	0,56	12,28	14,81	8,57E-04	
01/12/99		Nat.	0,00	25,5	0,00	0,72	10,64	3,66	0,44	11,02	12,80	1,00E+00
						0,72	10,64	3,67	0,52	10,98	13,29	1,00E+00
	87,0	43,91	83,81	39,29	0,68	10,23	3,67	0,30	11,31	10,00	1,00E-02	
					0,68	10,74	3,67	0,26	11,33	10,24	1,05E-02	
	87,0	50,09	83,25	44,38	0,63	10,63	3,75	0,25	11,03	9,27	1,17E-02	
					0,64	10,43	3,75	0,33	11,28	9,76	8,92E-03	
	87,0	58,55	83,75	56,93	0,63	10,23	3,75	0,23	10,59	10,63	8,46E-03	
					0,64	10,23	3,73	0,34	10,52	10,14	1,63E-02	
	02/12/99	Nat.	0,00	23,2	0,00	0,91	12,11	3,43	0,50	12,06	14,32	1,00E+00
						0,87	12,31	3,43	0,47	12,16	14,08	1,00E+00
85,0		13,87	84,43	12,11	0,70	11,67	3,62	0,39	11,57	10,92	3,62E-03	
					0,69	11,97	3,64	0,36	11,58	10,44	2,70E-03	
85,0		15,82	84,77	13,98	0,78	11,89	3,44	0,38	12,18	10,68	0,00	
					0,85	11,70	3,44	0,30	12,19	10,92	0,00	
85,0		18,49	84,17	16,99	0,90	12,01	3,43	0,32	12,16	11,65	1,13E-04	

Ensaio	T	t	T _r	t _r	Acidez	Brix	pH	S.I.	S.T.	Polpa	PEU/ PEU ₀
	°C	s	°C	s	%	°		%	%	%	
02/12/99	85,0	18,49	84,17	16,99	0,87	12,20	3,45	0,38	12,35	11,17	0,00
07/12/99	Nat.	0,00	23,2	0,00	0,75	12,27	3,58	-	-	11,59	-
					0,73	12,07	3,58			11,11	
	87,0	43,91	86,55	38,29	0,74	12,10	3,59	-	-	8,78	-
					0,75	12,17	3,60			8,78	
	87,0	50,09	86,77	44,79	0,76	11,88	3,55	-	-	9,02	-
					0,75	11,87	3,55			9,02	
	87,0	58,55	86,55	58,17	0,76	12,18	3,55	-	-	9,18	-
					0,77	11,98	3,55			9,42	
11/01/00	Nat.	0,00	24,9	0,00	0,64	11,81	3,88	0,39	12,42	15,37	1,00E+00
					0,69	12,02	3,86	0,60	12,47	12,93	1,00E+00
	87,0	11,09	86,12	9,88	0,60	12,03	3,88	0,41	12,07	11,68	6,23E-03
					0,59	12,07	3,88	0,42	12,03	11,19	8,20E-03
	87,0	13,87	86,24	12,87	0,62	11,61	3,85	0,38	11,95	11,19	3,30E-03
					0,62	11,60	3,86	0,36	11,95	12,90	3,14E-03
	87,0	18,49	85,55	16,62	0,64	11,81	3,87	0,36	12,05	10,98	1,79E-03
					0,62	11,80	3,86	0,24	12,03	10,49	2,27E-03
18/01/00	Nat.	0,00	26,1	0,00	0,48	12,65	3,88	0,38	12,42	18,00	1,00E+00
					0,46	12,65	3,86	0,60	12,47	19,00	1,00E+00
	85,0	11,09	81,34	8,29	0,44	12,55	3,88	0,24	12,03	14,49	4,91E-02
					0,45	12,55	3,88	0,36	12,05	15,22	4,60E-02
	85,0	13,87	83,89	9,48	0,43	12,54	3,85	0,35	11,95	13,77	3,41E-02
					0,46	12,45	3,85	0,38	11,95	14,01	4,21E-02
	85,0	18,49	83,92	11,55	0,44	12,45	3,87	0,42	12,03	14,50	2,51E-02
					0,43	12,24	3,86	0,40	12,07	14,00	2,77E-02
08/02/00	Nat.	0,00	23,5	0,00	0,44	10,59	4,04	0,59	11,07	17,32	1,00E+00
					0,44	10,79	4,01	0,57	11,06	17,56	1,00E+00
	87,0	35,13	84,55	23,58	0,42	10,58	4,03	0,43	10,90	16,54	2,68E-02
					0,42	10,58	4,03	0,48	10,91	16,05	2,81E-02
	87,0	43,91	85,51	30,95	0,41	10,58	4,05	0,59	11,01	16,54	1,42E-02
					0,41	10,58	4,07	0,44	11,09	15,80	1,40E-02

Ensaio	T	t	T _r	t _r	Acidez	Brix	pH	S.I.	S.T.	Polpa	PEU/ PEU ₀
	°C	s	°C	s	%	°		%	%	%	
08/02/00	87,0	50,09	86,06	37,32	0,41	10,68	4,04	0,46	10,78	14,39	5,08E-03
					0,42	10,48	4,03	0,66	10,71	14,88	7,67E-03

T:	temperatura de pasteurização pré-estabelecida
t:	tempo de retenção pré-estabelecido
T _r :	temperatura de pasteurização média real
t _r :	tempo de retenção real calculado a partir da medição da vazão mássica
Acidez %:	acidez titulável expressa em % de ácido cítrico
° Brix:	valor corrigido pela Temperatura e Acidez
S.I. %:	% de sólidos insolúveis
S.T. %:	% de sólidos totais
PEU/PEU ₀ :	Relação da atividade da enzima pectinesterase do suco processado em função da atividade da enzima presente no suco natural não processado, expressa como Unidades/ ml de suco °Brix.

Análise de variância foi realizada para verificação de quais fatores influenciaram significativamente os resultados das análises físico-químicas.

A análise estatística indicou que os valores de acidez expressa como porcentagem de ácido cítrico variaram de 0,54 a 0,74 % nas diferentes temperaturas de pasteurização e de 0,49 a 0,84 % conforme o tempo de retenção empregado. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $0,63 \pm 0,14$ % . O Quadro 4.1 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados da porcentagem de acidez, indicando que a temperatura influenciou estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.1: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de acidez expressa como % de ácido cítrico do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	0,1487	2	0,0743	3,68	0,0285
Tempo	0,2999	8	0,0375	1,86	0,0747
Resíduo	2,1200	105	0,0202		
TOTAL (corrigido)	2,6113	115			

Apesar da temperatura ter influenciado a acidez do suco, conforme indica a ANOVA, a variabilidade da acidez provavelmente ocorreu devido a variação da matéria-prima, uma vez que o suco foi extraído e processado sem a preocupação de padronizar a relação Brix/ acidez.

A análise estatística indicou que os valores do Brix expresso como porcentagem de sólidos solúveis variaram de 10,47 a 11,39 °Brix nas diferentes temperaturas de pasteurização e de 9,01 a 11,99 °Brix conforme o tempo de retenção empregado. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $10,88 \pm 0,85$ °Brix . O Quadro 4.2 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados de graus Brix, indicando que o tempo de retenção influenciou estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.2: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de graus Brix expresso como % de sólidos solúveis do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	1,2501	2	0,6250	0,87	0,4226
Tempo	12,3846	8	1,5481	2,15	0,0373
Resíduo	75,5792	105	0,7198		
TOTAL (corrigido)	88,9633	115			

A variabilidade do valor de Brix do suco, pode ser explicada pelo fato que quanto menor o tempo de retenção, maior foi a velocidade mássica no canal formado pela corrente do fluido entre duas placas, provocando um atrito entre as partículas do suco e a parede da placa. Em consequência disso, houve para maiores velocidades mássica, maior quebra da polpa e com isso aumentando o valor do teor de sólidos solúveis, lido pelo índice refratométrico. Os valores médios do Brix diminuíram com o aumento do tempo de retenção.

A análise estatística indicou que os valores de pH do suco de laranja natural variaram de 3,58 a 3,92 nas diferentes temperaturas de pasteurização e de 3,40 a 4,04 conforme o tempo de retenção empregado. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $3,78 \pm 0,23$. O Quadro 4.3 apresenta o resultado da ANOVA

aplicada nos resultados do pH, indicando que tanto a temperatura de pasteurização, quanto o tempo de retenção influenciaram estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.3: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do pH do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	0,4421	2	0,2210	4,25	0,0168
Tempo	1,0963	8	0,1370	2,64	0,0113
Resíduo	5,4599	105	0,0520		
TOTAL (corrigido)	7,3210	115			

Esta variabilidade do valor de pH do suco provavelmente se deve a própria variação da matéria-prima laranja.

A análise estatística indicou que os valores do teor de sólidos insolúveis variou de 0,23 % a 0,39 % nas diferentes temperaturas de pasteurização e de 0,16 % a 0,47 % conforme o tempo de retenção empregado. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $0,32 \pm 0,13$ % . O Quadro 4.4 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados do teor de sólidos insolúveis, indicando que nenhum fator influenciou estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.4: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do teor de sólidos insolúveis (%) do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	0,0447	2	0,0224	1,32	0,2715
Tempo	0,1465	8	0,0183	1,08	0,3841
Resíduo	1,6800	99	0,0170		
TOTAL (corrigido)	1,8752	109			

A análise estatística indicou que os valores do teor de sólidos totais variou de 10,72 % a 11,90 % nas diferentes temperaturas de pasteurização e de 10,15 % a 12,51 % conforme o tempo de retenção empregado. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $11,39 \pm 1,09$ %. O Quadro 4.5 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados do teor de sólidos totais, indicando que nenhum fator influenciou estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.5: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do teor de sólidos totais (%) do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	1.4946	2	0.7473	0.63	0.5368
Tempo	6.8301	8	0.8538	0.72	0.6776
Resíduo	118.183	99	1.1938		
TOTAL (corrigido)	127.029	109			

Tanto o teor de sólidos insolúveis quanto o teor de sólidos totais não foram influenciados pelos fatores, ou seja, pelos parâmetros do processo. A não variabilidade pode ser justificada pelos valores altos do quadrado médio do resíduo, de modo que a variabilidade da matéria-prima não foi detectada devido ao erro experimental.

A análise estatística indicou que os valores do teor polpa do suco processado em relação ao teor de polpa do suco não processado variaram de 0,77 a 0,89 nas diferentes temperaturas de pasteurização e de 0,72 a 0,99 conforme o tempo de retenção empregado. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $0,83 \pm 0,05$. O Quadro 4.6 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados do teor de polpa, indicando que ambos os fatores influenciaram estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.6: Análise de variância aplicada nos valores obtidos do teor de polpa (%) do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	0,00221	2	0,0111	4,16	0,0218
Tempo	0,1359	8	0,0170	6,39	0,0000
Resíduo	0,12223	46	0,0027		
TOTAL (corrigido)	0,2900	56			

Observando a Figura 4.5 a razão do teor de polpa diminuiu conforme aumentou a temperatura de pasteurização. No entanto houve um espalhamento importante dos valores da razão da polpa em função do tempo de retenção, como ilustra a Figura 4.6. Estas variações podem ser explicadas devido a quebra das partículas da polpa com a velocidade e mudança da direção do suco escoando no canal formado entre duas placas do trocador.

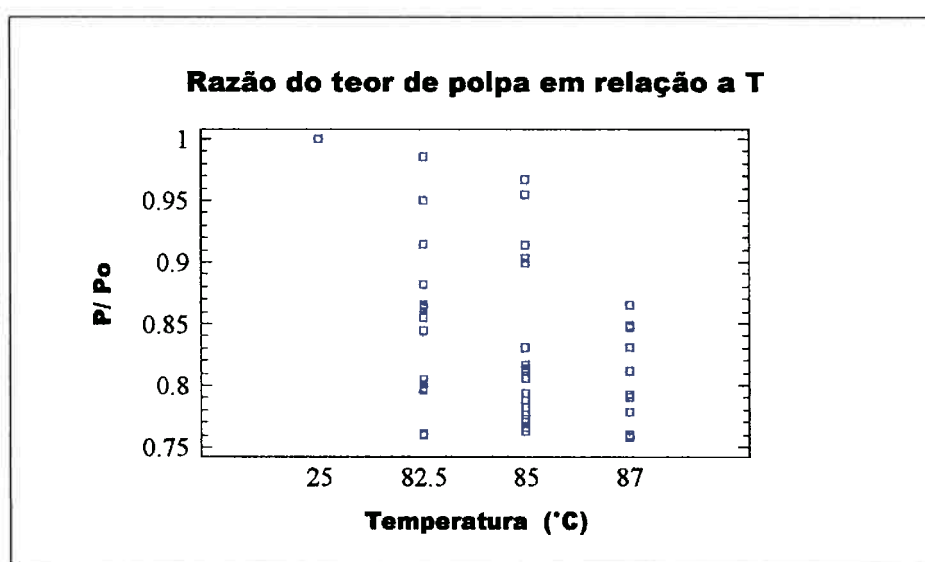


FIGURA 4.5: Variabilidade da razão do teor de polpa do suco processado em relação ao teor de polpa do suco não processado, em função da temperatura de pasteurização.

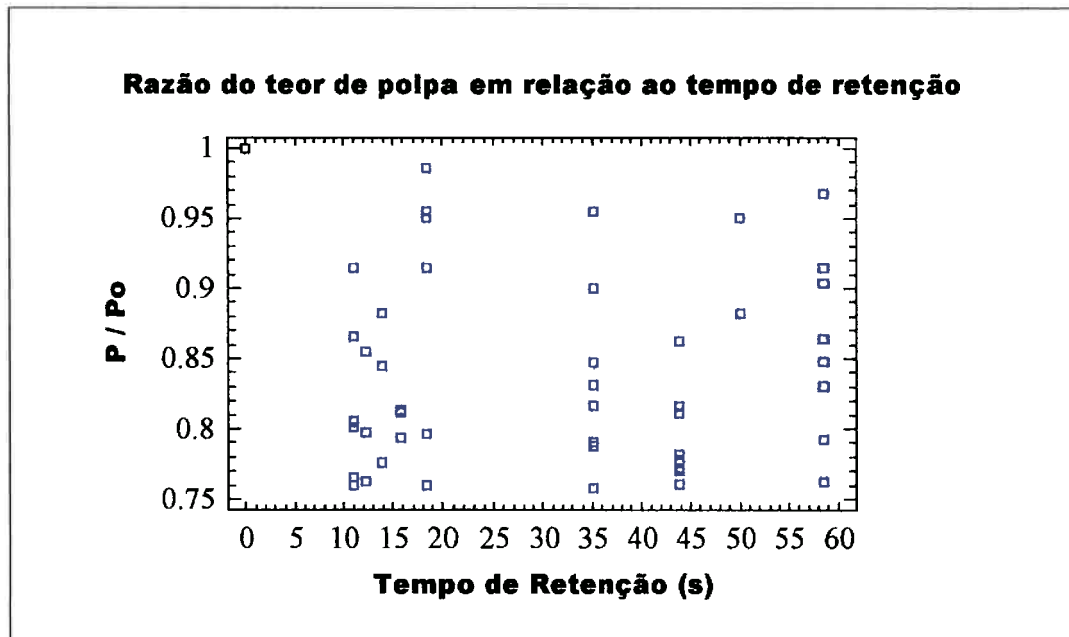


FIGURA 4.6: Variabilidade da razão do teor de polpa do suco processado em relação ao teor de polpa do suco não processado, em função do tempo de retenção.

A análise estatística indicou que os valores da atividade da enzima pectinesterase do suco processado em relação a atividade da enzima do suco não processado, razão PEU/PEU_0 , variou de $1,0228E-03$ a $8,9627E-03$ nas diferentes temperaturas de pasteurização e de $4,4723E-04$ a $1,3116E-02$ conforme o tempo de retenção empregado. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $5,0759E-03 \pm 3,950E-03$. O Quadro 4.7 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados da razão PEU/PEU_0 , indicando que nenhum fator influenciou estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 %, confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.7: Análise de variância aplicada nos valores obtidos da razão PEU/PEU₀ do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	3,1297E-04	2	1,5648E-04	10,03	0,0001
Tempo	6,5870E-04	8	8,2337E-05	5,28	0,0000
Resíduo	1,3733E-03	88	1,5606E-05		
TOTAL (corrigido)	2,3126E-03	98			

PEU: atividade da enzima pectinesterase no suco de laranja natural processado PEU/mL °Brix
 PEU₀: atividade da enzima pectinesterase no suco de laranja natural não-processado PEU₀/mL °Brix

4.4 Parâmetros reológicos do Suco de Laranja

A Figura 4.7 mostra, como exemplo, os reogramas do Suco de Laranja Natural referentes ao ensaio do dia 9 de novembro de 1999. As curvas obtidas da Tensão de Cisalhamento em função da velocidade de cisalhamento foram geradas a partir dos dados adquiridos no Reômetro BROOKFIELD, modelo RDV – III, programável através do programa RHEOCALC v. 1.1. Os ensaios foram conduzidos na mesma amostra nas seguintes temperaturas: ambiente, 30°C, 40°C, 50°C, 60°C, 70°C, 75°C, 80°C e 85 °C, utilizando o adaptador UL acoplado a um banho de água termostaticado, simulando as condições do processo de pasteurização.

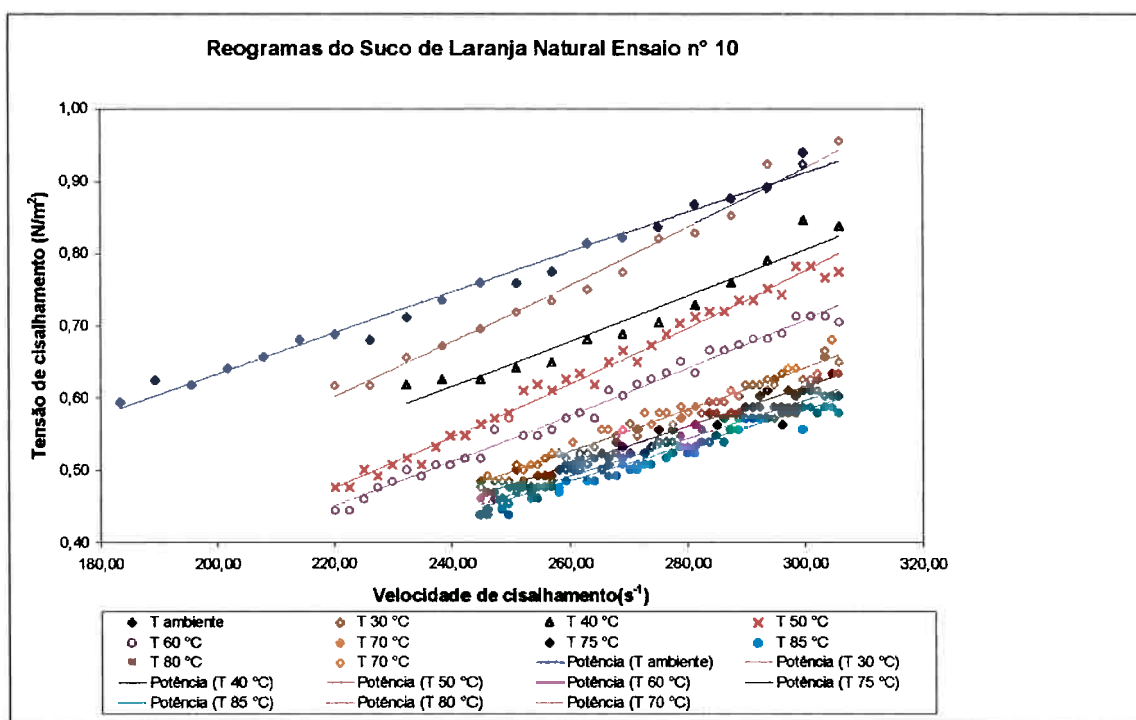


FIGURA 4.7: Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes ao ensaio do dia 9 de novembro de 1999, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperaturas desde ambiente até 85 °C.

Os dados foram ajustados e a Lei de Potência foi o modelo matemático que melhores resultados apresentou, para todas as temperaturas. A Tabela 4.11 apresenta os coeficientes do modelo, bem como os coeficientes de determinação encontrados nos ajustes. Como pode ser observado, para todas as temperaturas, as curvas foram obtidas

com coeficiente de determinação superior a 0,9314. O ajuste foi melhor obtido para as temperaturas inferiores a 70 °C, provavelmente porque a aquisição foi conduzida com mínima variação da temperatura da amostra, apresentando desvio padrão menor que 0,1 °C, enquanto que a temperaturas superiores, a variação da temperatura da amostra foi maior, da ordem de 0,25 °C.

TABELA 4.11: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.7, referentes ao Suco de Laranja Natural do ensaio do dia 9 de novembro de 1999.

Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Índice de Consistência K (Pa.s ⁿ)	Índice de Escoamento n	Coeficiente de Determinação R ²
20,60 (amb)	0,02	5,400E-03	0,8981	0,9838
30,53	0,05	4,000E-04	1,3599	0,9863
39,85	0,08	9,000E-04	1,1981	0,9417
49,87	0,07	1,000E-04	1,5774	0,9882
59,95	0,07	2,000E-04	1,4491	0,984
69,97	0,08	2,000E-04	1,3919	0,9721
74,95	0,19	3,000E-04	1,3597	0,9301
80,11	0,30	3,000E-04	1,3537	0,9437
85,25	0,15	4,000E-04	1,2930	0,9314

O modelo ajustado indica o comportamento reológico de escoamento dilatante, conforme indica a equação:

$$\tau = K \left(\frac{dv}{dr} \right)^n \quad (4.2)$$

onde:

- τ : tensão de cisalhamento (Pa)
 K: índice de consistência (Pa.sⁿ)
 $\frac{dv}{dr}$: velocidade de cisalhamento (s⁻¹)
 n: índice de escoamento (adimensional)

As Figuras 4.8, 4.9, 4.10 e 4.11 mostram os reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos no período entre 9 de novembro de 1999 a 18 de janeiro de 2000, a temperatura ambiente, a 40 °C, a 60 °C e a 80 °C, respectivamente.

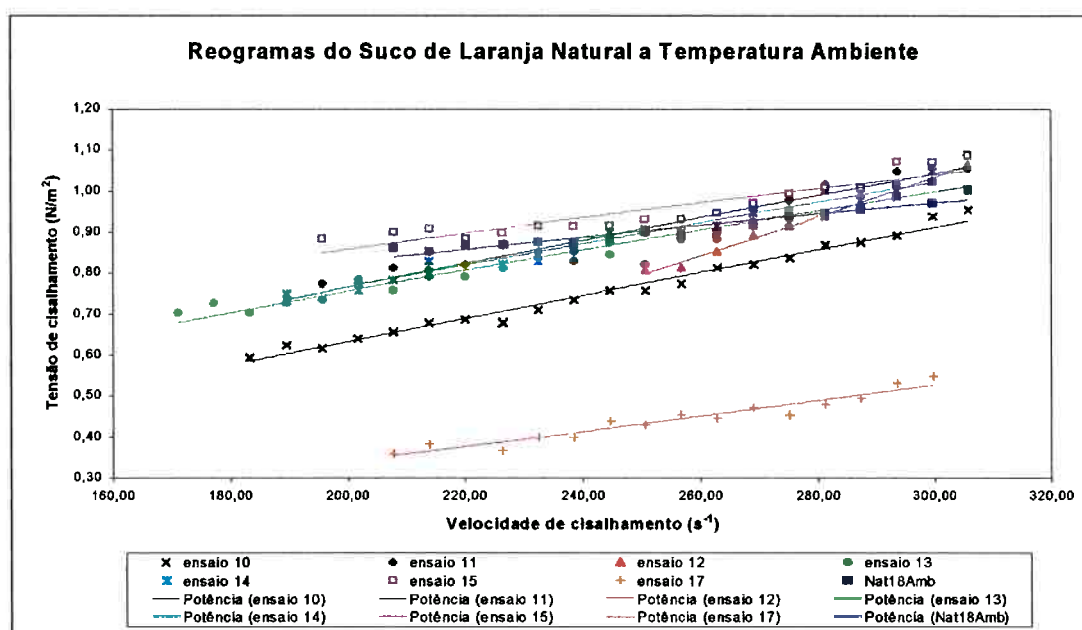


FIGURA 4.8: Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura ambiente.

As Tabelas 4.12, 4.13, 4.14 e 4.15 apresentam os coeficientes do modelo da Lei de Potência, bem como os coeficientes de determinação encontrados nos ajustes, das curvas obtidas do suco de laranja natural a temperatura ambiente, a 40 °C, a 60 °C e a 80 °C, respectivamente.

TABELA 4.12: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.8, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura ambiente.

Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Índice de Consistência K (Pa.s ⁿ)	Índice de Escoamento n	Coefficiente de Determinação R ²
20,60	0,02	5,400E-03	0,8981	0,9838
24,44	0,05	1,360E-02	0,7607	0,9726
23,41	0,08	3,000E-04	1,4407	0,9934
22,60	0,49	2,020E-02	0,6838	0,9477
25,68	0,08	1,780E-02	0,7103	0,9584
24,51	0,08	6,980E-02	0,4736	0,8490
26,15	0,27	1,200E-03	1,0645	0,9291
26,80	0,00	9,990E-02	0,3987	0,9072

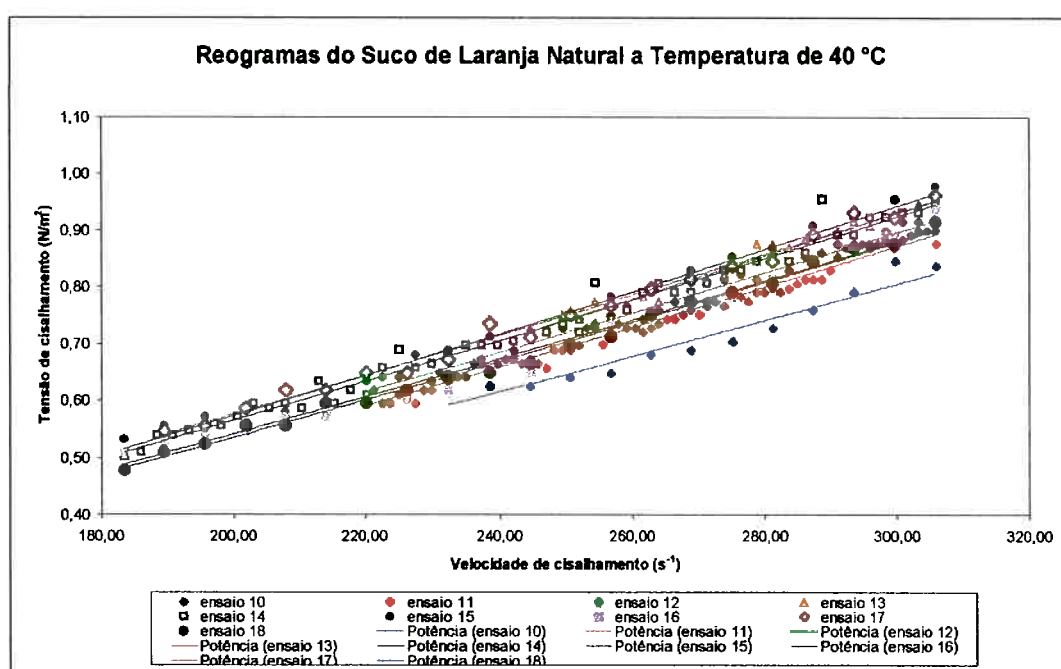


FIGURA 4.9: Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura de 40 °C.

TABELA 4.13: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.9, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura de 40 °C.

Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Índice de Consistência K (Pa.s ⁿ)	Índice de Escoamento n	Coefficiente de Determinação R ²
39,85	0,08	9,000E-04	1,1981	0,9417
40,42	0,04	7,000E-04	1,2533	0,9802
41,04	0,05	9,000E-04	1,2107	0,9720
40,25	0,05	8,000E-04	1,2399	0,9695
40,19	0,12	9,000E-04	1,2128	0,9834
40,37	0,10	9,000E-04	1,2266	0,9884
40,14	0,24	9,000E-04	1,1997	0,9799
40,16	0,25	1,100E-03	1,1819	0,9903
40,60	0,07	8,000E-04	1,2241	0,9939

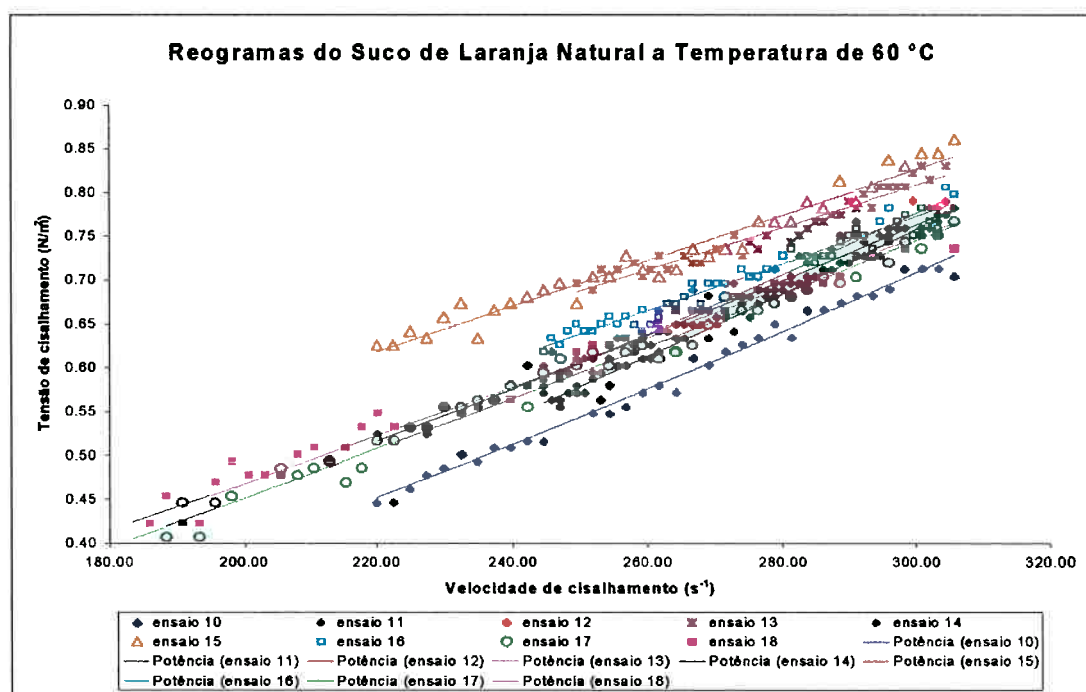


FIGURA 4.10: Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura de 60 °C.

TABELA 4.14: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.10, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura de 60 °C.

Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Índice de Consistência K (Pa.s ⁿ)	Índice de Escoamento n	Coefficiente de Determinação R ²
59,95	0,07	2,000E-04	1,4491	0,9840
59,86	0,07	2,000E-04	1,4807	0,9799
60,63	0,07	3,000E-04	1,3536	0,9568
59,91	0,06	5,300E-03	0,8827	0,9383
60,14	0,19	6,000E-04	1,2579	0,9851
60,10	0,05	4,000E-03	0,9347	0,9607
60,29	0,05	2,000E-03	1,0474	0,9606
60,56	0,06	6,000E-04	1,2360	0,9816
60,58	0,07	1,000E-03	1,1570	0,9805

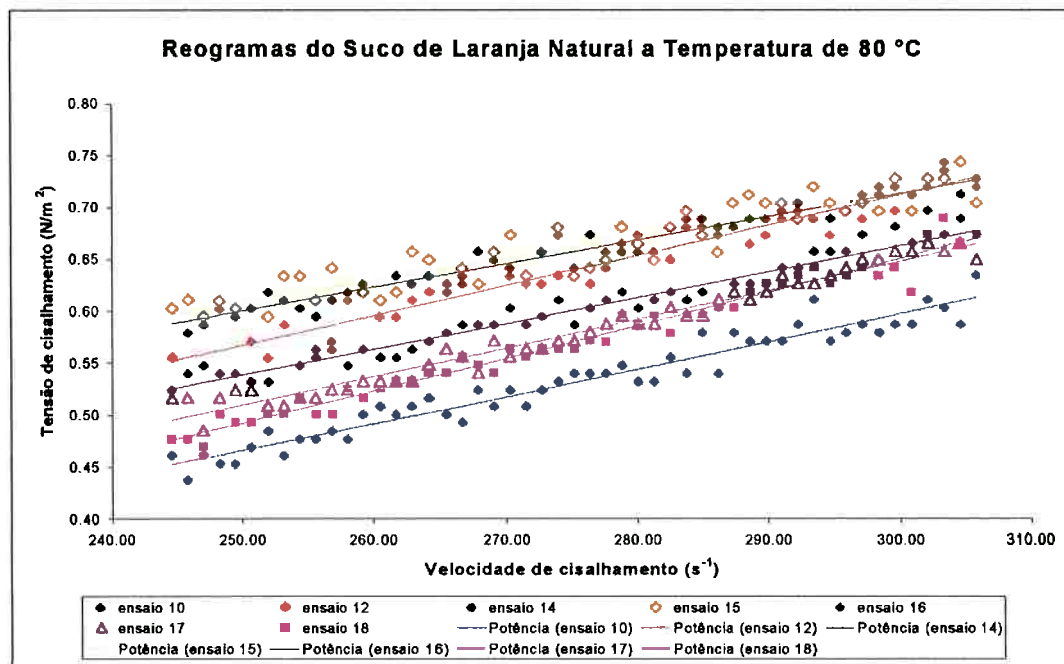


FIGURA 4.11: Reogramas do Suco de Laranja Natural referentes aos ensaios conduzidos entre 9 de novembro de 1999 e 18 de janeiro de 2000, obtidos no Reômetro BROOKFIELD, RDV-III, adaptador UL, a temperatura de 80 °C.

TABELA 4.15: Parâmetros do modelo Lei de Potência ajustado aos dados obtidos dos reogramas da Figura 4.11, referentes ao Suco de Laranja Natural a temperatura de 80 °C.

Temperatura Média (°C)	Desvio Padrão (°C)	Índice de Consistência K (Pa.s ⁿ)	Índice de Escoamento n	Coefficiente de Determinação R ²
80,11	0,30	3,000E-04	1,3537	0,9437
80,38	0,08	6,000E-04	1,2495	0,9419
80,38	0,07	3,200E-03	0,9484	0,9470
80,62	0,06	5,000E-04	0,8690	0,8539
80,48	0,08	1,000E-03	1,1363	0,9596
80,16	0,08	4,000E-04	1,3176	0,9648
80,33	0,09	1,000E-04	1,5277	0,9750

Observando os reogramas das Figuras 4.8 a 4.11, nota-se que o modelo da Lei de Potência ajusta-se bem os dados experimentais. Na Figura 4.8, os pontos experimentais referentes ao ensaio 17 geraram uma curva atípica em relação aos pontos experimentais dos outros ensaios. Provavelmente esta diferença foi causada pela maior variação da temperatura durante a aquisição, como pode ser verificado na Tabela 4.12 (desvio padrão da T de 0,27 °C). Na Figura 4.9, a temperatura de 40 °C, os pontos experimentais indicam um comportamento de escoamento bastante homogêneo entre os diferentes ensaios, apresentando comportamento ligeiramente dilatante, com o índice de escoamento maior que 1,0 (ver Tabela 4.13).

Na Figura 4.10, a temperatura de 60 °C, com exceção dos ensaios 13 e 15, os pontos experimentais indicam comportamento dilatante, enquanto que os ensaios 13 e 15 os pontos apresentaram um comportamento ligeiramente pseudoplástico, com o índice de escoamento menor que 1,0 (ver Tabela 4.14). Na Figura 4.11, a temperatura de 80 °C, com exceção dos ensaios 14 e 15, os pontos experimentais apresentaram comportamento dilatante, enquanto que nos ensaios 14 e 15, apresentaram o índice de escoamento menor que 1,0 (ver Tabela 4.15).

A partir dos reogramas e parâmetros obtidos do modelo Lei de Potência, a dependência da temperatura foi estudada. A análise estatística indicou que os valores do índice de consistência variaram de $7,667E-04 \text{ Pa.s}^n$ a $1,220E-02 \text{ Pa.s}^n$ nos diferentes ensaios e de $8,778E-4 \text{ Pa.s}^n$ a $2,845E-02 \text{ Pa.s}^n$ segundo a temperatura empregada. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $4,97E-04 \pm 3,765E-03 \text{ Pa.s}^n$. O Quadro 4.8 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados do índice de consistência, indicando que a temperatura influenciou estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.8: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de índice de consistência do suco de laranja natural

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Ensaio	1,52072E-3	8	1,9009E-04	1,34	0,2418
Temperatura	5,04047E-03	8	6,30059E-04	4,44	0,0003
Resíduo	8,3653E-03	59	1,41785E-04		
TOTAL (corrigido)	1,4986E-02	75			

A análise estatística indicou que os valores do índice de escoamento variaram de 0,8968 a 1,3201 nos diferentes ensaios e de 0,7985 a 1,2670 segundo a temperatura empregada. Os resultados apresentaram o valor da grande média de $1,1347 \pm 0,1746$. O Quadro 4.9 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos resultados do índice de escoamento, indicando que tanto a temperatura quanto as amostras dos diferentes ensaios influenciaram estatisticamente os resultados, ao nível de confiança de 95 % , confirmado pelo teste Tukey HSD.

QUADRO 4.9: Análise de variância aplicada nos valores obtidos de índice de escoamento do suco de laranja natural

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Ensaio	1,40819	8	0,176024	5,78	0,0000
Temperatura	1,38832	8	0,173541	5,69	0,0000
Resíduo	1,79832	59	0,0304801		
TOTAL (corrigido)	4,58551	75			

Uma equação do tipo Arrhenius foi ajustada para modelar a variação do índice de consistência com a temperatura no intervalo de velocidade de cisalhamento entre 150 a 310 s⁻¹, conforme segue:

$$K = K_0 * e^{\frac{E_a}{R*T}} \quad (4.3)$$

onde:

K:	índice de consistência	Pa.s ⁿ
K ₀ :	constante de Arrhenius	Pa.s ⁿ
E _a :	Energia de ativação necessária para fluir	kJ/kmol
R:	Constante dos gases	kJ/kmol.K
T:	Temperatura	K

A partir dos dados experimentais, utilizando o programa Statgraphics, a seguinte correlação para o modelo de Arrhenius foi encontrada para explicar a variação do índice de consistência em função da temperatura:

$$K = 1,16981 * 10^{-11} * \exp\left(\frac{50548,4}{8,315 * T}\right) \quad (4.4)$$

Os valores encontrados para E_a e para a constante K₀ estão compatíveis com aqueles mencionados por HOLDSWORTH, 1993, para fluidos não-Newtonianos. A Figura 4.12 mostra a aplicação do modelo de Arrhenius para o índice de consistência K para o suco de laranja natural, no intervalo de temperatura entre 25 °C e 85 °C.

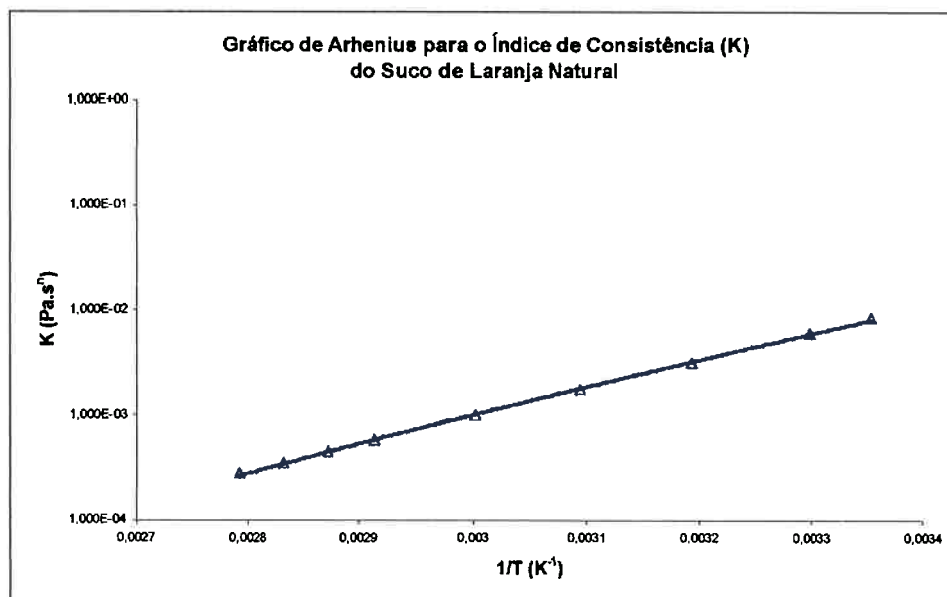


FIGURA 4.12: Aplicação do modelo de Arrhenius para o índice de consistência do Suco de Laranja Natural no intervalo de temperatura entre 25 °C e 85 °C.

A regressão polinomial foi ajustada para os dados experimentais para o índice de escoamento em função da temperatura e a seguinte equação foi encontrada:

$$n = -1,2991 + 0,1316 * T - 2,1892 * 10^{-3} * T^2 + 1,1623 * 10^{-5} * T^3 \quad (4.5)$$

onde:

T: Temperatura média do suco °C

O coeficiente de determinação R^2 indicou que o modelo ajustado explica 98,728 % da variabilidade de n , com o desvio padrão do resíduo de 0,0208.

A Figura 4.13 apresenta a aplicação da regressão polinomial para estimar a variabilidade do n em função da temperatura do suco de laranja natural. Nota-se que houve um ligeiro aumento do valor de n com o aumento da temperatura, enquanto uma diminuição do índice de consistência K . O efeito da temperatura sobre as constantes da Lei de Potência é muito complexo. Em geral, uma diminuição no valor da constante K com o aumento da temperatura resulta em um aumento no valor de n e vice-versa. Isto

pode acontecer devido as interações da viscosidade do “serum” e a concentração da polpa no caso de suco de frutas. As variações encontradas neste trabalho confirmam as observações dadas por HOLDSWORTH, 1993.

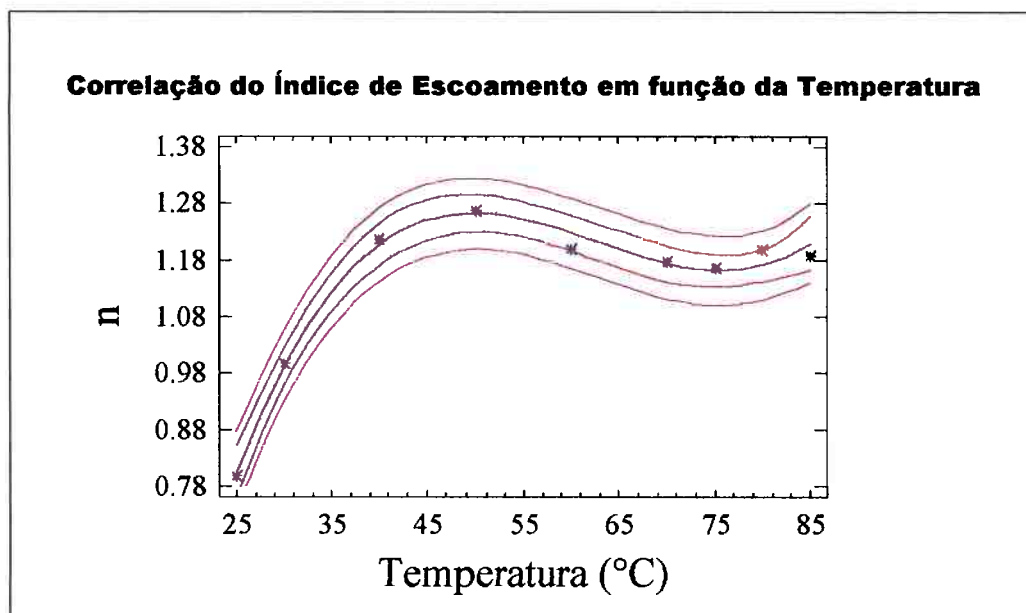


FIGURA 4.13: Aplicação da regressão polinomial para o índice de escoamento do Suco de Laranja Natural no intervalo de temperatura entre 25 °C e 85 °C.

4.5 Coeficiente de película de transferência de calor do Suco de Laranja Natural

A partir dos dados experimentais das temperaturas e vazões, foi possível aplicar para o suco de laranja natural a correlação empírica para a transferência de calor obtida com os ensaios no trocador de calor ARMFIELD, modelo FT 43-A, com água destilada, sem considerar fator de incrustação, dada pela equação 4.1:

$$Nu = 0,0078 * Re^{1,003} * Pr^{0,629} \quad (4.1)$$

Para o cálculo dos valores dos adimensionais Nu , Re e Pr , as propriedades termofísicas do suco de laranja foram determinadas a partir das seguintes correlações empíricas (PEACOCK, 1995):

$$C_p = 4,1253 - 0,024804 * B + 6,7 * 10^{-5} * B * T + 1,8691 * 10^{-3} * T - 9,271 * 10^{-6} * T^2 \quad (4.6)$$

$$40 \text{ }^\circ\text{C} < T < 150 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$0 \text{ }^\circ\text{Brix} < B < 80 \text{ }^\circ\text{Brix}$$

onde:

C_p : calor específico do suco kJ/kg.K

B : grau Brix

T : temperatura média do suco $^\circ\text{C}$

$$k = 1,162222 * 10^{-3} * (486 + 1,55 * T - 0,005 * T^2) * (1 - 0,0054 * B) \quad (4.7)$$

$$10 \text{ }^\circ\text{Brix} < B < 60 \text{ }^\circ\text{Brix}$$

onde:

k : condutividade térmica do suco W/m.K

B : grau Brix

T : temperatura média do suco $^\circ\text{C}$

$$\rho = 1000 * [1 + B * (B + 200) / 54000] * [1 - 0,036 * (T - 20) / (160 - T)] \quad (4.8)$$

$$T < 100 \text{ } ^\circ\text{C}$$

onde:

ρ :	densidade do suco	kg/m ³
B :	grau Brix	
T :	temperatura média do suco	°C

Os valores de viscosidade aparente foram determinados a partir das constantes da Lei de Potência obtidas das correlações empíricas referentes aos dados experimentais deste trabalho. Assim a viscosidade aparente do suco foi determinada a partir da seguinte equação (RAO & ANANTHESWARAN, 1982):

$$\mu_{ap} = K' \left(\frac{8 * \bar{v}}{D_e} \right)^{n-1} \quad (4.9)$$

sendo:

$$K' = K * \left(\frac{3 * n + 1}{4 * n} \right) \quad (4.10)$$

onde:

μ_{ap} :	viscosidade aparente do suco	Pa.s
K' :	índice de consistência baseado na equação Weissenberg-Robinowitch-Mooney	Pa.s ⁿ
\bar{v} :	velocidade média no canal	m/s
n :	índice de escoamento	adimensional
D_e :	diâmetro equivalente	m
K :	índice de consistência da Lei de Potência	Pa.s ⁿ

O adimensional Re foi então calculado na forma de Reynolds generalizado Re' , para fluidos com comportamento reológico que seguem a Lei de Potência, empregando o diâmetro equivalente dado pela equação I.9 do Anexo I e com a velocidade média do fluido no canal entre placas, dada pela equação abaixo:

$$\bar{v} = \frac{G_c}{\rho} \quad (4.11)$$

onde:

\bar{v} :	velocidade média do suco no canal	m/s
G_c :	velocidade mássica do suco no canal definida na equação I.12 do Anexo I	kg/m ² .s
ρ :	densidade do suco	kg/m ³

Efetuada as substituições obtemos então a expressão para o cálculo do número de Re' para o suco de laranja natural:

$$Re' = \frac{\bar{v}^{(2-n)} * \rho * D_e^n}{K' * 8^{(n-1)}} \quad (4.12)$$

A expressão para o cálculo do número de Pr, para fluidos que seguem a Lei de Potência é conforme abaixo:

$$Pr = \frac{C_p * \mu_{ap}}{k} = \frac{C_p * K'}{k} * \left(\frac{8 * \bar{v}}{D_e} \right)^{(n-1)} \quad (4.13)$$

A Tabela 4.16 mostra, como exemplo, uma planilha de cálculo do coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja natural, h , referente ao ensaio 1 com a bomba de alimentação ajustada no *speed dial* 6.

TABELA 4.16: ENSAIO 1 PLANILHA DE CÁLCULO DO h

Data: 20/07/99 speed 6		$T_m = (T_o + T_f) / 2$	$^{\circ}C$
$T_o = 19.70$	$^{\circ}C$	$r(T_m) = 1000 * (1 + B * (B + 200) / 54000) * (1 - 0.036 * (T_m - 20)) / (160 - T_m)$	Kg/m^3
$m = 0.00388$	kg/s	$vm = G/r$	m/s
$^{\circ}Brix = 10.86$		$Cp(T_m) = 4.1253 - 0.024804 * B + 6.7 * 10^{-5} * B * T_m + 1.8691 * 10^{-3} * T_m - 9.271 * 10^{-6} * (T_m)^2$	$kJ/kg * K$
$De = 0.0029$	m	$k(T_m) = 1.162222 * 10^{-3} * (486 + 1.55 * T_m - 0.005 * T_m^2) * (1 - 0.0054 * B)$	$W/m * K$
$G = 44.1023$	$kg/s * m^2$	$K(T_m) = 0.000000000116981 * EXP(50548.4 / (8.315 * T_m(K)))$	$Pa * s^n$
		$n = 1.2991 + 0.1316 * T_m - 2.1892 * 10^{-3} * T_m^2 + 1.1623 * 10^{-5} * T_m^3$	
		$map = K * (8 * Vm / De)^{(n-1)}$	$Pa * s$
		$K = K * ((3 * n + 1) / (4 * n))$	$Pa * s^n$
		$Re = ((Vm^{(2-n)}) * r * (De^n)) / (K * (8^{(n-1)}))$	
		$Pr = Cp * 1000 * map / k$	
		$Nu = 0.0078 * Re^{1.003} * Pr^{0.659}$	
		$h = Nu * k / De$	$W/m^2 * K$

T_f	T_m	T_m	$r(T_m)$	vm	$Cp(T_m)$	$k(T_m)$	$K(T_m)$	n	map	K'	Re	Pr	Nu	h
$^{\circ}C$	$^{\circ}C$	K	kg/m^3	m/s	$kJ/kg * K$	$W/m * K$	$Pa * s^n$	-	$Pa * s$	$Pa * s^n$				$W/m^2 * K$
60.835	40.267	313.417	1036.0460	0.0426	3.9455	0.5911	0.0031	1.2093	0.0084	0.0030	16.0659	56.0533	1.7945	362.419
60.685	40.193	313.343	1036.0733	0.0426	3.9454	0.5910	0.0031	1.2084	0.0084	0.0030	16.0570	56.0823	1.7941	362.284
60.904	40.302	313.452	1036.0332	0.0426	3.9456	0.5912	0.0031	1.2097	0.0084	0.0030	16.0702	56.0390	1.7947	362.483
60.765	40.232	313.382	1036.0587	0.0426	3.9454	0.5911	0.0031	1.2089	0.0084	0.0030	16.0617	56.0671	1.7943	362.355
60.466	40.083	313.233	1036.1134	0.0426	3.9452	0.5909	0.0031	1.2071	0.0084	0.0030	16.0451	56.1208	1.7936	362.094
60.835	40.267	313.417	1036.0460	0.0426	3.9455	0.5911	0.0031	1.2093	0.0084	0.0030	16.0659	56.0533	1.7945	362.419
61.203	40.452	313.602	1035.9783	0.0426	3.9458	0.5914	0.0031	1.2114	0.0084	0.0029	16.0904	55.9724	1.7955	362.769
61.273	40.486	313.636	1035.9655	0.0426	3.9459	0.5914	0.0031	1.2118	0.0084	0.0029	16.0954	55.9556	1.7958	362.839
61.054	40.377	313.527	1036.0058	0.0426	3.9457	0.5913	0.0031	1.2106	0.0084	0.0029	16.0800	56.0068	1.7951	362.624
61.123	40.412	313.562	1035.9930	0.0426	3.9458	0.5913	0.0031	1.2110	0.0084	0.0029	16.0848	55.9910	1.7953	362.691

Tf	Tm	Tm	r (Tm)	vm	Cp(Tm)	k(Tm)	K(Tm)	n	map	K'	Re	Pr	Nu	h
°C	°C	K	kg/m ³	m/s	kJ/kg*K	W/m*K	Pa*s ⁿ	-	Pa*s	Pa*s ⁿ				W/m ² K
61.273	40.486	313.636	1035.9655	0.0426	3.9459	0.5914	0.0031	1.2118	0.0084	0.0029	16.0954	55.9556	1.7958	362.839
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.273	40.486	313.636	1035.9655	0.0426	3.9459	0.5914	0.0031	1.2118	0.0084	0.0029	16.0954	55.9556	1.7958	362.839
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.203	40.452	313.602	1035.9783	0.0426	3.9458	0.5914	0.0031	1.2114	0.0084	0.0029	16.0904	55.9724	1.7955	362.769
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.860	40.780	313.930	1035.8572	0.0426	3.9464	0.5918	0.0030	1.2151	0.0084	0.0029	16.1432	55.7957	1.7977	363.460
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.860	40.780	313.930	1035.8572	0.0426	3.9464	0.5918	0.0030	1.2151	0.0084	0.0029	16.1432	55.7957	1.7977	363.460
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.860	40.780	313.930	1035.8572	0.0426	3.9464	0.5918	0.0030	1.2151	0.0084	0.0029	16.1432	55.7957	1.7977	363.460
61.562	40.631	313.781	1035.9123	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2135	0.0084	0.0029	16.1177	55.8811	1.7967	363.136
61.641	40.671	313.821	1035.8976	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2139	0.0084	0.0029	16.1243	55.8592	1.7969	363.220
61.711	40.706	313.856	1035.8848	0.0426	3.9463	0.5917	0.0030	1.2143	0.0084	0.0029	16.1302	55.8395	1.7972	363.296
61.492	40.596	313.746	1035.9252	0.0426	3.9461	0.5915	0.0030	1.2131	0.0084	0.0029	16.1121	55.8998	1.7964	363.063
61.562	40.631	313.781	1035.9123	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2135	0.0084	0.0029	16.1177	55.8811	1.7967	363.136
61.422	40.561	313.711	1035.9380	0.0426	3.9460	0.5915	0.0030	1.2127	0.0084	0.0029	16.1067	55.9181	1.7962	362.990
61.860	40.780	313.930	1035.8572	0.0426	3.9464	0.5918	0.0030	1.2151	0.0084	0.0029	16.1432	55.7957	1.7977	363.460
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.860	40.780	313.930	1035.8572	0.0426	3.9464	0.5918	0.0030	1.2151	0.0084	0.0029	16.1432	55.7957	1.7977	363.460
62.518	41.109	314.259	1035.7354	0.0426	3.9471	0.5922	0.0029	1.2187	0.0083	0.0028	16.2078	55.5782	1.8003	364.232
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
61.930	40.815	313.965	1035.8443	0.0426	3.9465	0.5918	0.0030	1.2155	0.0084	0.0029	16.1495	55.7745	1.7980	363.538
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.711	40.706	313.856	1035.8848	0.0426	3.9463	0.5917	0.0030	1.2143	0.0084	0.0029	16.1302	55.8395	1.7972	363.296
61.562	40.631	313.781	1035.9123	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2135	0.0084	0.0029	16.1177	55.8811	1.7967	363.136

Tf	Tm	Tm	r (Tm)	vm	Cp(Tm)	k(Tm)	K(Tm)	n	map	K'	Re	Pr	Nu	h
°C	°C	K	kg/m ³	m/s	kJ/kg*K	W/m*K	Pa*s ⁿ	-	Pa*s	Pa*s ⁿ				W/m ² K
61.492	40.596	313.746	1035.9252	0.0426	3.9461	0.5915	0.0030	1.2131	0.0084	0.0029	16.1121	55.8998	1.7964	363.063
61.273	40.486	313.636	1035.9655	0.0426	3.9459	0.5914	0.0031	1.2118	0.0084	0.0029	16.0954	55.9556	1.7958	362.839
60.984	40.342	313.492	1036.0186	0.0426	3.9456	0.5912	0.0031	1.2102	0.0084	0.0030	16.0754	56.0221	1.7949	362.558
61.123	40.412	313.562	1035.9930	0.0426	3.9458	0.5913	0.0031	1.2110	0.0084	0.0029	16.0848	55.9910	1.7953	362.691
61.273	40.486	313.636	1035.9655	0.0426	3.9459	0.5914	0.0031	1.2118	0.0084	0.0029	16.0954	55.9556	1.7958	362.839
61.123	40.412	313.562	1035.9930	0.0426	3.9458	0.5913	0.0031	1.2110	0.0084	0.0029	16.0848	55.9910	1.7953	362.691
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.562	40.631	313.781	1035.9123	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2135	0.0084	0.0029	16.1177	55.8811	1.7967	363.136
61.711	40.706	313.856	1035.8848	0.0426	3.9463	0.5917	0.0030	1.2143	0.0084	0.0029	16.1302	55.8395	1.7972	363.296
61.860	40.780	313.930	1035.8572	0.0426	3.9464	0.5918	0.0030	1.2151	0.0084	0.0029	16.1432	55.7957	1.7977	363.460
61.711	40.706	313.856	1035.8848	0.0426	3.9463	0.5917	0.0030	1.2143	0.0084	0.0029	16.1302	55.8395	1.7972	363.296
62.000	40.850	314.000	1035.8314	0.0426	3.9466	0.5919	0.0030	1.2159	0.0084	0.0029	16.1559	55.7529	1.7982	363.617
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
62.299	40.999	314.149	1035.7760	0.0426	3.9469	0.5921	0.0030	1.2175	0.0083	0.0028	16.1850	55.6551	1.7994	363.966
62.219	40.959	314.109	1035.7908	0.0426	3.9468	0.5920	0.0030	1.2171	0.0084	0.0028	16.1770	55.6820	1.7991	363.871
62.438	41.069	314.219	1035.7502	0.0426	3.9470	0.5921	0.0030	1.2183	0.0083	0.0028	16.1994	55.6067	1.7999	364.134
62.518	41.109	314.259	1035.7354	0.0426	3.9471	0.5922	0.0029	1.2187	0.0083	0.0028	16.2078	55.5782	1.8003	364.232
62.438	41.069	314.219	1035.7502	0.0426	3.9470	0.5921	0.0030	1.2183	0.0083	0.0028	16.1994	55.6067	1.7999	364.134
62.807	41.253	314.403	1035.6816	0.0426	3.9473	0.5924	0.0029	1.2202	0.0083	0.0028	16.2399	55.4700	1.8015	364.597
62.807	41.253	314.403	1035.6816	0.0426	3.9473	0.5924	0.0029	1.2202	0.0083	0.0028	16.2399	55.4700	1.8015	364.597
62.587	41.144	314.294	1035.7224	0.0426	3.9471	0.5922	0.0029	1.2190	0.0083	0.0028	16.2153	55.5528	1.8006	364.319
62.299	40.999	314.149	1035.7760	0.0426	3.9469	0.5921	0.0030	1.2175	0.0083	0.0028	16.1850	55.6551	1.7994	363.966
62.219	40.959	314.109	1035.7908	0.0426	3.9468	0.5920	0.0030	1.2171	0.0084	0.0028	16.1770	55.6820	1.7991	363.871
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
61.930	40.815	313.965	1035.8443	0.0426	3.9465	0.5918	0.0030	1.2155	0.0084	0.0029	16.1495	55.7745	1.7980	363.538
61.641	40.671	313.821	1035.8976	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2139	0.0084	0.0029	16.1243	55.8592	1.7969	363.220
61.203	40.452	313.602	1035.9783	0.0426	3.9458	0.5914	0.0031	1.2114	0.0084	0.0029	16.0904	55.9724	1.7955	362.769

Tf	Tm	Tm	r (Tm)	vm	Cp(Tm)	k(Tm)	K(Tm)	n	map	K'	Re	Pr	Nu	h
°C	°C	K	kg/m ³	m/s	kJ/kg*K	W/m*K	Pa*s ⁰	-	Pa*s	Pa*s ⁰				W/m ² K
61.273	40.486	313.636	1035.9655	0.0426	3.9459	0.5914	0.0031	1.2118	0.0084	0.0029	16.0954	55.9556	1.7958	362.839
61.203	40.452	313.602	1035.9783	0.0426	3.9458	0.5914	0.0031	1.2114	0.0084	0.0029	16.0904	55.9724	1.7955	362.769
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.641	40.671	313.821	1035.8976	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2139	0.0084	0.0029	16.1243	55.8592	1.7969	363.220
61.203	40.452	313.602	1035.9783	0.0426	3.9458	0.5914	0.0031	1.2114	0.0084	0.0029	16.0904	55.9724	1.7955	362.769
60.984	40.342	313.492	1036.0186	0.0426	3.9456	0.5912	0.0031	1.2102	0.0084	0.0030	16.0754	56.0221	1.7949	362.558
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.273	40.486	313.636	1035.9655	0.0426	3.9459	0.5914	0.0031	1.2118	0.0084	0.0029	16.0954	55.9556	1.7958	362.839
61.492	40.596	313.746	1035.9252	0.0426	3.9461	0.5915	0.0030	1.2131	0.0084	0.0029	16.1121	55.8998	1.7964	363.063
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.641	40.671	313.821	1035.8976	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2139	0.0084	0.0029	16.1243	55.8592	1.7969	363.220
61.860	40.780	313.930	1035.8572	0.0426	3.9464	0.5918	0.0030	1.2151	0.0084	0.0029	16.1432	55.7957	1.7977	363.460
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.422	40.561	313.711	1035.9380	0.0426	3.9460	0.5915	0.0030	1.2127	0.0084	0.0029	16.1067	55.9181	1.7962	362.990
61.203	40.452	313.602	1035.9783	0.0426	3.9458	0.5914	0.0031	1.2114	0.0084	0.0029	16.0904	55.9724	1.7955	362.769
61.562	40.631	313.781	1035.9123	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2135	0.0084	0.0029	16.1177	55.8811	1.7967	363.136
62.080	40.890	314.040	1035.8166	0.0426	3.9467	0.5919	0.0030	1.2163	0.0084	0.0029	16.1635	55.7277	1.7985	363.708
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
61.492	40.596	313.746	1035.9252	0.0426	3.9461	0.5915	0.0030	1.2131	0.0084	0.0029	16.1121	55.8998	1.7964	363.063
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
61.492	40.596	313.746	1035.9252	0.0426	3.9461	0.5915	0.0030	1.2131	0.0084	0.0029	16.1121	55.8998	1.7964	363.063
61.562	40.631	313.781	1035.9123	0.0426	3.9462	0.5916	0.0030	1.2135	0.0084	0.0029	16.1177	55.8811	1.7967	363.136
61.930	40.815	313.965	1035.8443	0.0426	3.9465	0.5918	0.0030	1.2155	0.0084	0.0029	16.1495	55.7745	1.7980	363.538
62.000	40.850	314.000	1035.8314	0.0426	3.9466	0.5919	0.0030	1.2159	0.0084	0.0029	16.1559	55.7529	1.7982	363.617
61.930	40.815	313.965	1035.8443	0.0426	3.9465	0.5918	0.0030	1.2155	0.0084	0.0029	16.1495	55.7745	1.7980	363.538
61.930	40.815	313.965	1035.8443	0.0426	3.9465	0.5918	0.0030	1.2155	0.0084	0.0029	16.1495	55.7745	1.7980	363.538
61.711	40.706	313.856	1035.8848	0.0426	3.9463	0.5917	0.0030	1.2143	0.0084	0.0029	16.1302	55.8395	1.7972	363.296

Tf	Tm	Tm	r (Tm)	vm	Cp(Tm)	k(Tm)	K(Tm)	n	map	K'	Re	Pr	Nu	h
°C	°C	K	kg/m ³	m/s	kJ/kg*K	W/m*K	Pa*s ⁰	-	Pa*s	Pa*s ⁿ				W/m ² K
61.422	40.561	313.711	1035.9380	0.0426	3.9460	0.5915	0.0030	1.2127	0.0084	0.0029	16.1067	55.9181	1.7962	362.990
61.492	40.596	313.746	1035.9252	0.0426	3.9461	0.5915	0.0030	1.2131	0.0084	0.0029	16.1121	55.8998	1.7964	363.063
61.711	40.706	313.856	1035.8848	0.0426	3.9463	0.5917	0.0030	1.2143	0.0084	0.0029	16.1302	55.8395	1.7972	363.296
62.219	40.959	314.109	1035.7908	0.0426	3.9468	0.5920	0.0030	1.2171	0.0084	0.0028	16.1770	55.6820	1.7991	363.871
62.299	40.999	314.149	1035.7760	0.0426	3.9469	0.5921	0.0030	1.2175	0.0083	0.0028	16.1850	55.6551	1.7994	363.966
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
62.219	40.959	314.109	1035.7908	0.0426	3.9468	0.5920	0.0030	1.2171	0.0084	0.0028	16.1770	55.6820	1.7991	363.871
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
62.368	41.034	314.184	1035.7631	0.0426	3.9469	0.5921	0.0030	1.2179	0.0083	0.0028	16.1921	55.6311	1.7997	364.049
62.149	40.925	314.075	1035.8037	0.0426	3.9467	0.5920	0.0030	1.2167	0.0084	0.0028	16.1702	55.7051	1.7988	363.789
62.518	41.109	314.259	1035.7354	0.0426	3.9471	0.5922	0.0029	1.2187	0.0083	0.0028	16.2078	55.5782	1.8003	364.232
62.368	41.034	314.184	1035.7631	0.0426	3.9469	0.5921	0.0030	1.2179	0.0083	0.0028	16.1921	55.6311	1.7997	364.049
62.080	40.890	314.040	1035.8166	0.0426	3.9467	0.5919	0.0030	1.2163	0.0084	0.0029	16.1635	55.7277	1.7985	363.708
62.000	40.850	314.000	1035.8314	0.0426	3.9466	0.5919	0.0030	1.2159	0.0084	0.0029	16.1559	55.7529	1.7982	363.617
61.781	40.740	313.890	1035.8719	0.0426	3.9464	0.5917	0.0030	1.2147	0.0084	0.0029	16.1362	55.8193	1.7974	363.372
62.438	41.069	314.219	1035.7502	0.0426	3.9470	0.5921	0.0030	1.2183	0.0083	0.0028	16.1994	55.6067	1.7999	364.134
62.000	40.850	314.000	1035.8314	0.0426	3.9466	0.5919	0.0030	1.2159	0.0084	0.0029	16.1559	55.7529	1.7982	363.617
62.438	41.069	314.219	1035.7502	0.0426	3.9470	0.5921	0.0030	1.2183	0.0083	0.0028	16.1994	55.6067	1.7999	364.134
62.657	41.179	314.329	1035.7094	0.0426	3.9472	0.5923	0.0029	1.2194	0.0083	0.0028	16.2230	55.5269	1.8009	364.407
62.299	40.999	314.149	1035.7760	0.0426	3.9469	0.5921	0.0030	1.2175	0.0083	0.0028	16.1850	55.6551	1.7994	363.966
61.711	40.706	313.856	1035.8848	0.0426	3.9463	0.5917	0.0030	1.2143	0.0084	0.0029	16.1302	55.8395	1.7972	363.296
61.342	40.521	313.671	1035.9527	0.0426	3.9460	0.5915	0.0031	1.2122	0.0084	0.0029	16.1006	55.9384	1.7960	362.909
Valores médios:														
61.710	40.705	313.855	1035.885	0.043	3.946	0.592	0.003	1.214	0.008	0.003	16.133	55.829	1.797	363.316

Como o exemplo ilustrado na Tabela 4.16, foram geradas 58 planilhas de cálculo, correspondentes a 58 diferentes condições do parâmetro Temperatura de pasteurização – Tempo de retenção, gerando uma matriz de 6060 linhas.

Empregando o programa de estatística STATGRAPHICS PLUS, v. 4.0 for Windows, os valores do coeficiente de película de transferência de calor h do suco de laranja natural foram correlacionados com a velocidade média do suco no canal e com as constantes do modelo reológico Lei de Potência, obtidas neste trabalho.

O Quadro 4.10 mostra os resultados do ajuste da regressão múltipla linear, indicando que todos os coeficientes lineares das três variáveis foram significativos, no intervalo de confiança de 95 %.

QUADRO 4.10: Análise da regressão múltipla linear aplicada nos valores obtidos do coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja natural

Variável dependente: h				
Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	Estatística T	Valor de P
Constante	2.554,15	9,9815	255,687	0,0000
\bar{v}	7.748,13	1,6461	4.706,91	0,0000
K	- 116.419,0	427,71	- 272,192	0,0000
n	- 1.785,97	7,1665	- 249,21	0,0000

A equação do modelo ajustado é conforme segue:

$$h = 2.554,15 + 7.748,13 * \bar{v} - 116.419,0 * K - 1.785,97 * n \quad (4.14)$$

$$0,03617 \text{ m/s} < \bar{v} < 0,1169 \text{ m/s} \quad 0,0021 \text{ Pa.s}^n < K < 0,0045 \text{ Pa.s}^n$$

$$1,1102 < n < 1,2570 \quad 25 \text{ }^\circ\text{C} < T < 85 \text{ }^\circ\text{C} \quad 9,61 < \text{ }^\circ\text{Brix} < 12,65$$

O Quadro 4.11 apresenta a tabela ANOVA do modelo, indicando que o coeficiente de determinação R^2 , explicou 99,9742 % da variabilidade do h , denotando a qualidade da obtenção dos dados tanto da aquisição das temperaturas durante o processo de pasteurização, quanto na aquisição dos reogramas nos ensaios com o reômetro

BROOKFIELD. O erro padrão da estimativa mostra o desvio padrão do resíduo de $1,9827 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

QUADRO 4.11: Análise de variância aplicada no modelo de regressão múltipla linear obtido para correlacionar o h do suco de laranja natural.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Modelo	9,2257E+07	3	3,0752E+07	7,8227E+06	0,0000
Resíduo	2,3763E+04	6045	3,9311		
TOTAL (corrigido)	9,2281E+07	6048			

Nas condições experimentais deste trabalho, o coeficiente de película de transferência de calor do suco de laranja natural predito pelo modelo, variou de $312,8517 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$ a $961,2296 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$, na faixa de temperatura entre 25 a $85 \text{ }^\circ\text{C}$, no processo de pasteurização do suco em um trocador de calor tipo placas, ARMFIELD, modelo FT 43-A, em escoamento turbulento, fluxo contracorrente. A Figura 4.14 ilustra a variabilidade do h calculado pelo modelo em relação ao obtido experimentalmente.

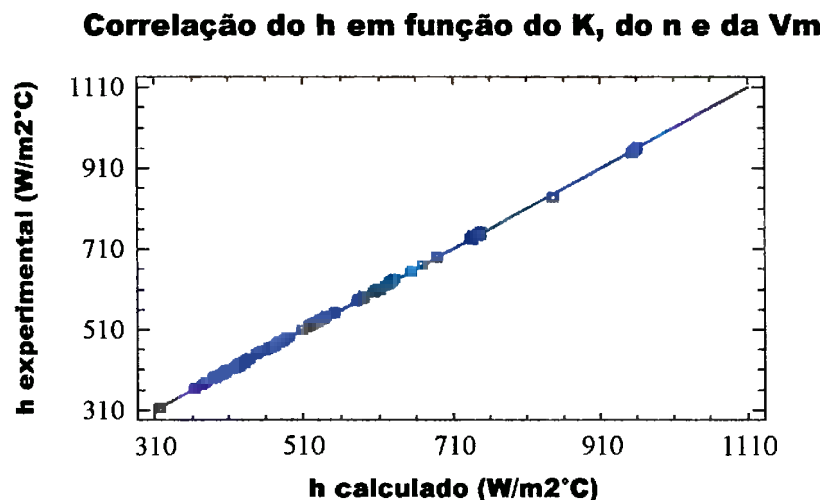


FIGURA 4.14: Aplicação do modelo da regressão múltipla linear para h do Suco de Laranja Natural ajustado dos valores experimentais.

KIM et al, 1999b, determinaram o coeficiente de transferência de calor para suco de laranja natural, durante a pasteurização do suco em um trocador de calor tipo placas, De-Laval, modelo P5-VRB, em escala planta-piloto, considerando o suco de laranja natural como fluido Newtoniano. O valor do h variou entre 983 to 6500 $W/m^2\text{°C}$, para velocidade média do canal entre placas entre 0,32 a 0,69 m/s.

4.6 Cinética de inativação da enzima pectinesterase na pasteurização do suco de laranja natural

Para estudar a cinética de inativação da enzima pectinesterase presente no suco, primeiramente foi verificada a influência da temperatura de pasteurização, do tempo de retenção e do pH do suco sobre a razão da atividade da pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da pectinesterase do suco não-processado, PEU/PEU_0 . O Quadro 4.12 apresenta o resultado da ANOVA aplicada nos valores de PEU/PEU_0 , denotando que todas as variáveis independentes influenciaram de forma significativa os resultados.

QUADRO 4.12: Análise de variância aplicada nos valores da razão da atividade da enzima pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da enzima presente no suco não processado.

Fonte da variação	Soma dos Quadrados	Graus de liberdade	Quadrado Médio	Razão F	Valor de P
Temperatura	1,2073E-04	2	6,0365E-05	5,63	0,0052
Tempo	4,9512E-04	8	6,1890E-05	5,77	0,0000
PH	5,1558E-04	38	6,4445E-05	6,01	0,0000
Resíduo	8,5771E-04	80	1,0721E-05		
TOTAL (corrigido)	2,3126E-03	98			

A razão PEU/PEU_0 variou de 9,6297E-04 a 8,4188E-03 conforme a temperatura de pasteurização variou de 82,5 a 87,0 °C, de 9,2885E-04 a 7,6628E-03 conforme o

tempo de retenção empregado e de $2,0616E-04$ a $1,4702E-02$ de acordo com o pH do suco. O valor da grande média foi de $5,3375E-03$ com um erro padrão de $3,274E-03$.

As Figuras 4.15, 4.16 e 4.17 indicam como a enzima pectinesterase foi inativada em função da temperatura do processo, do tempo de retenção empregado e de acordo com o pH do suco, respectivamente.

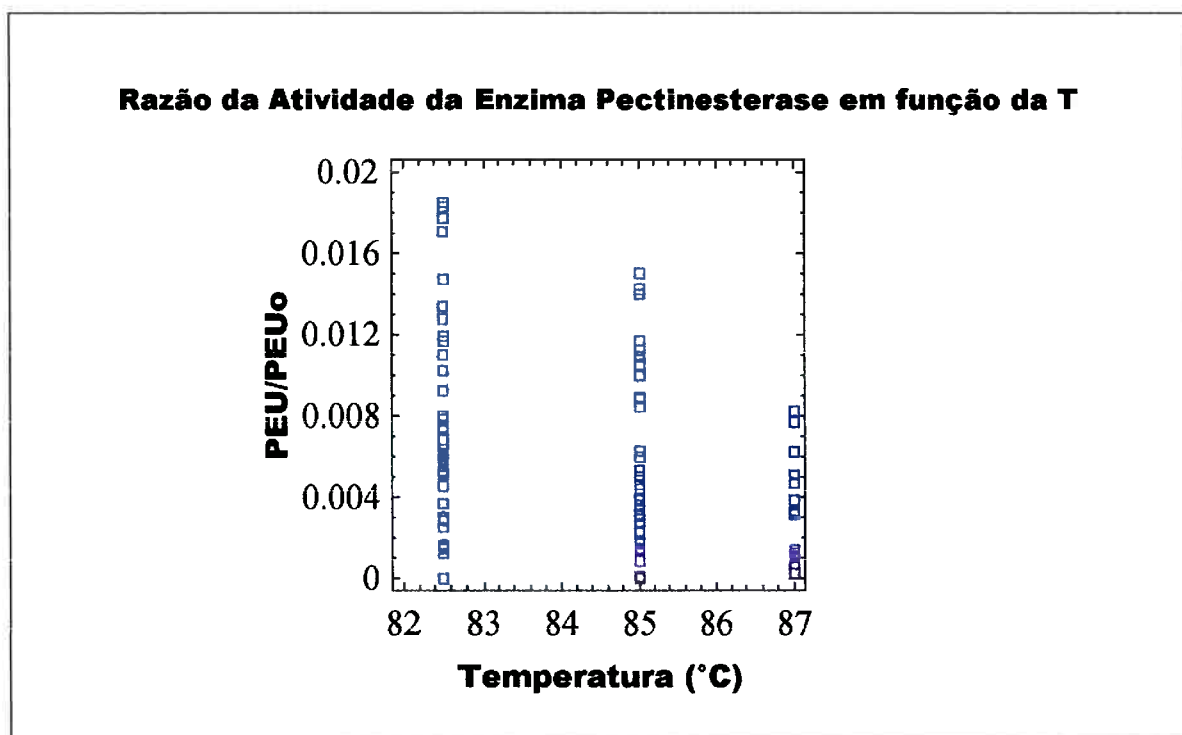


FIGURA 4.15: Inativação da pectinesterase presente no suco de laranja natural em função da temperatura de pasteurização.

Nota-se pelas Figuras 4.15 e 4.16 que houve uma redução da atividade da enzima conforme a temperatura e o tempo de retenção aumentaram. Quanto ao pH, houve uma redução mais acentuada a valores de pH menores que 3,5 ou a valores superiores a 4,0.

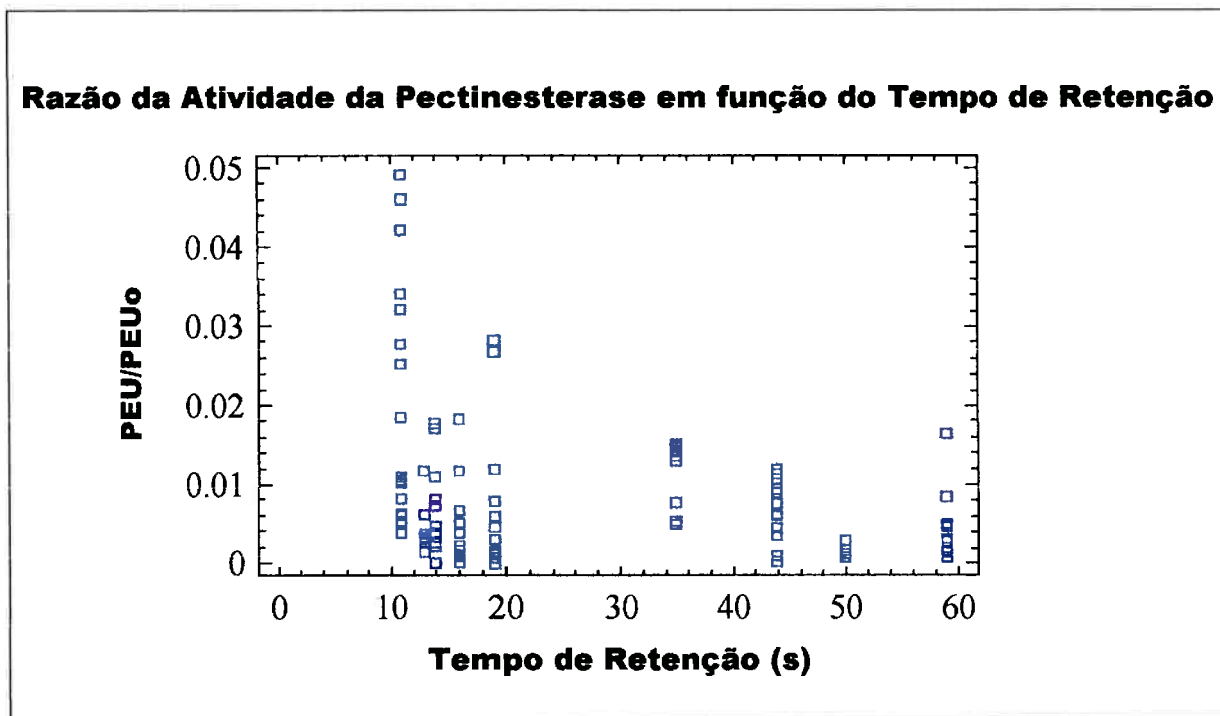


FIGURA 4.16: Inativação da pectinesterase presente no suco de laranja natural em função do tempo de retenção.

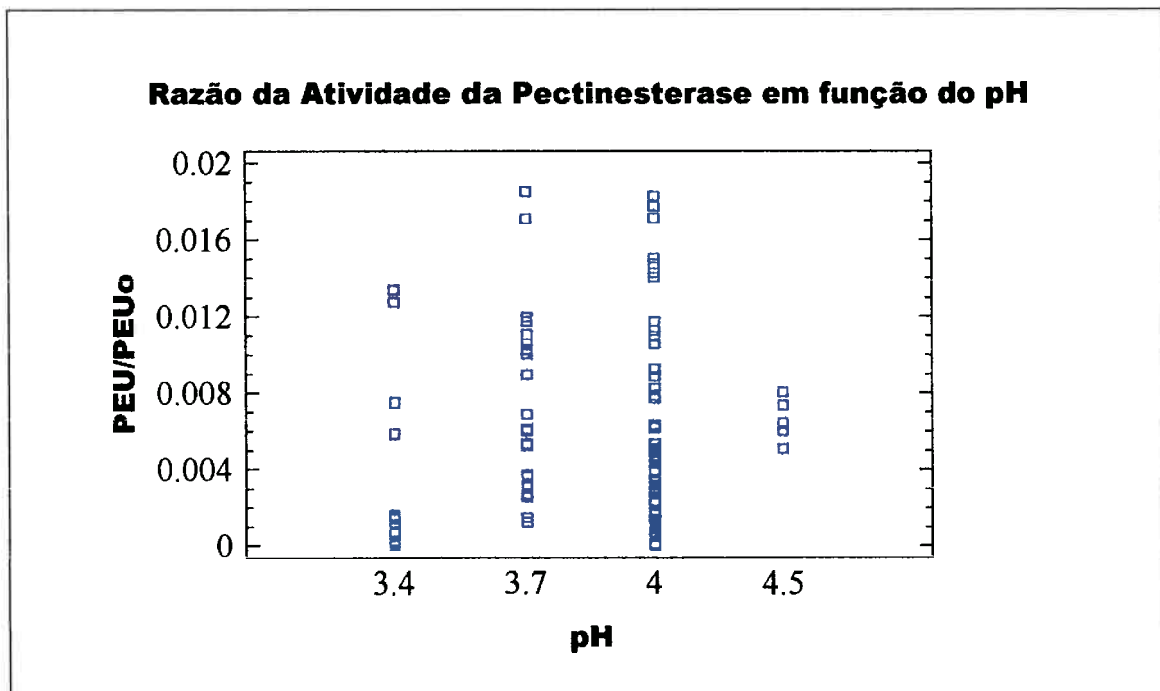


FIGURA 4.17: Inativação da pectinesterase presente no suco de laranja natural em função do pH.

ROUSE & ATKINS, 1952, em seus estudos sobre inativação da pectinesterase presente em suco de laranja “Hamlin”, também encontraram diferente resistência térmica para inativar a enzima, de acordo com o pH do suco. Os autores sugeriram aquecimento de 48 segundos a uma temperatura variando conforme o pH do suco: 93,5 °C para pH 3,2 ou 99,0 °C para pH entre 3,8 a 4,2. Os dados encontrados no presente trabalho estão de acordo com as observações feitas por Rouse & Atkins.

O Quadro 4.13 mostra o resultado do ajuste da regressão múltipla linear aplicada nos dados experimentais. A razão da atividade da pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da enzima presente no suco não processado (PEU/PEU₀) é dependente do coeficiente linear da variável Temperatura, dos coeficientes quadráticos das variáveis Temperatura, Tempo de retenção e pH e da interação das variáveis Temperatura e Tempo de retenção. Os coeficientes significativos apresentados no Quadro 4.13 geraram o modelo:

$$\hat{Y} = 2,99406 - 6,52085 * 10^{-2} * T + 3,31739 * 10^{-3} * T^2 - 7,58899 * 10^{-6} * t^2 - 9,47668 * 10^{-3} * pH^2 + 5,94013 * 10^{-5} * T * t$$

(4.15)

onde:

T: Variável codificada da Temperatura

0 = 82,5 °C 1 = 87,0 °C

t: Variável codificada do tempo de retenção

0 = 11 s 1 = 59 s

pH: Variável codificada do pH

0 = 3,4 1 = 4,5

QUADRO 4.13: Estimativa dos coeficientes do polinômio de segundo grau ajustado para os valores da razão da atividade da enzima pectinesterase presente no suco processado em relação a atividade da enzima presente no suco não processado.

Parâmetro	Estimativa	Erro padrão	T estatística	Valor de P	
Constante	2,99406	1,06088	2,82224	0,0069	
T	-6,52085E-02	2,40039E-02	-2,71658	0,0091	
T	-4,60479E-03	1,29437E-03	-3,55756	0,0008	
PH	-4,93351E-02	8,85313E-03	-0,557261	0,5799	
T*T	3,31739E-04	1,39517E-4	2,377777	0,0214	
T*t	-7,58899E-06	1,54088E-06	-4,92511	0,0000	
pH*pH	-9,47668E-03	3,70263E-03	-2,55945	0,0136	
T*t	5,94013E-05	1,3799E-05	4,30474	0,0001	
T*pH	1,46329E-03	8,20249E-4	1,78396	0,0806	
t*pH	3,06817E-05	7,69285E-05	0,398834	0,6917	
R ² = 0,759361 erro padrão da estimativa = 2,1741E-03					
Análise de Variância					
Fonte de variação	Soma dos quadrados	Graus de liberdade	Quadrado médio	F	P
Modelo	7,30867E-04	9	8,12075E-05	17,18	0,0000
Resíduo	2,31609E-04	49	4,72672E-06		
Total (corr.)	9,62476E-04	58			

A Figura 4.18 ilustra a superfície de resposta para o valor fixo da temperatura média de pasteurização de 84,75 °C, a variação da razão PEU/PEU₀ em função do tempo de retenção e do pH. Nota-se um ponto de mínima inativação enzimática para valores de pH 3,95 (0,5 da variável codificada).

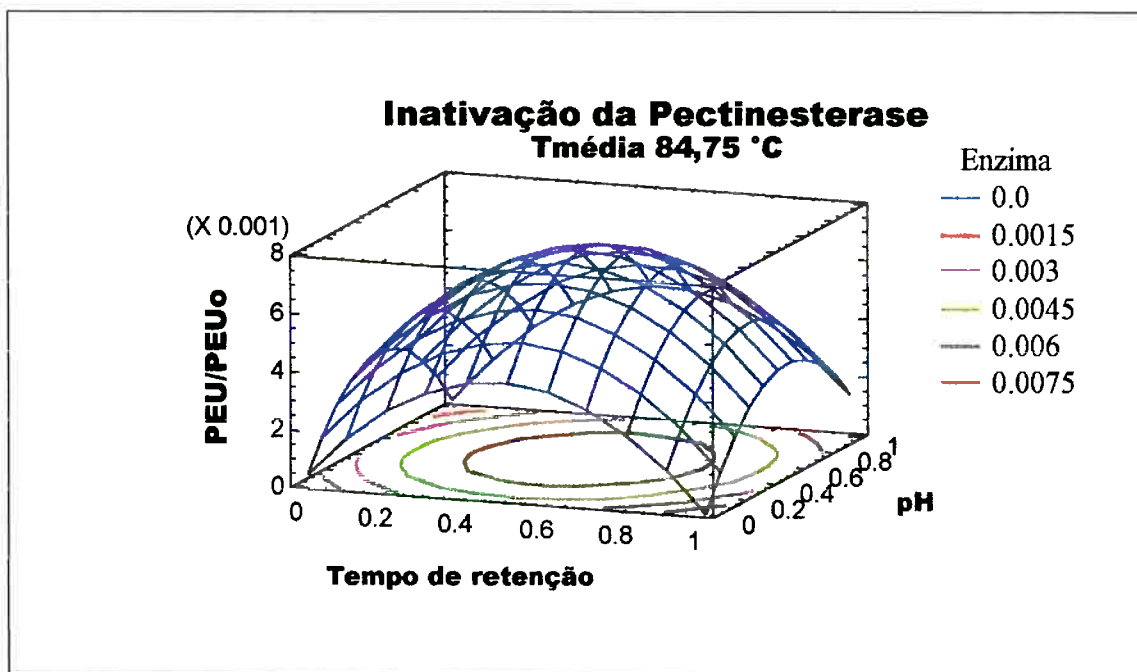


FIGURA 4.18: Superfície de resposta com as linhas de contorno da variação da razão PEU/PEU_0 em função do tempo de retenção e do pH do suco, para uma temperatura média de pasteurização de $84,75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

A Figura 4.19 ilustra a superfície de resposta para o valor fixo do pH de 3,95, a variação da razão PEU/PEU_0 em função da temperatura de pasteurização e do tempo de retenção. Como era esperado houve um aumento da inativação da pectinesterase com o aumento da temperatura de pasteurização. Em relação ao tempo de retenção, as linhas de contorno indicam que a inativação é fortemente influenciada pelo pH, ou seja, em pH 3,95 a inativação foi mais eficiente a tempos de retenção maiores que 40 s (0,6 na variável codificada), para qualquer temperatura no intervalo entre $82,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e $87,0\text{ }^{\circ}\text{C}$. Este fato pode ser melhor observado na Figura 4.20, que ilustra a superfície de resposta para o valor fixo do tempo de retenção de 35 s, a variação da razão PEU/PEU_0 em função da temperatura de pasteurização e do pH.

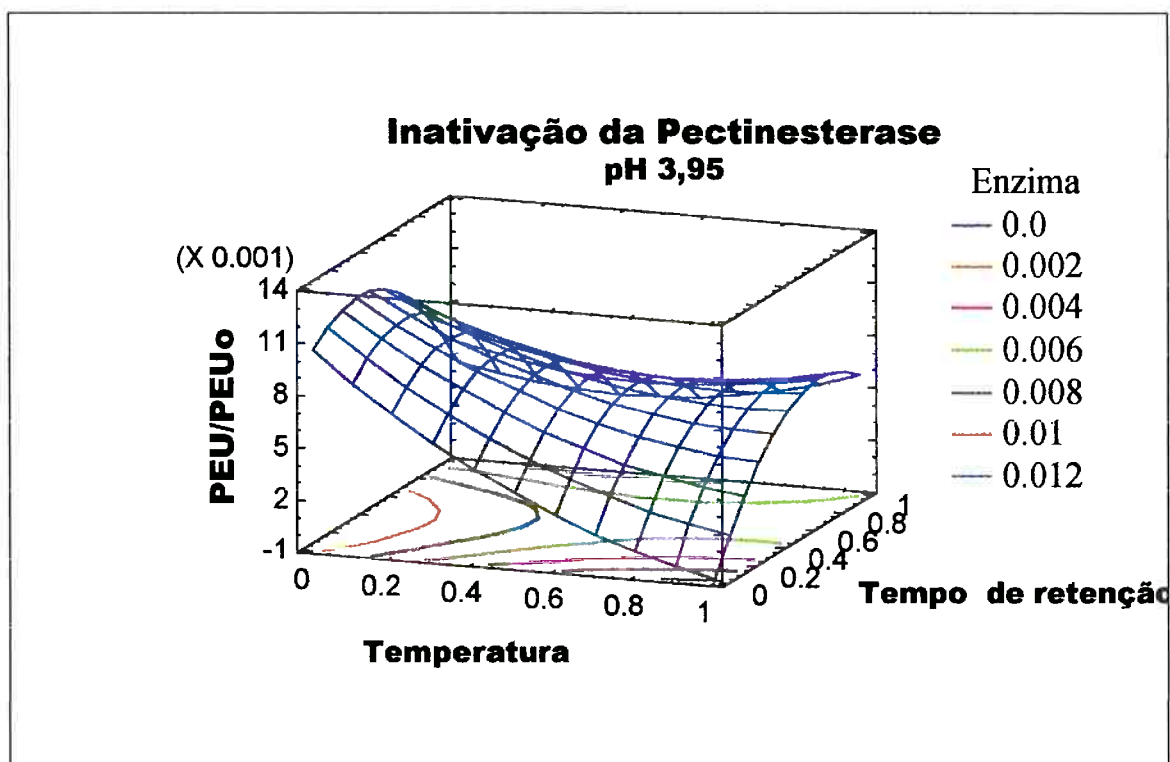


FIGURA 4.19: Superfície de resposta com as linhas de contorno da variação da razão PEU/PEU_0 em função da temperatura de pasteurização e do tempo de retenção, para um valor médio de pH de 3,95.

Pode ser observado que para um valor fixo de tempo de retenção (35 s), para valores de pH menores que 3,95 e para valores maiores de pH de 3,95, a uma dada temperatura, o nível de inativação é o mesmo. Como mostrado na Figura 4.18, para o valor de pH 3,95, ocorreu um ponto de inflexão de mínima inativação enzimática, portanto para suco de laranja com pH próximo de 4,0, a uma dada temperatura é necessário um tempo de retenção maior para atingir o grau de inativação desejado.

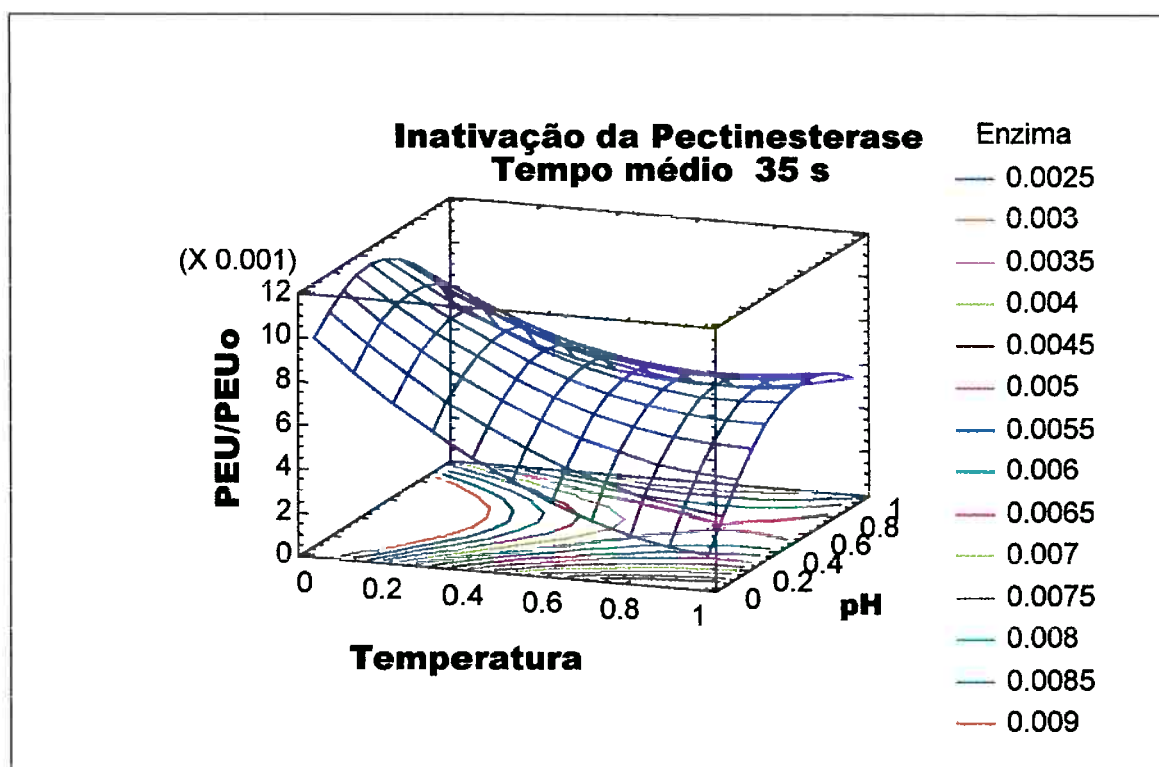


FIGURA 4.20: Superfície de resposta com as linhas de contorno da variação da razão PEU/PEU_0 em função da temperatura de pasteurização e do pH, para um valor médio de tempo de retenção de 35 s.

5. CONCLUSÕES

- O presente trabalho contribui com o estudo da transferência de calor de alimentos líquidos empregando um trocador de calor tipo placas, durante o processo de pasteurização do suco de laranja natural.
- Dos dados experimentais, a análise de variância indicou que a acidez do suco expressa como % de ácido cítrico foi influenciada pela temperatura do processo e que provavelmente esta variabilidade ocorreu devido a variação da matéria-prima, uma vez que o suco foi extraído e processado sem a preocupação de padronizar a relação Brix/ acidez.
- Dos dados experimentais, a análise de variância indicou que os valores de °Brix foram significativamente influenciados, ao nível de confiança de 95 %, pelo tempo de retenção. A variabilidade do Brix pode ser explicada pelo fato que quanto menor o tempo de retenção, maior foi a velocidade mássica no canal formado pela corrente do fluido entre duas placas, provocando um atrito entre as partículas do suco e a parede da placa. Em consequência disso, houve para maiores velocidades mássicas, maior quebra da polpa e com isso aumentando o valor do teor de sólidos solúveis, lido no refratômetro.
- Dos dados experimentais, a análise de variância indicou que os valores de pH foram significativamente influenciados, ao nível de confiança de 95 %, tanto pela temperatura de processo quanto pelo tempo de retenção. A variabilidade do pH do suco provavelmente se deveu a própria variação da matéria-prima laranja.

- Dos dados experimentais, a análise de variância indicou que o teor de sólidos insolúveis e o teor de sólidos totais não foram significativamente influenciados, ao nível de confiança de 95 %, por nenhum fator, ou seja, nem pela temperatura do processo, nem pelo tempo de retenção.
- Dos dados experimentais, a análise de variância indicou que o teor de polpa do suco foi significativamente influenciado tanto pela temperatura do processo, quanto pelo tempo de retenção.
- O desempenho térmico do trocador de calor tipo placas, marca ARMFIELD, modelo FT 43-A, de laboratório, foi determinado através de aquisições das temperaturas da seção de regeneração, utilizando água destilada. Os arranjos de placas empregados foram sempre simétricos e o escoamento em fluxo contracorrente. Dos dados experimentais, foram calculados os números adimensionais Re , Pr e Nu e estes correlacionados empregando a regressão múltipla linear. A correlação empírica que modela o fenômeno de transferência de calor neste trocador, operando em regime de escoamento turbulento, fluxo contracorrente para aplicações líquido-líquido foi: $Nu = 0,0078 * Re^{1,003} * Pr^{0,659}$ com o coeficiente de determinação R^2 igual a 0,8932.
- Dos dados experimentais obtidos dos reogramas do suco de laranja, a Lei de Potência foi o modelo matemático que melhores resultados apresentou, para todas as temperaturas, no intervalo entre 25 °C e 85 °C. Análise estatística indicou que o índice de consistência e o índice de escoamento foram significativamente influenciados pela temperatura, ao nível de confiança de 95 %.
- A partir dos dados experimentais, o modelo de Arrhenius foi ajustado para explicar a variação do índice de consistência em função da temperatura: $K = 1,16981 * 10^{-11} * \exp\left(\frac{50548,4}{8,315 * T}\right)$, cujos valores para E_a e para a constante K_0 foram compatíveis aos mencionados na literatura.

- A regressão polinomial foi ajustada para os dados experimentais para explicar a dependência do índice de escoamento em função da temperatura:

$$n = 1,2991 + 0,1316 * T - 2,1892 * 10^{-3} * T^2 + 1,1623 * 10^{-5} * T^3$$

- A partir dos dados experimentais das temperaturas e vazões obtidas na pasteurização do suco de laranja natural, sob três diferentes temperaturas de processo (82,5 °C; 85,0 °C e 87,0 °C) e sob dez diferentes tempos de retenção (11,09 s; 12,29 s; 13,87 s; 15,82 s; 18,49 s; 21,34 s; 35,13 s; 43,91 s; 50,09 s e 58,55 s), a correlação empírica para a transferência de calor determinada neste trabalho com água destilada foi empregada para a determinação do coeficiente de transferência de calor. O modelo regressão múltipla linear foi utilizado para ajustar os valores obtidos do coeficiente de transferência de calor do suco de laranja natural, escoando em um canal formado por duas placas, em escoamento turbulento sob fluxo contracorrente, com um coeficiente de determinação R^2 de 99,9742 %:

$$h = (2.554,15 + 7.748,13 * \bar{v} - 116.419,0 * K - 1.785,97 * n) \pm 1,9827$$

- Dos dados experimentais, a análise de variância indicou que a razão da atividade da enzima presente no suco processado em relação a atividade presente no suco não processado, foi significativamente influenciada pelos fatores: temperatura de pasteurização, tempo de retenção e pH. Superfícies de resposta indicaram uma forte influência do pH sobre o grau da inativação da pectinesterase. Pode ser observado que para um valor fixo de tempo de retenção (35 s), para valores de pH menores que 3,95 e para valores maiores que 3,95, a uma dada temperatura entre 82,5 °C e 87,0 °C, o nível de inativação é o mesmo, ou seja, ocorreu um ponto de mínima inativação a pH 3,95. O modelo ajustado, com as variáveis codificadas, obtido com um R^2 de 0,7594 é como segue:

$$\hat{Y} = 2,99406 - 6,52085 * 10^{-2} * T + 3,31739 * 10^{-3} * T^2 - 7,58899 * 10^{-6} * t^2 - 9,47668 * 10^{-3} * pH^2 + 5,94013 * 10^{-5} * T * t$$

- Este trabalho contribuiu no estudo da transferência de calor do suco de laranja natural durante o processo de pasteurização em trocador de calor tipo placas, obtendo um modelo preditivo do coeficiente de transferência de calor do suco escoando no canal formado entre duas placas, em regime turbulento sob fluxo contracorrente. Além disso, elucidou melhor o comportamento reológico do suco frente a variação da temperatura, parâmetro muito importante para o dimensionamento correto de qualquer equipamento envolvendo troca de calor.

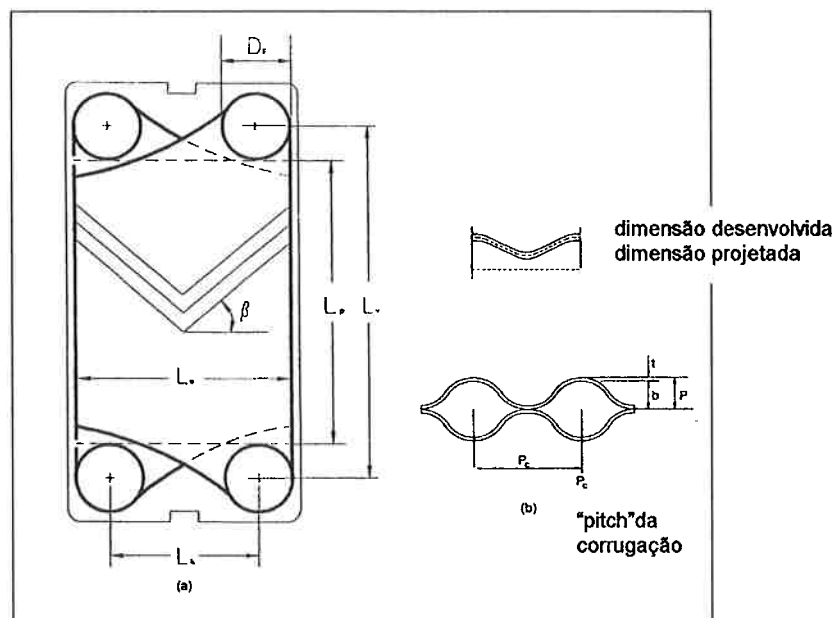
 - Este trabalho tem o mérito de permitir a aplicação da metodologia apresentada para outros alimentos líquidos, de modo que qualquer emprego da transferência de calor com alimentos de comportamento reológico não-Newtoniano pode ser realizado. Além disso, no caso específico do suco de laranja natural, o dimensionamento correto da área efetiva de transferência de calor para qualquer trocador de calor tipo placas pode ser executado a partir da velocidade mássica do canal que independe das características da placa e dos parâmetros reológicos do suco.
-

ANEXO I

Metodologia de Cálculo

O projeto de trocadores de calor tipo placas é altamente especializado, considerando a variedade de arranjos disponíveis para as placas. Diferente do trocador “shell and tube”, cujos dados de projeto e métodos são facilmente disponíveis, o projeto do trocador de calor tipo placas continua sendo proprietário por natureza. Os fabricantes desenvolveram seus próprios projetos computadorizados aplicáveis aos trocadores de sua manufatura. Nenhuma publicação está disponível a respeito de um projeto rigoroso para este tipo de trocador (KAKAÇ & LIU, 1998)

Uma das características mais importantes do trocador de calor tipo placas é a alta taxa de transferência de calor induzida pela corrugação das placas, mesmo a valores baixos do número de Reynolds. A Figura I.1 ilustra um típica placa com as dimensões principais e dois tipos de corrugação.



FONTE: Kakaç & Liu, 1998.

FIGURA I.1: Dimensões principais de uma placa do tipo “Chevron” (a) e dimensões projetada e desenvolvida da placa e sua respectiva seção transversal, normal a direção do fluxo (b).

A corrugação aumenta a área superficial da placa em comparação com a área plana original. Para expressar o aumento do comprimento desenvolvido, em relação ao comprimento projetado, um fator de aumento de superfície ϕ é então definido como a razão entre o comprimento desenvolvido em relação ao projetado:

$$\phi = \frac{\text{comprimento desenvolvido}}{\text{comprimento projetado}} \quad (\text{I.1})$$

O valor de ϕ dado pela equação I.1 é a razão da área efetiva, A e a área projetada da placa A_p , onde A_p pode ser aproximada de (ver Figura I.1):

$$A_p = L_p - L_w \quad (\text{I.2})$$

e L_p e L_w pode ser estimados da distância entre conexões L_v e L_h e do diâmetro da conexão D_p , conforme segue:

$$L_p \cong L_v - D_p \quad (\text{I.3})$$

$$L_w \cong L_h - D_p \quad (\text{I.4})$$

O valor de ϕ é usado para calcular o caminho do fluxo efetivo.

O fluxo do canal é o conduto formado por duas placas adjacentes entre as gaxetas. A seção transversal de uma superfície corrugada sendo muito complexa, o espaçamento médio do canal, b , é definido como ilustra a Figura I.1:

$$b = p - t \quad (\text{I.5})$$

onde p é o “pitch” da placa ou a profundidade externa da placa corrugada e t é a espessura da placa, b é também a espessura da gaxeta completamente comprimida, quando as corrugações da placa estão em contato metálico. O “pitch” da placa não deve ser confundido com o “pitch” da corrugação. O espaçamento do canal, b é necessário para calcular a velocidade mássica e o número de Reynolds e é portanto um dado muito importante para o dimensionamento correto do trocador. O “pitch” da placa pode

também ser determinado do comprimento do arranjo de placas comprimido L_c , que é fácil de ser obtido experimentalmente, ou do desenho do arranjo e conforme segue:

$$p = \frac{L_c}{N_f} \quad (\text{I.6})$$

onde N_f é o número total de placas.

O diâmetro equivalente do canal, D_e , é definido como:

$$D_e = \frac{4 * \text{área de fluxo do canal}}{\text{perímetro molhado}} = \frac{4 * A_c}{P_w} \quad (\text{I.7})$$

$$D_e = \frac{4 * b * L_w}{2 * (b + L_w * \phi)} \cong \frac{2 * b}{\phi} \quad (\text{I.8})$$

uma vez que $b \ll L_w$.

Como no caso da placa do trocador de calor da ARMFIELD, a mesma não apresenta corrugação, o fator ϕ é numericamente igual a 1.

Assim o diâmetro equivalente do canal passa a ser definido como:

$$D_e \cong 2 * b \quad (\text{I.9})$$

A estimativa do coeficiente de película de transferência de calor em um trocador de calor tipo placas envolve correlações referentes a transferência de calor entre as passagens de fluxo. O modelo convencional para tais passagens emprega correlações aplicáveis para tubos definindo um diâmetro equivalente para passagens não-circulares, que é substituído pelo diâmetro d , na seguinte correlação (KAKAÇ & LIU, 1998; INCROPERA, 1996)

$$\frac{hD_e}{k} = a \left(\frac{D_e G}{\mu} \right)^b \left(\frac{c_p \mu}{k} \right)^c \left(\frac{\mu_b}{\mu_w} \right)^d \quad (\text{I.10})$$

onde De é o diâmetro equivalente definido pela equação I.9. Valores de a , b , c e d , dependem das características do fluxo e da geometria da placa.

O número de Reynolds, Re , baseado na velocidade mássica do canal e diâmetro equivalente, De , do canal é definido como:

$$Re = \frac{G_c * D_e}{\mu} \quad (I.11)$$

A velocidade mássica do canal é dada por:

$$G_c = \frac{\dot{m}}{N_{cp} * b * L_w} \quad (I.12)$$

onde N_{cp} é o número de canais por passe e obtido de:

$$N_{cp} = \frac{N_t - 1}{2 * N_p} \quad (I.13)$$

onde N_t é o número total de placas e N_p é o número de passes.

Assim, a equação I.10 pode ser expressa:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \cdot \left(\frac{\mu_c}{\mu_w}\right)^d \quad (I.14)$$

Assumindo $\mu_c \approx \mu_w$, para aplicações líquido – líquido, temos a equação acima simplificada:

$$Nu = a \cdot Re^b \cdot Pr^c \quad (I.15)$$

sendo:

Nu é o número de Nusselt (adimensional)

Re é o número de Reynolds (adimensional)

Pr é o número de Prandtl (adimensional)

$$Nu = \frac{h * D_e}{k} \quad Re = \frac{G_c * D_e}{\mu} \quad Pr = \frac{c_p * \mu}{k}$$

Onde:

h é o coeficiente de película troca térmica por convecção (W/m².K)

D_e é o diâmetro equivalente do escoamento (m)

k é a condutividade térmica do fluido (W/m.K)

As propriedades termofísicas necessárias para aplicar o modelo matemático proposto, foram calculadas para a aplicação com água de modelos empíricos obtidos da literatura em função da temperatura média empregada, apresentados como segue:

Para condutividade térmica da água válida entre 0 e 350°C:

$$k = -0,3838 + 0,005254 \cdot T(K) - 0,000006369 \cdot T^2(K) \quad (\text{W/m.K}) \quad (\text{I.16})$$

Densidade da água válida entre 0 e 100°C:

$$\rho = -0,0036 \cdot T^2(^{\circ}C) + 1,8712 \cdot T(^{\circ}C) + 755,13 \quad (\text{kg/m}^3) \quad (\text{I.17})$$

Calor específico da água válida entre 0 e 350°C:

$$c_p = 4186,8 \cdot (0,6741 + 0,002825 \cdot T(K) - 0,000008371 \cdot T^2(K) + 0,000000008601 \cdot T^3(K)) \quad (\text{J/kg.K}) \quad (\text{I.18})$$

A viscosidade da água válida entre 0 e 100°C:

$$1/\mu = 2,1482 \cdot \left[(T(^{\circ}C) - 8,435) + \sqrt{8078 + (T(^{\circ}C) - 8,435)^2} - 120 \right] \quad (\text{m}^2/\text{N.s}) \quad (\text{I.19})$$

Combinando as equações I.11, I.12 com a I.9, obtemos a expressão abaixo para o adimensional Re que pode ser calculado sem o valor de b , que é o espaçamento médio do canal, cujo valor é difícil de obter na prática.

$$\text{Re} = \frac{\dot{m} \cdot 2 \cdot b}{N_{cp} \cdot b \cdot L_w \cdot \mu} = \frac{2 \cdot \dot{m}}{N_{cp} \cdot L_w \cdot \mu} \quad (\text{I.20})$$

Substituindo as expressões dos adimensionais na equação I.15 da correlação empírica temos:

$$\frac{h \cdot 2 \cdot b}{k} = a \cdot \left(\frac{2 \cdot \dot{m}}{N_{cp} \cdot L_w \cdot \mu} \right)^b \cdot \left(\frac{c_p \cdot \mu}{k} \right)^c \quad (\text{I.21})$$

A partir de pontos experimentais obtidos da seção de regeneração do trocador de calor de placas (temperaturas e vazão de ambas as correntes) e considerando que nesta seção do trocador as correntes de líquido que passam através dos canais são do mesmo fluido produto, no caso a água destilada, com a mesma vazão mássica, arranjo de placas simétrico e com a diferença de temperatura constante, ou seja, a “driving-force” é a mesma, podemos afirmar então que o coeficiente de película de transferência de calor em ambos os lados da placa são aproximadamente iguais e portanto podemos para este caso especial podemos indicar a seguinte expressão para o coeficiente global de transferência de calor:

$$\frac{1}{U} = \frac{2}{h} + \frac{t}{K_p} \quad (\text{I.22})$$

Onde:

- U é o coeficiente global de troca térmica do trocador de calor para a seção de regeneração (W/m².K)
- t é espessura da placa (m)
- K_p é a conectividade térmica do material da placa (W/m.K)

As relações de balanço de calor em trocadores de calor tipo placas são as mesmas para os trocadores tubulares. A carga térmica requerida para as correntes quente e fria é:

$$Q_r = (\dot{m} \cdot cp)_c \cdot (T_{c2} - T_{c1}) = (\dot{m} \cdot cp)_h \cdot (T_{h1} - T_{h2}) \quad (\text{I.23})$$

Por outro lado, a carga térmica realmente obtida é definida como:

$$Q_e = U \cdot A_e \cdot \Delta T_m \quad (\text{I.24})$$

Onde:

- Q_e é carga térmica trocada (W)
- ΔT_m é a diferença média logaritmica da temperatura na seção (K)
- A_e é a área total desenvolvida de todas as placas efetivas, que é, $N_f - 2$, que não considera as duas placas finais. (m²)

A partir da expressão I.24 e dos pontos experimentais de temperatura nas entradas e saídas das correntes da seção, bem como medidas das vazões mássicas, é possível determinar o coeficiente de película h pela expressão I.22. Obtendo diferentes valores de h para diferentes arranjos e diferentes vazões mássicas, é possível obter os

respectivos valores de Nu que podem ser correlacionados com os respectivos valores de Re e Pr . Através da linearização da equação I.15:

$$\ln Nu = \ln a + b \cdot \ln Re + c \cdot \ln Pr \quad (I.25)$$

Ajustando os dados obtidos por uma regressão multilinear os parâmetros a , b e c podem ser determinados. Estes coeficientes são de fundamental importância pois permite a determinação do coeficiente de troca térmica por convecção para outras aplicações do trocador para diferentes fluidos semelhantes à água, que define o coeficiente global de troca térmica do trocador de calor e consequentemente a área necessária de troca térmica.

ANEXO II

Telas do Programa Visual Basic v. 4.0

FIGURA II.1: Tela 1 : Entrada de dados para o programa.

Dados de entrada

Dados iniciais
Digite o número de seções (1, 2, ou 3) :

Dados de projeto

Fluido produto
Vazão (Kg/h) :
Fluido :

Fluido Térmico
Vazão (Kg/h) : Calculado
Fluido :

Arranjo (Digite primeiro o número de passes e depois o de passagens)
Fluido produto : de de
Fluido térmico : de

Resultados parciais

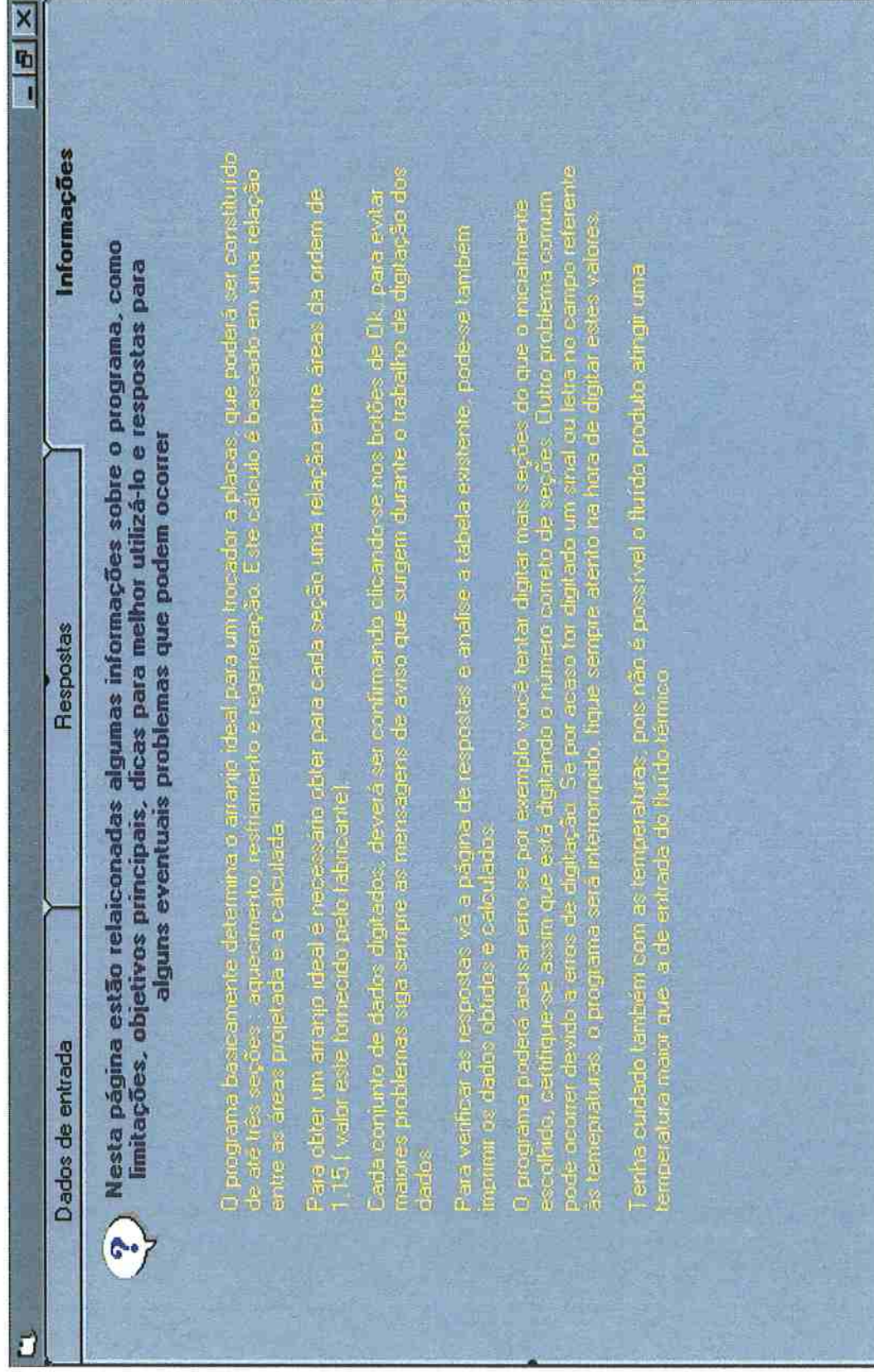
Seção : **Temperaturas médias**
Tentativa : **Fluido produto** **Fluido térmico**
Perda de carga para o produto(bar) **Bazão entre áreas**

Confirme seus dados

Confirme seus dados

Lembre-se que para obter os resultados completos, você pode imprimir uma página de resultados ou então verificar a tabela na página de respostas

FIGURA II.3: Tela 3 : Informações sobre o programa.



LISTAGEM DO PROGRAMA

'Versão 4 do programa "ar" para cálculo do arranjo ideal para o trocador
 'Utilização de equações para descrever o comportamento das propriedades
 'Utilização de equações para cálculo de números adimensionais como o Nusselt

'Declaração de variáveis

Dim fp(), ft() As Variant	'Fluidos utilizados
Dim secao() As Variant	'Seção estudada
Dim mp(), mt() As Single	'Vazões mássicas de projeto dos fluidos
Dim t1(), t2() As Single	'Temperaturas de entrada e saída do produto
Dim t3(), t4() As Single	'idem térmico
Dim p1(), p2() As Single	'Número de passes do arranjo
Dim d1(), d2() As Single	'Número de passagens do arranjo
Dim cpp, viscop, densp, condp As Single	'Características do fluido produto
Dim cpt, viscot, denst, condst As Single	' idem fluido térmico
Dim jp(), jt() As Single	'Parâmetro de auxílio para h
Dim hp(), ht() As Single	'H do fluido
Dim np As Single	'Número de placas de fluxo
Dim a As Single	' Área da placa
Dim de As Single	' Diâmetro equivalente da placa
Dim l As Single	' Dimensão característica da placa
Dim U() As Single	' Coeficiente global de troca térmica
Dim lmtd() As Single	' Diferença logarítmica de temperaturas
Dim acalc() As Single	' Área calculada
Dim condm As Single	' Condutividade térmica do metal
Dim r() As Single	' Razão entre as áreas calculada e projetada
Dim lwfp(), lwft() As Single	' Perda de carga
Dim Q As Single	' Calor envolvido no sistema
Dim j, i, k, m, n, c, b As Integer	' Contadores auxiliares
Dim Rep(), Ret() As Single	'Reynolds para o fluido produto e para o térmico
Dim Nup(), Nut() As Single	'Nusselt para o fluido produto e para o térmico

```

Dim Prp(), Prt() As Single      'Prandt para o fluido produto e para o térmico
Dim incrusp(), incrust() As Single    'Fatores de Incrustação dos fluidos
Dim message As String          ' Variáveis para mensagens
Dim dtensaio() As Variant      ' Data do ensaio
Dim dialogtype As Integer
Dim title As String
Dim tmed1, tmed2 As Single

```

Option Explicit

Private Sub Alterasec()

```

If j = 1 Then
    MsgBox " Você só pode digitar uma seção "
End If

If i < m Then
    i = m
End If

m = 1
n = n + 1

'Inclusão de nova seção
ReDim Preserve secao(j), fp(j), ft(j), dtensaio(j)
ReDim Preserve mp(j, i), mt(j, i), jp(j, i), jt(j, i)
ReDim Preserve t1(j, i), t2(j, i), t3(j, i), t4(j, i)
ReDim Preserve p1(j, i), p2(j, i), d1(j, i), d2(j, i)
ReDim Preserve hp(j, i), ht(j, i), lmt(j, i), lwfp(j, i)
ReDim Preserve acalc(j, i), lwft(j, i), U(j, i), r(j, i)
ReDim Preserve Rep(j, i), Ret(j, i), Prp(j, i), Prt(j, i), Nup(j, i), Nut(j, i)
ReDim Preserve incrusp(j), incrust(j)

```

'Armazenamento dos dados

mp(n, m) = vp.Text

t1(n, m) = tprod1.Text: t2(n, m) = tprod2.Text

fp(n) = fprod.Text: ft(n) = fterm.Text: secao(n) = sec.Text

t3(n, m) = tterm1.Text: t4(n, m) = tterm2.Text

p1(n, m) = pas1.Text: d1(n, m) = div1.Text

p2(n, m) = pas2.Text: d2(n, m) = div2.Text

incrusp(n) = fip.Text: incrust(n) = fip.Text

dtensaio(n) = Data.Text

'Início dos cálculos

tmed1 = (t1(n, m) + t2(n, m)) / 2

tmed2 = (t3(n, m) + t4(n, m)) / 2

np = (p1(n, m) * d1(n, m)) + (p2(n, m) * d2(n, m))

calculos

If n = j Then

 MsgBox " Você não mais poderá alterar a seção do trocador "

Else

 MsgBox " Digite agora as propriedades dos fluídos"

End If

End Sub

Private Sub Command1_Click()

'Preenchendo o cabeçalho da tabela

```
Table.Row = 0
```

'preenchendo a linha principal

```
Table.Col = 1: Table.Text = " Vazão (Kg/h)"
```

```
Table.Col = 2: Table.Text = "LMTD"
```

```
Table.Col = 3: Table.Text = " Fator Incrus. - prod."
```

```
Table.Col = 4: Table.Text = " Fator Incrus. - term."
```

```
Table.Col = 5: Table.Text = "H-prod"
```

```
Table.Col = 6: Table.Text = "H-term"
```

```
Table.Col = 7: Table.Text = "U (W/m2*s)"
```

```
Table.Col = 8: Table.Text = "Razão das áreas"
```

```
Table.Col = 9: Table.Text = "Perda de carga do produto(bar)"
```

```
Table.Col = 10: Table.Text = "Perda de carga do térmico(bar)"
```

```
Table.Col = 11: Table.Text = " Seção"
```

'preenchendo a coluna principal

```
Table.Col = 0
```

```
Dim counter As Integer
```

```
For counter = 1 To 50 Step 1
```

```
    Table.Row = counter
```

```
    Table.Text = counter
```

```
    Table.Row = 0: Table.Col = 0: Table.Text = "Tentativas"
```

```
Next
```

' Ajustando o tamanho das colunas

```
For counter = 0 To 11 Step 1
```

```
    Table.ColWidth(counter) = 1300
```

```
Next
```

' Ajustando o tamanho da linha principal

```
Table.RowHeight(0) = 500
```

' Alinhando as colunas

```
For counter = 1 To 11 Step 1
```

```
    Table.ColAlignment(counter) = 2
```

```
Next
```


'Preenchendo as linhas e colunas da tabela com os dados do programa

Dim a, b, c As Integer

For a = 1 To j Step 1

For b = 1 To i Step 1

c = c + 1

If b < c Then

Table.Row = c

Else

Table.Row = b

End If

If r(a, b) = 0 And lmtd(a, b) = 0 Then

Table.Col = 1: Table.Text = "*****"

Table.Col = 2: Table.Text = "*****"

Table.Col = 3: Table.Text = "*****"

Table.Col = 4: Table.Text = "*****"

Table.Col = 5: Table.Text = "*****"

Table.Col = 6: Table.Text = "*****"

Table.Col = 7: Table.Text = "*****"

Table.Col = 8: Table.Text = "*****"

Table.Col = 9: Table.Text = "*****"

Table.Col = 10: Table.Text = "*****"

Table.Col = 11: Table.Text = "*****"

Else

Table.Col = 1: Table.Text = mp(a, b) * 3600

```

Table.Col = 2: Table.Text = Format(lmtd(a, b), "##.00")
Table.Col = 3: Table.Text = Format(incrusp(a), "scientific")
Table.Col = 4: Table.Text = Format(incrust(a), "scientific")
Table.Col = 5: Table.Text = Format(hp(a, b), "#####.00")
Table.Col = 6: Table.Text = Format(ht(a, b), "#####.00")
Table.Col = 7: Table.Text = Format(U(a, b), "#####.00")
Table.Col = 8: Table.Text = Format(r(a, b), "##.00")
Table.Col = 9: Table.Text = Format(lwfp(a, b), "scientific")
Table.Col = 10: Table.Text = Format(lwft(a, b), "scientific")
Table.Col = 11: Table.Text = secao(a)

```

```

End If

```

```

Next b

```

```

Next a

```

```

End Sub

```

```

Private Sub Command2_Click()

```

```

    End

```

```

End Sub

```

```

Private Sub confirma1_Click()

```

```

    If k > 0 Then

```

```

        MsgBox " Não é permitido a alteração deste campo, caso queira alterar o
número de seções, favor reiniciar o programa"

```

```

    End If

```

```

    j = nsec.Text

```

```

    i = 1

```

```

    k = 1: m = 0: n = 0: i = 0

```

```
message = "DIGITE AS PROPRIEDADES DO TROCADOR"  
dialogtype = vbOKOnly + vbExclamation  
title = "Arranjo ideal"  
MsgBox message, dialogtype, title
```

End Sub

Private Sub confirma2_Click()

'Verificação da seção escolhida

If n = 0 Then

 n = 1

Else

 Dim response As Integer

 message = " Você alterou a seção na qual estava trabalhando ? "

 dialogtype = vbYesNo + vbQuestion

 title = " ATENÇÃO"

 response = MsgBox(message, dialogtype, title)

 If response = vbYes Then

 Alterasec

 Exit Sub

 End If

End If

If i = m Then

 m = m + 1 : i = i + 1

Else

 m = m + 1

End If

ReDim Preserve secas(j), fp(j), ft(j)

ReDim Preserve mp(j, i), mt(j, i), jp(j, i), jt(j, i)

ReDim Preserve t1(j, i), t2(j, i), t3(j, i), t4(j, i)

ReDim Preserve p1(j, i), p2(j, i), d1(j, i), d2(j, i)

ReDim Preserve hp(j, i), ht(j, i), lmt(j, i), lwfp(j, i)

ReDim Preserve acalc(j, i), lwft(j, i), U(j, i), r(j, i)

ReDim Preserve Rep(j, i), Ret(j, i), Prp(j, i), Prt(j, i), Nup(j, i), Nut(j, i)

ReDim Preserve incrusp(j), incrust(j)

ReDim Preserve dtensaio(j)

mp(n, m) = vp.Text

t1(n, m) = tprod1.Text: t2(n, m) = tprod2.Text

fp(n) = fprod.Text: ft(n) = fterm.Text: secas(n) = sec.Text

t3(n, m) = tterm1.Text: t4(n, m) = tterm2.Text

p1(n, m) = pas1.Text: d1(n, m) = div1.Text

p2(n, m) = pas2.Text: d2(n, m) = div2.Text

incrusp(n) = fip.Text: incrust(n) = fit.Text

dtensaio(n) = Data.Text

'Início dos cálculos

tmed1 = (t1(n, m) + t2(n, m)) / 2

tmed2 = (t3(n, m) + t4(n, m)) / 2

np = (p1(n, m) * d1(n, m)) + (p2(n, m) * d2(n, m))

calculos

End Sub

Private Sub calculos()

Dim a, l, de, e, condm As Single

Dim temp As Single

'Constantes utilizadas no problema

a = 0.0049843 'em m2

l = 0.08335 'em metros

de = 0.003 'em metros

e = 0.001 'em metros

condm = 13.4 'em W/m*K

'Transformação para Kevin das temperaturas

rtmed1.Text = Format(tmed1, "00.00")

rtmed2.Text = Format(tmed2, "00.00")

tmed1 = tmed1

tmed2 = tmed2 + 273.15

'Calculo das propriedades dos fluidos nas temperaturas médias

'1)densidade em Kg/m3

denst = -0.0036 * ((tmed2) ^ 2) + (1.8712 * tmed2) + 755.13

densp = (-0.0014 * tmed1 + 1.077) * 1000

'2)Condutividade Térmica (W/m*K)

condt = -0.3838 + 0.005254 * tmed2 - 0.000006369 * (tmed2 ^ 2)

condp = ((7 * 10 ^ (-10) * (tmed1) ^ 3) - (6 * (10 ^ (-6)) * (tmed1) ^ 2) + (0.0017 * tmed1) + 0.533)

'3)Calor específico (J/Kg*K)

cpt = (0.6741 + 0.002825 * tmed2 - 0.000008371 * (tmed2 ^ 2) + 0.000000008601 * (tmed2 ^ 3)) * 4186.8

cpp = 0.0065 * ((tmed1) ^ 2) + (0.4846 * tmed1) + 3913.9

'4)Viscosidade (N*s/m2)

viscop = (0.0052 * ((tmed1) ^ 2) - (0.746 * tmed1) + 36.683) * 0.001

viscot = (1 / (2.1482 * (((tmed2 - 273.15) - 8.435) + (8078.4 + ((tmed2 - 273.15) - 8.435) ^ 2) ^ 0.5) - 120)) * 0.1

'Determinação da vazão do fluido térmico

```

mp(n, m) = mp(n, m) / 3600
mt(n, m) = (mp(n, m) * cpp * (t2(n, m) - t1(n, m))) / (cpt * (t3(n, m) - t4(n, m)))
vt.Text = Format(mt(n, m) * 3600, "####.##")

```

' Cálculo dos adimensionais para os fluídos

```
Rep(n, m) = (2 * mp(n, m)) / (0.0598 * viscop * d1(n, m))
```

```
Ret(n, m) = (2 * mt(n, m)) / (0.0598 * viscot * d2(n, m))
```

```
Prp(n, m) = (cpp * viscop) / condp
```

```
Prt(n, m) = (cpt * viscot) / condt
```

```
Nup(n, m) = 0.007762 * (Rep(n, m) ^ 1.00342) * (Prp(n, m) ^ 0.658694)
```

```
Nut(n, m) = 0.007762 * (Ret(n, m) ^ 1.00342) * (Prt(n, m) ^ 0.658694)
```

'Rotina de cálculos

```
If (t4(n, m) - t1(n, m)) - (t3(n, m) - t2(n, m)) <> 0 Then
```

```
  lmtd(n, m) = ((t4(n, m) - t1(n, m)) - (t3(n, m) - t2(n, m))) / Log((t4(n, m) - t1(n, m)) /
(t3(n, m) - t2(n, m)))
```

```
Else
```

```
  lmtd(n, m) = t4(n, m) - t1(n, m)
```

```
End If
```

```
Q = mp(n, m) * cpp * (t2(n, m) - t1(n, m))
```

```
hp(n, m) = (Nup(n, m) * condp) / de
```

```
ht(n, m) = (Nut(n, m) * condt) / de
```

```
temp = (1 / hp(n, m)) + (1 / ht(n, m)) + (e / condm)
```

```
temp = temp + incrust(n) + incrusp(n)
```

```
U(n, m) = 1 / temp
```

```
acalc(n, m) = Q / (U(n, m) * lmtd(n, m))
```

```
lwfp(n, m) = 52.78 * ((mp(n, m) / (a * d1(n, m))) ^ 1.7) * (l ^ 2.7) * (de ^ -3) * (viscop
^ 0.3) * ((densp * 9.8) ^ -1)
```

```
lwft(n, m) = 52.78 * ((mt(n, m) / (a * d2(n, m))) ^ 1.7) * (l ^ 2.7) * (de ^ -3) * (viscot ^
0.3) * ((denst * 9.8) ^ -1)
```

```
lwfp(n, m) = lwfp(n, m) * 0.0000981: lwft(n, m) = lwft(n, m) * 0.0000981  
r(n, m) = (a * (np - 1)) / acalc(n, m)
```

'Apresentação dos resultados parciais

```
rsec.Text = secao(n)
```

```
rperda.Text = lwfp(n, m)
```

```
rarea.Text = r(n, m)
```

```
rtent.Text = m
```

```
message = "VOCÊ PODE REALIZAR MAIS UMA TENTATIVA OU ENTÃO  
VERIFICAR OS RESULTADOS NA PÁGINA DE RESPOSTAS"
```

```
dialogtype = vbOKOnly + vbInformation
```

```
title = "ATENÇÃO"
```

```
MsgBox message, dialogtype, title
```

```
End Sub
```

```
Private Sub Imprime_Click()
```

'Rotina de impressão dos dados obtidos

```

Printer.Orientation = 2
Printer.Print "": Printer.Print ""
' Printer.ForeColor = &HFF&
Printer.FontName = Screen.Fonts(19)
Printer.FontSize = 12
Printer.Print Tab(10); Format(Now, "dddd,dd mmmm,yyyy")
Printer.Print "": Printer.Print "": Printer.Print ""
Printer.ForeColor = &HFF0000
Printer.Print Tab(22); " Determinação do arranjo ideal para o trocador de calor à
placas"
Printer.ForeColor = &H0&
Printer.FontName = Screen.Fonts(19)

Dim a, b, c As Integer

For a = 1 To j Step 1
    b = 1
    Printer.Print "": Printer.Print ""
    Printer.Print Spc(6); " Seção do trocador :"; Spc(2); secao(a)
    Printer.Print Spc(6); " Fluido produto : "; Spc(5); fp(a)
    Printer.Print Spc(6); " Fluido térmico : "; Spc(5); ft(a)
    Printer.Print Spc(6); " Data do Ensaio : "; Spc(5); dtensaio(a)
    Printer.Print Spc(6); " Fator de Incrustação - Produto : "; Spc(2);
Format(incrusp(a), "SCIENTIFIC")
    Printer.Print Spc(6); " Fator de Incrustação - Térmico : "; Spc(2);
Format(incrust(a), "SCIENTIFIC")
    Printer.Print "": Printer.Print ""
    Printer.ForeColor = &HFF0000

```



```

Printer.Print Spc(6); "Vazão"; Spc(5); "LMTD"; Spc(4); "TP1"; Spc(5); "TP2";
Spc(5); "TT1"; Spc(4); "TT2"; Spc(4); "U"; Spc(8); "razão"; Spc(6); "LWF-prod";
Spc(6); "LWF-term"; Spc(8); "Arranjo"; Spc(6); "h-Prod"; Spc(6); "h-term"

```

```

Printer.Print Spc(7); "Kg/h"; Spc(6); " °C"; Spc(6); " °C"; Spc(6); " °C"; Spc(6);
" °C"; Spc(4); " °C"; Spc(1); " W / m ^ 2°C"; Spc(16); " Bar "; Spc(12); "Bar ";
Spc(23); " W / m ^ 2 °C"; Spc(2); " W / m ^ 2 °C"

```

```
Printer.Print ""
```

```
Printer.ForeColor = &H0&
```

```
For b = 1 To i Step 1
```

```
  If r(a, b) = 0 And lmtd(a, b) = 0 Then
```

```
    Printer.Print Spc(15); "*****"
```

```
  Else
```

```

    Printer.Print Spc(6); Format(mp(a, b) * 3600, "###.00"); Spc(5);
    Format(lmtd(a, b), "00.00"); Spc(4); Format(t1(a, b), "00.00"); Spc(3); Format(t2(a, b),
    "00.00"); Spc(3); Format(t3(a, b), "00.00"); Spc(3); Format(t4(a, b), "00.00"); Spc(3);
    Format(U(a, b), "0000.00"); Spc(4); Format(r(a, b), "##0.00"); Spc(6); Format(lwfp(a,
    b), "scientific"); Spc(6); Format(lwft(a, b), "scientific"); Spc(6); p1(a, b); Spc(1); "de";
    Spc(1); d1(a, b); "/"; p2(a, b); "de"; d2(a, b); Spc(1); Format(hp(a, b), "00000.00");
    Spc(4); Format(ht(a, b), "00000.00")

```

```
  End If
```

```
Next b
```

```
Next a
```

```
Printer.EndDoc
```

End Sub

Private Sub Picture3_Click()

'Preenchendo o cabeçalho da tabela

Table.Row = 0

'preenchendo a linha principal

Table.Col = 1: Table.Text = " Vazão (Kg/h)"

Table.Col = 2: Table.Text = "LMTD"

Table.Col = 3: Table.Text = "Fator Incrust.-prod"

Table.Col = 4: Table.Text = "Fator Incrust.-term"

Table.Col = 5: Table.Text = "H-prod"

Table.Col = 6: Table.Text = "H-term"

Table.Col = 7: Table.Text = "U (W/m2*s)"

Table.Col = 8: Table.Text = "Razão das áreas"

Table.Col = 9: Table.Text = "Perda de carga do produto(bar)"

Table.Col = 10: Table.Text = "Perda de carga do térmico(bar)"

Table.Col = 11: Table.Text = " Seção"

'preenchendo a coluna principal

Table.Col = 0

Dim counter As Integer

For counter = 1 To 50 Step 1

Table.Row = counter

Table.Text = counter

Table.Row = 0: Table.Col = 0: Table.Text = "Tentativas"

Next

' Ajustando o tamanho das colunas

For counter = 0 To 11 Step 1

Table.ColWidth(counter) = 1300

Next

' Ajustando o tamanho da linha principal

Table.RowHeight(0) = 500

' Alinhando as colunas

```
For counter = 1 To 11 Step 1
    Table.ColAlignment(counter) = 2
Next
```

' Preenchendo as linhas e colunas da tabela com os dados do programa

```
Dim a, b, c As Integer
```

```
For a = 1 To j Step 1
```

```
    For b = 1 To i Step 1
```

```
        c = c + 1
```

```
        If b < c Then
```

```
            Table.Row = c
```

```
        Else
```

```
            Table.Row = b
```

```
        End If
```

```
    If r(a, b) = 0 And lmtd(a, b) = 0 Then
```

```
        Table.Col = 1: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 2: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 3: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 4: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 5: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 6: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 7: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 8: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 9: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 10: Table.Text = "*****"
```

```
        Table.Col = 11: Table.Text = "*****"
```

Else

Table.Col = 1: Table.Text = mp(a, b) * 3600

Table.Col = 2: Table.Text = Format(lmtd(a, b), "00.00")

Table.Col = 3: Table.Text = Format(incrusp(a), "scientific")

Table.Col = 4: Table.Text = Format(incrust(a), "scientific")

Table.Col = 5: Table.Text = Format(hp(a, b), "0000.00")

Table.Col = 6: Table.Text = Format(ht(a, b), "0000.00")

Table.Col = 7: Table.Text = Format(U(a, b), "0000.00")

Table.Col = 8: Table.Text = Format(r(a, b), "0.00")

Table.Col = 9: Table.Text = Format(lwfp(a, b), "scientific")

Table.Col = 10: Table.Text = Format(lwft(a, b), "scientific")

Table.Col = 11: Table.Text = secao(a)

End If

Next b

Next a

End Sub

Private Sub Picture5_Click()

End

End Sub

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABECITRUS. **Sub produtos da laranja.** [On line] Disponível: <http://www.abecitrus.com.br/subprobr.html>. Arquivado capturado em nov. 1999.
- ALBEROLA J.; IZQUIERDO, L.J. The volatile fraction of orange juice: methods for extraction and study of composition. In: CHARALAMBOUS, G., ed. **Flavor of foods and beverages: chemistry and technology.** New York, Academic Press, 1978. p.283-304.
- ALVES, R.M.V.; GARCIA, E.E.C. Embalagem para sucos de frutas. **Coletânea ITAL**, v.2, n.23, p.105-22, 1993.
- ANUARIO ESTATISTICO DO BRASIL, Rio de Janeiro, v.54, 1994.
- A.P.V. DO BRASIL S.A. **Seminário Paraflow.** São Paulo, s.d. p.30.
- ARRUDA, W.R.; CARDONHA, A.M.S. Avaliação microbiológica de sucos de laranja “in natura” comercializados na cidade de Natal-RN. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 16., Rio de Janeiro, 1998. **Anais.** [Em CD-Rom] Trabalho nº 558.
- ASSOCIATION OF OFFICIAL ANALYTICAL CHEMISTS. **AOAC Official methods of analysis.** 16.ed. Washington, D.C., 1995. v.2.
- BABYLON. **What are pectinesterases.** [On line] Disponível: <http://www.babylon6.demon.co.uk/pe.html>. Arquivado capturado em dez. 1998.
- BASSIOUNY, M.K.; MARTIN, H. Temperature distribution in a your channel plate heat exchanger. **Heat Transfer Engineering**, v.6, n.2, p. 58-72, 1985.

- BUONOPANE, R.; TRUPE, R.; MORGAN, J. Heat transfer design method for plate heat exchangers. **Chemical Engineering Progress**, v.59, n.7, p.57-61, 1963.
- CHAMARRO, J.; ALONSO, J.M.; GARCIA-MARTINEZ, J.L. Enzimes in citrus fruits. In: FOX, P.F., ed. **Food enzymology**. London, Elsevier, 1991. v.1, p.599-624.
- CORRÊA NETO, R.S.; FARIA, J.A.F. Fatores que influem na qualidade do suco de laranja. **Ciência e Tecnologia de Alimentos**, v.19, n.1, p.153-60, 1999.
- EAGERMAN, B.A.; ROUSE, A.H. Heating inactivation temperature-time relationships for pectinesterase inactivation in citrus juice. **Journal of Food Science**, n.41, p.1396-7, 1976.
- FELLERS, J.P. Shelf life and quality of freshly squeezed, unpasteurized, polyethylene-bottled citrus juice. **Journal of Food Science**, v.53, n.6, p.1699-702, 1988.
- _____; CARTER, R.D. Effect of thermal processing and storage of chilled orange juice on flavor quality. **Fruit Processing**, v.3, n.12, p.436-41, 1993.
- FOX, K. Innovations in citrus processing. **Fruit Processing**, v.11, n.4, p.338-48, 1994.
- FURLANETTO, S.M.P.; PAULA, C.R.; GAMBALE, W. Ocorrência de bolores e leveduras em sucos de laranja ao natural. **Revista de Microbiologia**, São Paulo, v.1, n.13, p. 31-4, 1982.
- GRAUMLICH, T.R.; MARCY J.E.; ADAMS J.P. Aseptically packaged orange juice and concentrate: a review of the influence of processing and packaging conditions on quality. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, v.34, p.402-5, 1986.
- HASTING, A.P.M. Practical considerations in the design, operation and control of food pasteurization process. **Food Control**, p.27-32, 1992.

- HATCHER, W.S. et al. Fruit beverages. In: VANDERZAN, C.; SPLITTSTOESSER, D.F., eds. **Compendium of methods for the microbiological examinations of foods**. 3.ed. Washington, American Public Health Association, 1992. p.953-60.
- HOLDSWORTH, S.D. Rheological models used for the prediction of the flow properties of food products: a literature review. **TransICheme**. v.71, part C, p.139-79, 1993.
- IHA, M.H. et al. Avaliação físico-química e higiênico-sanitária do suco de laranja não pasteurizado, engarrafado e comercializado nas cidades de Ribeirão Preto e Araraquara – SP. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE ALIMENTOS, 16., Rio de Janeiro, 1998. **Anais**. [Em CD-Rom] Trabalho n° 292.
- JACKSON, B.; TROUBE, R. Laminar flow in plate heat exchanger. **Chemical Engineering Progress**, v.60, n.7,p.62-5, 1964.
- KAKAÇ S.; LIU H.. **Heat exchangers: selection, rating, and thermal design**. Boca Raton, CRC Press, 1998.
- KIM, H.B.; TADINI, C.C.; SINGH, R.K. Effect of different pasteurization conditions on enzyme inactivation of orange juice in pilot-scale experiments. **Journal of Food Process Engineering**. v.22, n.5, p.395-403, 1999a.
- ____; ____; _____. Heat transfer in a plate exchanger during pasteurization of orange juice. **Journal of Food Engineering**, v.42.p.79-84, 1999b.
- KIMBALL, D.A. **Citrus processing quality control and technology**. New York; Chapman & Hall-ITP, 1991.
- MARQUES, A.C.; TADINI, C.C. Distribuição de temperatura em um trocador de calor tipo placas. In: SIMPOSIO DE INICIAÇÃO CIENTIFICA DA USP, 7./SIMPOSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTIFICA - USP, 1., São Paulo, 1999. **7. SICUSP: resumos**. São Paulo, USP, 1999. v.2, p.264.

- MARRIOT, J. Where and how to use plate heat exchangers. **Chemical Engineering**, v.78, n.8, p.127-34, 1971.
- MATHIAS D.G.; TADINI, C.C. Desempenho térmico de um trocador de calor a placas. In: SIMPOSIO DE INICIAÇÃO CIENTIFICA DA USP, 6., São Paulo 1998. **6. SICUSP: resumos**. São Paulo, USP, 1998. v.2, p.474.
- MCKILLOP, A. A.; DUNKLEY, W.L. Plate heat exchangers - heat transfer. **Industrial and Engineering Chemistry**, v.52, n.9, p.740-4, 1960.
- NASCIMENTO, D.; FURLANETTO, S.M.P. Determinação quantitativa de grupos de bactérias em sucos de laranja ao natural. **Revista de Saúde Pública**, São Paulo, n.15, p. 221-35, 1981.
- NICKDEL, S. et al. Pasteurization of citrus juice with microwave energy in continuous-flow unit. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**, n.41, p.2116-9, 1993.
- OLIVEIRA, R. Exportação de suco deve bater recorde. **Folha de São Paulo**, Agrofolha, 15 jun.1999, p.1.
- ONJUS. **100% advantage**. [On line] Disponível:
<http://www.onjus.com/advantage.html>. Arquivo capturado em 1998.
- PEACOCK, S. Predicting physical properties of factory juices and syrups. **International Sugar Journal**, v.97, n.1162, 1995.
- RAO, M. A.; ANANTHES, W.R.C. Rheology of fluids in food processing. **Food Technology**, p.116-26, 1982.
- ROTHSCHILD, G.; VLIET, C.V.; KARSENTY, A. Pasteurization conditions for juices and comminuted products of Israeli citrus fruits. **Journal of Food Technology**, v.10, p.29-38, 1975.

ROUSE, A.H. Distribution of pectinesterase and total pectin in component parts of citrus fruits. **Food Technology**, v.7, n.9, p.360-2, 1953.

_____; ATKINS, C.D. Heat inactivation of pectinesterase in citrus juice. **Food Technology**, v.6, n.8, p.291-4, 1952.

_____; _____. Further results from a study on heat inactivation of pectinesterase in citrus juices. **Food Technology**, v.7, n.6, p.221-3, 1953.

SCHLÜNDER, E.U. **HEDH Heat Exchanger Design Book**. s.L.; International Centre for Heat and Mass Transfer, 1983. v.1-3.

TOCCHINI, R.P.; NISIDA, A.L.A.C.; BERBARI, S.A.G. Estabilidade do suco de laranja refrigerado, em condições definidas de distribuição e comercialização. **Boletim SBCTA**, n. 27, v.2, p. 128-32, 1993.

USHER, J. Evaluating plate heat exchangers. **Chemical Engineering**, v.77, n.4, p.90-4, 1970.

VERSTEEG, C. et al. Thermostability and orange juice cloud destabilizing properties of multiple pectinesterases from orange. **Journal of Food Science**, v.45, p.969-71, 1980.

VINÇONNEAU, M.; CREVEL, M. Les échangeurs à plaques et à spirales dans l'industrie sucrêre. **Industries et agricoles**, p 825-833, 1976.

WICKER, L.; TEMELLI, F. Heat inactivation of pectinesterase in orange juice pulp. **Journal of Food Science**, v.53, n.1, p.162-4, 1988.