

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS  
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

INFLUÊNCIA REOLÓGICA DE FLUIDOS NÃO NEWTONIANOS  
NA CARACTERIZAÇÃO DA CURVA DE REAÇÃO DO PROCESSO  
DE AQUECIMENTO EM TROCADORES DE CALOR A PLACAS

Marlei Roling Scariot

*Engenheira Química*

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.

*Orientador*

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por Marlei Roling Scariot, aprovada pela Comissão Julgadora em 31 de outubro de 2002.

Campinas, 31 de outubro de 2002.



Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior  
Presidente da Banca

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Mestre em Engenharia de Alimentos.

Campinas, Setembro / 2002

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL

UNICAMP  
BIBLIOTECA CENTRAL  
SEÇÃO CIRCULANTE

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	F/UNICAMP
	Sc73i
V	EX
TOMBO BC/	51911
PROC.	16-837-02
C	<input type="checkbox"/>
D	<input checked="" type="checkbox"/>
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	
Nº CPD	

CM00176266-2

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA  
BIBLIOTECA DA F.E.A. – UNICAMP

BIBID. 275749

Sc73i

Scariot, Marlei Roling

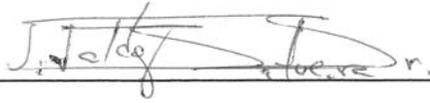
Influência reológica de fluidos não newtonianos na caracterização da curva de reação do processo de aquecimento em trocadores de calor a placas / Marlei Roling Scariot. – Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Vivaldo Silveira Junior  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1. Trocadores (Química). 2. Fluidos não newtonianos.  
3. Aquecimento. I. Silveira Junior, Vivaldo. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia de Alimentos.  
III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS  
BIBLIOTECA DE CIÊNCIAS EXATAS  
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

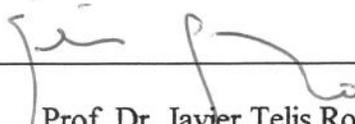
**BANCA EXAMINADORA**



---

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.

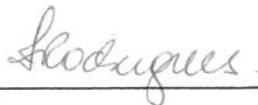
Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP



---

Prof. Dr. Javier Telis Romero

Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNESP (São José do Rio Preto)



---

Prof. Dr. Maria Teresa Moreira Rodrigues

Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP

---

Dr. Alfredo de Almeida Vitali

Instituto de Tecnologia de Alimentos – ITAL – Fruthotec

202553646

*“ O pássaro, antes do vôo, não imagina como vai atravessar o oceano. Sempre que estamos diante de uma situação nova, ficamos perguntando sobre as nossas capacidades, ou se vamos de fato conseguir escalar a montanha.*

*O sucesso não acontece para todos, mas, o sucesso só acontece para aqueles que tentaram algum dia.*

*Na maioria das vezes não estamos dispostos a correr riscos e são poucos aqueles que, confiantes em si e nos seus talentos atiram-se de peito aberto no campo de batalhas.*

*Nada é perfeito, mas tudo que se faz pode ser melhorado...e, se Deus nos manda uma tarefa, é porque ele precisa de nós e acredita em nós... Afinal, não estamos aqui por acaso.*

*Um novo trabalho é um exercitar constante para adaptar-se, aprender a gostar e testar o nosso amor, ou, a nossa capacidade de amar.*

*Um novo trabalho é como um dia que amanhece, carregado de surpresas e oportunidades.*

*Para cada dificuldade na vida. Não esperes milagres do céu... No máximo, a resposta virá em forma de tarefa ”.*

## ***Dedicatória***

*Aos meus pais, Guilherme e Ines, por compartilharem comigo momentos de alegrias e tristezas, pelos exemplos de retidão de caráter e pelo amor que sempre me dedicaram.*

*Ao casal Gilberto e Leila, por estarem sempre presente, pelo carinho e pelo apoio incondicional que sempre demonstraram.*

## *Agradecimentos*

*Ao 'Pai' pela vida.*

*A UNICAMP e ao Departamento de Engenharia de Alimentos desta Faculdade, por possibilitar a complementação da minha formação.*

*A Capes e Cnpq, pelo suporte financeiro na forma de bolsa de estudo.*

*Ao Vivaldo pela orientação, amizade, por todo apoio, paciência e confiança.*

*Aos professores da FEA/DEA, pelo ensino e auxílio.*

*Aos membros da banca, por ajudarem a enriquecer o conteúdo deste trabalho.*

*A Bel pela amizade generosa e pela disposição que sempre teve ao ensinar.*

*Ao Flávio e ao Mauro, pela amizade e pelo apoio nos momentos difíceis.*

*Aos amigos: Carol, Amorim, Zazá, André, Samanta, Ana Maria e Guilherme, Adriana, Clarissa, Sueli, Cíntia, Luciana, Patrícia, Aroldo e a todos os colegas de minha turma pela amizade.*

*Ao Alexandre pela força, confiança e carinho dedicado a mim.*

## ÍNDICE

<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i> .....	<i>X</i>
<i>ÍNDICE DE TABELAS</i> .....	<i>XVI</i>
<i>NOMENCLATURA</i> .....	<i>XVIII</i>
<i>RESUMO</i> .....	<i>XXI</i>
<i>ABSTRACT</i> .....	<i>XXII</i>
<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
<b>2. OBJETIVO</b> .....	<b>2</b>
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>3</b>
<b>3.1 Trocadores de Calor</b> .....	<b>3</b>
3.1.1 Modelos Matemáticos .....	6
<b>3.2 Hidrocolóides</b> .....	<b>8</b>
<b>3.3 Reologia dos Fluidos</b> .....	<b>10</b>
<b>3.4 Caracterização do comportamento não linear em processos dinâmicos</b> .....	<b>12</b>
<b>3.5 Funções de Transferência de Processos Lineares</b> .....	<b>14</b>
3.5.1 Sistemas de Primeira ordem .....	14
3.5.2 Sistemas de Segunda ordem .....	15
3.5.3 Sistemas de Ordens Superiores .....	17
<b>3.6 Estratégias de Controle e Sintonias</b> .....	<b>18</b>
<b>3.7 Controles de Processos</b> .....	<b>22</b>
<b>3.8 Planejamento Fatorial de Ensaios</b> .....	<b>24</b>
<b>4 MATERIAIS E MÉTODOS</b> .....	<b>26</b>
<b>4.1 Materiais</b> .....	<b>26</b>
<b>4.2 Métodos</b> .....	<b>26</b>

4.2.1	Ajuste de Modelos das Propriedades Reológicas dos Fluidos Não Newtonianos .....	26
4.2.2	Adequação do Simulador .....	28
4.2.3	Validação do Modelo Matemático .....	30
4.2.4	Proposições das condições dos ensaios .....	31
4.2.4.1	Condições iniciais de operação .....	31
4.2.4.2	Escolha do Método de Resolução do Sistema de Equações Diferenciais Ordinárias .....	32
4.2.4.3	Escolha da Placa .....	32
4.2.4.4	Escolha da Configuração do TCP.....	32
4.2.5	Curvas de Reação do Processo Adimensionalizadas.....	33
4.2.6	Avaliação dos Perfis de Temperatura Internos ao TCP .....	33
4.2.7	Análise do Fator de Sensibilidade .....	34
4.2.8	Avaliação da Linearidade do Processo .....	35
4.2.9	Planejamento Fatorial Composto Central - PFCC .....	36
4.2.10	Comparação entre Curvas de Reação de Modelos Ajustados e Ensaaiados...38	
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>39</b>
<b>5.1</b>	<b>Modelos das Propriedades Reológicas dos Fluidos de Trabalho.39</b>	
<b>5.2</b>	<b>Validação do Modelo Matemático .....</b>	<b>40</b>
<b>5.3</b>	<b>Verificação do Método de Resolução dos Sistemas de Equações Diferenciais Ordinárias, Escolha do Tipo de Placa e Configuração do TCP. ....</b>	<b>41</b>
5.3.1	Escolha do Método de Resolução do Sistema de Equações Diferenciais.....	41
5.3.2	Escolha da placa .....	42
5.3.3	Escolha da Configuração do TCP.....	42
<b>5.4</b>	<b>Temperaturas Estabilizadas dos Produtos na Saída do TCP.....</b>	<b>44</b>
<b>5.5</b>	<b>Perfis de Temperatura Internos ao TCP .....</b>	<b>45</b>
<b>5.6</b>	<b>Avaliação do Fator de Sensibilidade .....</b>	<b>53</b>
<b>5.7</b>	<b>Caracterização da Linearidade do Processo.....</b>	<b>54</b>
5.7.1	Avaliação do Princípio da Sobreposição .....	54
5.7.1.1	Por Imagem Especular da Resposta.....	54
5.7.1.2	Por Soma das Respostas.....	62
5.7.2	Comparação das Curvas de Reação às Diferentes Concentrações .....	64
<b>5.8</b>	<b>Comparação das Curvas de Reação entre Produtos.....</b>	<b>67</b>
<b>5.9</b>	<b>Ajuste de Modelos para Identificação do Sistema .....</b>	<b>68</b>

<b>5.10</b>	<b>Planejamento Fatorial Composto Central (PFCC) .....</b>	<b>70</b>
5.10.1	PFCC para a Goma-Xantana .....	71
5.10.1.1	Dependência Multivariável do Parâmetro $K_p$ para goma-Xantana .....	72
5.10.1.2	Dependência Multivariável do Parâmetro $\tau$ para goma-Xantana .....	77
5.10.1.3	Dependência Multivariável do Parâmetro $T_D$ para goma-Xantana .....	81
5.10.1.4	Dependência Multivariável do Parâmetro $Z$ para goma-Xantana .....	83
5.10.1.5	Modelos Multivariáveis Reais e Globais para goma-Xantana .....	88
5.10.2	PFCC para a k-Carragena .....	91
5.10.2.1	Análise Multivariável do Parâmetro $K_p$ para k-Carragena .....	91
5.10.2.2	Análise Multivariável do Parâmetro $\tau$ para k-Carragena .....	95
5.10.2.3	Análise Multivariável do Parâmetro $T_D$ para k-Carragena .....	99
5.10.2.4	Análise Multivariável do Parâmetro $Z$ para k-Carragena .....	100
5.10.2.5	Modelos Multivariáveis Reais e Globais para a k-Carragena .....	104
5.10.3	PFCC para a Pectina .....	106
5.10.3.1	Análise Multivariável do Parâmetro $K_p$ para Pectina .....	106
5.10.3.2	Análise Multivariável do Parâmetro $\tau$ para Pectina .....	110
5.10.3.3	Análise Multivariável do Parâmetro $T_D$ para Pectina .....	113
5.10.3.4	Análise Multivariável do Parâmetro $Z$ para Pectina .....	114
5.10.3.5	Modelos Multivariáveis Reais e Globais para Pectina .....	118
<b>5.11</b>	<b>Comentários Gerais .....</b>	<b>120</b>
<b>6.</b>	<b><i>CONCLUSÕES</i> .....</b>	<b>121</b>
<b>7.</b>	<b><i>SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS</i> .....</b>	<b>123</b>
<b>8.</b>	<b><i>REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA</i> .....</b>	<b>124</b>
<b>9.</b>	<b><i>ANEXOS</i> .....</b>	<b>127</b>
<b>9.1</b>	<b>Anexo I – Perturbações Individuais .....</b>	<b>127</b>
<b>9.2</b>	<b>Anexo II - Modelagem Utilizada por Berto (2000) .....</b>	<b>133</b>
<b>9.3</b>	<b>Anexo III – Figuras Obtidas em Ajustes de Parâmetros .....</b>	<b>138</b>
<b>9.4</b>	<b>Anexo IV – Figuras Obtidas a Partir do Método da Curva de Reação .....</b>	<b>140</b>
<b>9.5</b>	<b>Anexo V – Perfis Internos Comparativos Entre Concentrações .....</b>	<b>142</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – (a) Trocador de calor a placas, (b) placa com corrugações inclinadas.....	5
Figura 2 – Estrutura Química – Goma Xantana .....	9
Figura 3 - Estrutura química – Pectina.....	10
Figura 4 - Estrutura química - k-carragena.....	10
Figura 5 – Resposta Adimensional de um sistema de segunda ordem para uma perturbação de grau unitário.....	17
Figura 6 – Exemplo de Curva de Reação do Processo para aplicação em Sintonia de Controladores.....	20
Figura 7 - Diagrama de Blocos do Algoritmo do Simulador Dinâmico readequado.....	29
Figura 8 - Comparação entre os métodos de resolução para o primeiro regime permanente .....	41
Figura 9– Curvas de temperatura de saída do produto, goma-Xantana (1%), para configurações do TCP, com a placa de modelo V13.....	43
Figura 10– Esquema do Trocador de Calor a Placas para configuração 3, onde $j=8$ .....	43
Figura 11– Fluxograma das opções de operação.....	44
Figura 12 – Curvas de reação da temperatura do produto por canal após perturbação de grau na vazão do produto ( $\Delta V_p = -11,375\%$ ) para goma xantana 2%.....	46
Figura 13 – Curvas de reação da temperatura do produto por canal após perturbação de grau na vazão do produto ( $\Delta V_p = -11,375\%$ ) para k - Carragena 2%.....	48
Figura 14 – Curvas de reação da temperatura do produto por canal após perturbação de grau na vazão do produto ( $\Delta V_p = -11,375\%$ ) para pectina 2%.....	50
Figura 15 - Curvas de Reação da Temperatura de saída, para os três produtos, para o canal 7 e subdivisão do canal k1, após Perturbação na Vazão do Produto. ....	52
Figura 16 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizadas para Goma-Xantana (1%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento.....	55
Figura 17- Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para Goma-Xantana (2%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento.....	56
Figura 18- Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para Goma-Xantana (3%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento.....	57
Figura 19 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para k - Carragena (1%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento.....	58
Figura 20 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para k - Carragena (2%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento.....	59
Figura 21 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para k - Carragena (3%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento.....	59

<i>Figura 22 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizadas para Pectina (1%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento .....</i>	<i>60</i>
<i>Figura 23 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizadas para Pectina (2%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 24 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas para Pectina (3%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento .....</i>	<i>61</i>
<i>Figura 25 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbações individuais de diferentes amplitudes da vazão do produto para goma-Xantana a 1%.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 26 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbações individuais de diferentes amplitudes da vazão do produto para k-Carragena a 1%.....</i>	<i>63</i>
<i>Figura 27 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbações individuais de diferentes amplitudes da vazão do produto para Pectina a 1%.....</i>	<i>64</i>
<i>Figura 28 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas após perturbações na vazão do produto a diferentes concentrações para goma-Xantana..</i>	<i>65</i>
<i>Figura 29 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas após perturbações na vazão do produto a diferentes concentrações para Pectina.....</i>	<i>65</i>
<i>Figura 30 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas após perturbações na vazão do produto a diferentes concentrações para k-Carragena.....</i>	<i>66</i>
<i>Figura 31 - Curvas de reação das temperaturas de saída dos três produtos obtidas após perturbação na vazão do produto de -11,375% .....</i>	<i>67</i>
<i>Figura 32 - Exemplo de ajustes das curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbação de grau das variáveis propostas em cada ensaio à diversos modelos matemáticos.....</i>	<i>68</i>
<i>Figura 33 - Exemplo do método da curva de reação do processo para obtenção dos parâmetros gráficos (<math>T_D</math>, <math>K_p</math> e <math>Z</math>) para cálculo dos parâmetros de sintonia de controladores.....</i>	<i>69</i>
<i>Figura 34 - Valores Preditos versus Observados do parâmetro <math>K_p</math> para goma-Xantana..</i>	<i>74</i>
<i>Figura 35 - Superfície de Resposta de <math>K_p</math> em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 36 - Curvas de Contorno para <math>K_p</math> em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto. ....</i>	<i>76</i>
<i>Figura 37 - Valores Preditos versus Observados do parâmetro <math>\tau</math>, para goma-Xantana....</i>	<i>78</i>
<i>Figura 38 - Superfície de resposta do Parâmetro <math>\tau</math> em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto.....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 39 - Curvas de Contorno para <math>\tau</math> em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto .....</i>	<i>80</i>
<i>Figura 40 - Valores Preditos versus Observados Dos Parâmetros <math>T_D</math> e <math>Z</math> para a goma-Xantana.....</i>	<i>85</i>
<i>Figura 41 - Superfície de resposta do Parâmetro <math>T_D</math> em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto.....</i>	<i>86</i>
<i>Figura 42 - Curvas de Contorno <math>T_D</math> em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto .....</i>	<i>86</i>

Figura 43 - Superfície de resposta do Parâmetro Z em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto.....	87
Figura 44 – Curvas de Contorno Z em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto .....	87
Figura 45 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X= 2,59$ e $\Delta Vp= +18,75\%$ ) do PFCC para goma-Xantana, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis.....	89
Figura 46 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X= 2,59$ e $\Delta Vp= -11,375\%$ ) do PFCC para goma-Xantana, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis.....	89
Figura 47 – Valores Preditos versus Observados para o parâmetro $K_p$ para k-Carragena .....	92
Figura 48 – Superfície de Resposta de $K_p$ em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto .....	94
Figura 49 – Curvas de Contorno $K_p$ em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto .....	94
Figura 50 – Valores Preditos versus Observados do parâmetro $\tau$ para k-Carragena.....	96
Figura 51 - Superfície de resposta do Parâmetro $\tau$ em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto .....	98
Figura 52 – Curvas de Contorno para $\tau$ em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto .....	98
Figura 53 – Valores Preditos versus Observados Dos Parâmetros $T_D$ e Z para k-Carragena .....	101
Figura 54 – Superfícies de resposta do parâmetro $T_D$ em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto.....	102
Figura 55 – Curvas de contorno do parâmetro $T_D$ em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto .....	102
Figura 56 – Superfícies de resposta dos Parâmetros Z em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto .....	103
Figura 57 – Curvas de Contorno Z em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto .....	103
Figura 58 - Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X= 2,59$ e $\Delta Vp=18,75\%$ ) do PFCC para k-Carragena, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis .....	105
Figura 59 - Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X= 2,59$ e $\Delta Vp=-11,375\%$ ) do PFCC para k-Carragena, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis.....	105
Figura 60 – Valores Preditos versus Observados para Pectina.....	107
Figura 61 – Superfície de Resposta de $K_p$ em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto .....	109
Figura 62 – Curvas de Contorno de $K_p$ em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto .....	109
Figura 63 – Valores Preditos versus Observados do parâmetro $\tau$ para Pectina.....	111
Figura 64 - Superfície de resposta do Parâmetro $\tau$ em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto.....	112

<i>Figura 65 – Curvas de Contorno para <math>\tau</math> em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto .....</i>	<i>112</i>
<i>Figura 66 – Valores Preditos versus Observados Dos Parâmetros <math>T_D</math> e Z para Pectina..</i>	<i>115</i>
<i>Figura 67 – Superfícies de resposta dos Parâmetros <math>T_D</math> em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto .....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 68 – Curvas de Contorno para <math>T_D</math> em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto .....</i>	<i>116</i>
<i>Figura 69 – Superfície de resposta do Parâmetro Z em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto.....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 70 – Curvas de Contorno para Z em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto .....</i>	<i>117</i>
<i>Figura 71 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 (<math>X= 2,59</math> e <math>\Delta Vp=+18,75\%</math>) do PFCC para Pectina, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 72 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 (<math>X= 2,59</math> e <math>\Delta Vp=-11,375\%</math>) do PFCC para Pectina, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis.....</i>	<i>119</i>
<i>Figura 73 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 1% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento .....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 74 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 1% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto.....</i>	<i>127</i>
<i>Figura 75 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 1% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento .....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 76 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 1% após perturbações na Vazão e temperatura do Produto .....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 77 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 1% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 78 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 1% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto.....</i>	<i>128</i>
<i>Figura 79 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 2% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento .....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 80 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 2% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 81 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 2% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento .....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 82 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 2% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto.....</i>	<i>129</i>
<i>Figura 83– Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 2% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 84 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 2% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto.....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 85– Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 3% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento .....</i>	<i>130</i>
<i>Figura 86 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 3% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto.....</i>	<i>130</i>

<i>Figura 87– Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 3% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento .....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 88– Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 3% após perturbação na Vazão e temperatura do produto .....</i>	<i>131</i>
<i>Figura 89 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 3% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento .....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 90 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 3% após perturbação na Vazão e temperatura do produto .....</i>	<i>132</i>
<i>Figura 91 – Esquema de uma Subdivisão de canal do Trocador de Calor a Placas .....</i>	<i>133</i>
<i>Figura 92 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 01 - Tabela 36.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 93 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 02 - Tabela 36.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 94 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 03 - Tabela 36.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 95 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 04 - Tabela 36.....</i>	<i>138</i>
<i>Figura 96 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 05 - Tabela 36.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 97 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 06 - Tabela 36.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 98 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 07 - Tabela 36.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 99 – Ajuste da <math>\Delta T</math> de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 08 - Tabela 36.....</i>	<i>139</i>
<i>Figura 100 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 01 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 101 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 02 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 102 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 03 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 103 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 04 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>140</i>
<i>Figura 104 - Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 05 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 105 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 06 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 106 - Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 07 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 107 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 08 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>141</i>
<i>Figura 108 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 09 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia (<math>K_p, T_D</math> e <math>Z</math>).....</i>	<i>142</i>
<i>Figura 109 – Curvas de Reação para Perturbação na Vazão da goma-Xantana, por Canal e para a Subdivisão do Canal (<math>k_6</math>), para Comparação entre Diferentes Concentrações..</i>	<i>142</i>

*Figura 110 – Curvas de Reação para Perturbação na Vazão da  $\kappa$ -Carragena, por Canal e para a Subdivisão do Canal ( $k_6$ ), para Comparação entre Diferentes Concentrações..... 143*

*Figura 111 – Curvas de Reação para Perturbação na Vazão da Pectina, por Canal e para a Subdivisão do Canal ( $k_6$ ), para Comparação entre Diferentes Concentrações..... 143*

## ÍNDICE DE TABELAS

<i>Tabela 1 - Parâmetros para o cálculo de <math>Re_g</math> e <math>Pr_g</math> em TCP para diferentes tipos de placas</i>	7
<i>Tabela 2 - Propostas dos parâmetros de sintonia de Cohen e Coon</i>	21
<i>Tabela 3- Proposta dos parâmetros de sintonia de Ziegler - Nichols</i>	22
<i>Tabela 4 - Concentrações dos Hidrocolóides</i>	27
<i>Tabela 5- Principais dimensões características da placa modelo P5-VRB</i>	30
<i>Tabela 6 - Condições de entrada do TCP</i>	31
<i>Tabela 7 - Configurações dos TCP</i>	33
<i>Tabela 8 - Perturbações Simétricas Positivas e Negativas</i>	35
<i>Tabela 9- Níveis das variáveis independentes para o PFCC</i>	37
<i>Tabela 10- Planejamento Fatorial Composto Central</i>	38
<i>Tabela 11 - Coeficientes Ajustados dos Modelos propostos para os Parâmetros Reológicos dos diferentes produtos</i>	39
<i>Tabela 12- Comparação entre dados experimentais e preditos</i>	40
<i>Tabela 13 - Temperaturas estabilizadas dos produtos na saída do TCP no Primeiro Regime Permanente</i>	45
<i>Tabela 14 - Parâmetro <math>K_p</math> ajustado para cada canal (j) e subdivisão do canal (k) para goma-Xantana 2%</i>	47
<i>Tabela 15 - Parâmetro <math>\tau</math>, ajustado para cada canal (j) e subdivisão do canal (k) para goma-Xantana 2%</i>	47
<i>Tabela 16 - Parâmetro <math>K_p</math> ajustado para cada canal (j) e subdivisão do canal (k) para k-Carragena 2%</i>	48
<i>Tabela 17 - Parâmetro <math>\tau</math>, ajustado para cada canal (j) e subdivisão do canal (k) para k-Carragena 2%</i>	49
<i>Tabela 18 - Parâmetro <math>K_p</math> ajustado para cada canal (j) e subdivisão do canal (k) para Pectina 2%</i>	50
<i>Tabela 19 - Parâmetro <math>\tau</math>, ajustado para cada canal (j) e subdivisão do canal (k) para k-Carragena 2%</i>	51
<i>Tabela 20 - Parâmetros <math>K_p</math> e <math>\tau</math> das Curvas de Reação da Temperatura de saída, para os três produtos, para o canal 7 e subdivisão do canal k1, após Perturbação na Vazão do Produto</i>	52
<i>Tabela 21 - Fatores de Sensibilidade, em módulo, para perturbações na vazão do produto (<math>\Delta V_p</math>) à diferentes concentrações</i>	53
<i>Tabela 22 - Amplitudes das perturbações da vazão do produto</i>	62
<i>Tabela 23 - Resultados do PFCC para goma Xantana</i>	71
<i>Tabela 24 - Estimativa dos Efeitos sobre <math>K_p</math>, considerando-se todos os termos</i>	72
<i>Tabela 25 - Estimativa dos Efeitos sobre <math>K_p</math> desconsiderando o termo (<math>\Delta V_p.X</math>)</i>	73
<i>Tabela 26 - Tabela Anova do parâmetro <math>K_p</math> para goma-Xantana</i>	75
<i>Tabela 27 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro <math>\tau</math>, considerando todos os termos</i>	77
<i>Tabela 28 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro <math>\tau</math>, desconsiderando-se os termos não significativos</i>	78
<i>Tabela 29 - Tabela Anova para o parâmetro <math>\tau</math> para goma-Xantana</i>	79

Tabela 30 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $T_D$ .....	81
Tabela 31 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $T_D$ , desconsiderando-se os termos não significativos.....	82
Tabela 32 - Tabela Anova para o parâmetro $T_D$ para a goma-Xantana.....	82
Tabela 33 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $Z$ para a goma-Xantana.....	83
Tabela 34 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $Z$ desconsiderando-se os termos não significativos.....	83
Tabela 35 - Tabela Anova do parâmetro $Z$ para a goma-Xantana.....	84
Tabela 36 - Resultados do PFCC para $k$ -Carragena.....	91
Tabela 37- Estimativa dos Efeitos do parâmetro $K_p$ para $k$ -Carragena, desconsiderando os termos estatisticamente não significativos.....	92
Tabela 38 - Tabela Anova para o Parâmetro $K_p$ para $k$ -Carragena.....	93
Tabela 39 - Estimativa dos Efeitos do Parâmetro $\tau$ .....	95
Tabela 40 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $\tau$ desconsiderando-se os termos não significativos.....	96
Tabela 41 - Tabela Anova do parâmetro $\tau$ para $k$ -Carragena.....	97
Tabela 42 - Estimativa dos Efeitos Para o Parâmetro $T_D$ para $k$ -Carragena.....	99
Tabela 43 - Tabela Anova do parâmetro $T_D$ para $k$ -Carragena.....	99
Tabela 44 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $Z$ .....	100
Tabela 45 - Tabela Anova do parâmetro $Z$ para $k$ -Carragena.....	100
Tabela 46 - Resultados do PFCC para Pectina.....	106
Tabela 47 - Estimativa dos Efeitos, desconsiderando $(\Delta V_p \cdot X)$ para Pectina.....	107
Tabela 48 - Tabela Anova do Parâmetro $K_p$ para Pectina.....	108
Tabela 49 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $\tau$ .....	110
Tabela 50 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $\tau$ desconsiderando-se os termos não significativos.....	110
Tabela 51 - Tabela Anova do parâmetro $\tau$ para Pectina.....	111
Tabela 52 - Estimativa dos Efeitos Para o Parâmetro $T_D$ .....	113
Tabela 53 - Tabela Anova de $T_D$ .....	113
Tabela 54 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro $Z$ para Pectina.....	114
Tabela 55 - Tabela Anova do parâmetro $Z$ para Pectina.....	114
Tabela 56 - Perturbações Simétricas Positivas e Negativas.....	127

## *NOMENCLATURA*

$C$  = calor específico do fluido  $J/(kg^{\circ}C)$

$D_e$  = diâmetro equivalente (m)

$DT$  = temperatura diferencial ( $^{\circ}C$ ) ( $T - T(1)$ )

$Dt$  = tempo diferencial (min) ( $t - t(1)$ )

$E_a$  = Energia de ativação (kcal/mol)

$e_p$  = espessura da placa (m)

$I$  = magnitude da perturbação

$J$  = n° de canais do comprimento

$K$  = índice de consistência do fluido

$k$  = n° de divisões da placa

$K_p$  = ganho do sistema

$K_p^*$  = parâmetro de sintonia para controladores

$n$  = índice de fluxo/comportamento do fluido

$Nu$  = n° de Nusselt

$Pr$  = n° de Prandtl

$Re$  = n° de Reynolds

$t$  = tempo (min)

$t^*$  = tempo adimensional

$T^*$  = temperatura adimensional

$T$  = temperatura ( $^{\circ}C$ )

TCP = trocador de calor a placas

$T_D$  = tempo morto

$T_k$  = temperatura (K)

$v$  = velocidade (m/s)

$V_f$  = Vazão mássica do fluido (kg/h)

$V_p$  = Vazão mássica do produto (kg/h)

$X$  = concentração (% p/p)

$Z$  = constante de tempo efetiva

### *Letras gregas*

$\alpha$  = difusividade térmica ( $m^2/s$ )

$\lambda$  = condutividade térmica (W/m °C)

$\sigma_0$  = tensão inicial de cisalhamento (Pa)

$\phi(n)$  = função de escoamento

$\eta$  = viscosidade aparente (Pa.s)

$\sigma$  = tensão de cisalhamento (Pa)

$\gamma$  = taxa de deformação ( $s^{-1}$ )

$\Delta$  = perturbação

$\tau$  = período natural de oscilação do sistema

$\xi$  = parâmetro de escoamento

$\zeta$  = fator de amortecimento

$\rho$  = densidade do fluido ( $kg/m^3$ )

### *Subscritos*

f = fluido de aquecimento

g = generalizado

k = Kelvin

p = produto

rp = regime permanente

## ***RESUMO***

O trabalho consistiu na identificação da ordem e linearidade de curvas de reação, da temperatura de saída do produto, obtidas sob perturbações individuais das vazões mássicas e das temperaturas do produto e do fluido térmico no processo de aquecimento em Trocador de Calor a Placas (TCP), e na avaliação do perfil de temperatura interno do produto em regime transiente e permanente, através da adequação de simulador dinâmico para diferentes concentrações de três fluidos alimentícios não Newtonianos (Pectina, goma-Xantana, k-Carragena).

Este estudo direcionou análises de caracterização do comportamento transiente para futuras análises de sintonia de diferentes modos de controles.

## *ABSTRACT*

The work consisted in the identification of the order and linearity of the outlet temperature reaction curves after disturbances in the flow rate and inlet temperatures of product and thermal fluid in the heating process in Plate Heat Exchanger (PHE), and the evaluation of the product internal temperature profile by adaptation of dynamic simulator, for different concentrations of three non-Newtonian food fluids (Pectin, gum-Xanthan, k-Carragena).

This study aimed the characterization of the transient behavior to future analyses of tuning of different sort of controllers.

## *1. INTRODUÇÃO*

Existem alguns problemas na realização de trabalhos experimentais de trocadores de calor a placas, um deles, por exemplo, é que só podem ser feitas medidas das temperaturas globais na entrada e saída. Portanto os perfis de temperatura dentro do trocador raramente são conhecidos (Rene et al., 1991).

É interessante notar que consideráveis estudos foram feitos sobre performance transiente de trocadores de calor casco e tubo, enquanto que para trocadores de calor a placas são muito pouco encontradas análises similares. Alguns poucos estudos transientes foram desenvolvidos; Das & Murugesan (2000), desenvolveram uma simulação transiente para trocador de calor a placas com um passo para ambos os fluidos em contra-corrente e em concorrente e Masubuchi & Ito (1977), apresentaram um estudo experimental e analítico para TCP usando perturbação senoidal e pulso.

Em processos de alimentos, a principal preocupação é com a segurança do alimento. Após os sistemas de controle terem sido desenvolvidos para garantir a segurança nos processos de produtos alimentícios, houve uma redução do custo de processo e aumento da qualidade do produto, focalizando o melhoramento dos diferentes sistemas de controle (Negiz et al., 1996).

Devido à ordem e não linearidade das curvas de reação de fluidos alimentícios, a utilização da metodologia de planejamento experimental torna-se interessante na avaliação da influência de variáveis controladas nos parâmetros para sintonia de controladores, visto que usualmente apenas uma perturbação individual é realizada para sintonizar um controlador convencional.

## **2. OBJETIVO**

Avaliar a relação do comportamento não Newtoniano de soluções de pectina, k-Carragena e goma-Xantana, a diferentes concentrações para futuros estudos de sintonia de controladores de Trocadores de Calor a Placas (TCP).

Analisar as funções de transferência da temperatura de saída do produto em TCP sob perturbações individuais para os diferentes fluidos alimentícios, caracterizando o processo quanto à sua ordem e linearidade.

Avaliar o perfil de temperatura dos fluidos em Regime permanente e transiente internamente ao TCP.

### 3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Trocadores de Calor

Freqüentemente, é de interesse transferir energia térmica de um sistema para a vizinhança ou entre partes de um sistema. Isto é realizado através de trocadores de calor. O conhecimento dos tipos de trocadores de calor e do processo específico torna-se indispensável para o balanço econômico, precisando-se, então, conhecer as mudanças envolvidas e os equipamentos auxiliares, como bombas e válvulas.

Nas últimas duas décadas, a mais importante e perceptível mudança na indústria de trocadores de calor foi o advento dos trocadores de calor de placas (TCP) e espiral. O trocador de calor de placas foi originalmente projetado para aplicações sanitárias na indústria de laticínios e cervejarias para superar os problemas de limpeza e manutenção, que são um dos maiores problemas dessas indústrias (Das & Murugesan, 2000). As principais vantagens dessas unidades são:

- flexibilidade de arranjos de fluxo;
- transferência de calor, mesmo com pequeno diferencial de temperatura entre dois fluidos;
- taxa de transferência de calor extremamente alta;
- facilidade de abertura para limpeza;
- flexibilidade de ampliação pelo simples acréscimo de placas ao sistema.

Eles são usados em processos convencionais de aquecimento e resfriamento e também como condensadores e evaporadores. Os elementos básicos de um trocador de calor a placas são pratos muito próximos com superfícies alternadas para criar turbulência até um

número de Reynolds menor que 200. São típicas as aplicações em situações de fluxo turbulento na troca de calor líquido – líquido (Kim et al., 1999).

Estes trocadores, inicialmente, não eram utilizados em certos processos e aplicações, devido a problemas de vazamento nas vedações, mas o surgimento de novo material e melhor projeto de vedação tem superado muitos desses problemas, promovendo as substituições dos trocadores de calor de casco e tubo.

Os fatores que atraem este tipo de trocador são seu tamanho compacto, habilidade de gerar turbulência a taxas de fluxos comparativamente baixas, pequeno volume e, portanto, rápida resposta para operações de controle, menor quantidade de fluxo induzido por vibração, menores níveis de incrustação na operação (Das & Murugesan, 2000).

Este tipo de trocador normalmente é construído com placas planas lisas ou com alguma forma de ondulações, providas de gaxetas e de cantoneiras abertas, com passagens para dois fluidos, onde ocorre a transferência de calor. Os fluidos ficam permanentemente separados por duas gaxetas, ambas abertas para a atmosfera. As placas são mantidas apertadas numa estrutura que contém as conexões para os fluidos. Geralmente, este trocador não suporta pressões muito altas, quando comparado ao trocador tubular equivalente. Porém, novas configurações de TCP possibilitam aplicações a mais alta pressão, como é o caso dos T.C. brazados ou com placas soldadas a laser para processos de alta pressão.

As placas são vedadas nas bordas por gaxetas de borracha e possuem aberturas nos cantos, dispostas de tal forma que os dois fluidos circulam através de espaços alternados entre as placas, conforme Figura 1. O número de placas dependerá da capacidade do processo relativa à da taxa de escoamento, das propriedades físicas dos fluidos e das temperaturas de operação.

Apesar de, atualmente, os trocadores a calor de placas serem extensivamente utilizados na indústria de alimentos, há pouca informação básica publicada a respeito das características do fluxo e de transferência de calor.

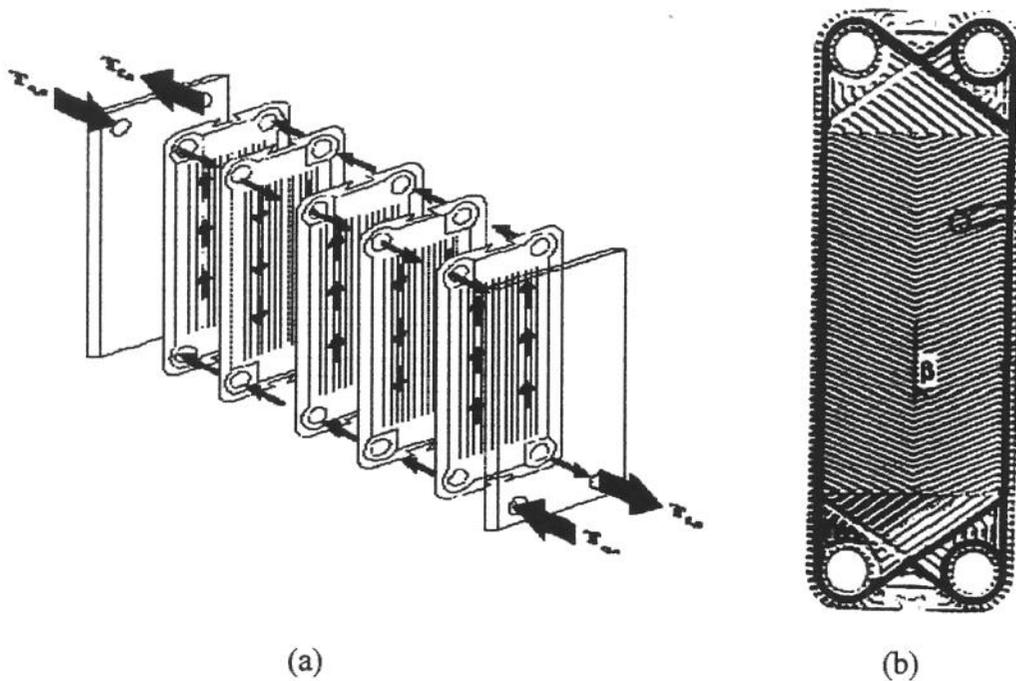


Figura 1 – (a) Trocador de calor a placas, (b) placa com corrugações inclinadas

Rene et al. (1991), estudaram a transferência de calor para fluidos alimentícios Newtonianos e não-Newtonianos em trocador de calor a placa.

Do ponto de vista químico, os fluidos de trabalho da Indústria alimentícia são muito complexos, podendo conter proteínas, açúcares, gorduras, minerais, etc. O estudo do perfil interno aos TCP é importante porque permite avaliar a influência da temperatura pontualmente na alteração da composição e da qualidade de fluidos alimentícios. Delplace et al. (1997), por exemplo, estudaram a desnaturação pelo calor da  $\beta$ -lactoglobulina através de medidas físicas das temperaturas nos canais do TCP e, também, através de simulação numérica, obtendo concordância entre os dados experimentais e simulados. O autor também verificou a influência da desnaturação pelo calor da  $\beta$ -lactoglobulina no fator incrustação e conseqüentemente na eficiência da transferência de calor do TCP.

### 3.1.1 Modelos Matemáticos

Sharifi et al. (1995) e Rene et al. (1991) desenvolveram o modelo matemático utilizado para descrição do processo em regime transiente.

A modelagem foi desenvolvida para um volume de controle de espessura  $\Delta x$ , que é obtido subdividindo os (j) canais em (k) partes iguais.

A partir das equações de balanço de energia (Equações 1 e 2) e utilizando o método das diferenças finitas, são calculadas as temperaturas dos fluidos e das placas em cada volume de controle. O *Anexo II* apresenta a modelagem utilizada no desenvolvimento do simulador original (Berto, 2000).

Balanço de energia para os produtos:

$$MC \frac{\partial T}{\partial t} = MCv \frac{\partial T}{\partial x} - h_{j,k}^i A_{j,k}^i (T_{j,k}^i - T_{p_{j,k}}^i) - h_{j,k}^i A_{j+1,k}^i (T_{j+1,k}^i - T_{p_{j+1,k}}^i) \quad (1)$$

Balanço de energia para as placas:

$$M_p C_p \frac{\partial T_p}{\partial t} = -h_{j-1,k}^i A_{j-1,k}^i (T_{j,k}^i - T_{p_{j,k}}^i) - h_{j,k}^i A_{j,k}^i (T_{j,k}^i - T_{p_{j,k}}^i) \quad (2)$$

As seguintes equações desenvolvidas por Leuliet et al. (1987), foram utilizadas para o cálculo dos números adimensionais generalizados:

$$\text{Reynolds:} \quad \text{Re}_g = \frac{\rho v^{(2-n)} D_e^n}{K [\phi(n)]^n \xi^{(n-1)}} \quad (3)$$

$$\text{Prandtl:} \quad \text{Pr}_g = K \left( \frac{\xi v}{D_e} \right)^{(n-1)} [\phi(n)]^n \frac{C}{\lambda} \quad (4)$$

Os parâmetros  $\phi(n)$  e  $\xi$ , são funções de escoamento que variam conforme o tipo de placas, definidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Parâmetros para o cálculo de  $Re_g$  e  $Pr_g$  em TCP para diferentes tipos de placas

Modelo	V7	V13 <sup>1</sup>
$\xi$	56,6	43,7
$\phi(n)$	$\left(\frac{2n+1}{3n}\right)\left(\frac{1}{n^{0,1}}\right)^{1/n}$	$\left(\frac{2n+1}{3n}\right)\left(\frac{1}{n^{0,3}}\right)^{1/n}$

sendo:

$\lambda$  = condutividade térmica [Btu/(h ft °C)];

$D_e$  = 2.D diâmetro equivalente (ft).

As equações (5) e (6) se aplicam para placas tipo V13, enquanto as equações (7) e (8) se aplicam para placas tipo V7 :

$$Re_g \leq 5,5 \quad Nu = 0,590 Re_g^{1/3} Pr_g^{1/3} \quad (5)$$

$$Re_g > 5,5 \quad Nu = 0,352 Re_g^{0,639} Pr_g^{1/3} \quad (6)$$

$$Re_g \leq 70 \quad Nu = 0,634 Re_g^{1/3} Pr_g^{1/3} \quad (7)$$

$$Re_g > 70 \quad Nu = 0,312 (Re_g^{2/3} - 8,45) Pr_g^{1/3} \quad (8)$$

Placas tipo V13 apresentam corrugações inclinadas do tipo ‘espinha de peixe’ e placas tipo V7 apresentam corrugações retas.

<sup>1</sup> Placas com corrugações tipo ‘espinha de peixe, formando um ângulo de 60°.

As equações (9) a (12), apresentam correlações para o cálculo das propriedades termo-físicas da água, para a faixa de temperatura de 0 à 150 °C (Choi & Okos, 1986).

$$\lambda(W / m^{\circ}C) = 5,7109.10^{-1} + 1,7625.10^{-3}T - 6,7036.10^{-6}T^2 \quad (9)$$

$$\alpha(m^2 / s) = 1,3168.10^{-1} + 6,2477.10^{-4}T - 2,4022.10^{-6}T^2 \quad (10)$$

$$\rho(kg / m^3) = 9,9718.10^2 + 3,1439.10^{-3}T - 3,7574.10^{-3}T^2 \quad (11)$$

$$C(kJ / kg^{\circ}C) = 4,0817 - 5,3062.10^{-3}T + 9,9516.10^{-4}T^2 \quad (12)$$

No trabalho de Berto (2000) estes modelos matemáticos foram utilizados como base para o desenvolvimento de um simulador dinâmico para fluidos Newtonianos e não Newtonianos em TCP.

### 3.2 Hidrocolóides

Hidrocolóides são comumente usados como agentes espessantes para alcançar a qualidade adequada do produto, principalmente características de textura. São usados numa variedade de fluidos alimentícios como os de frutas (molhos, geléias, sucos concentrados, etc.) ou em produtos lácteos (pudins, iogurtes, etc.). Também podem ser incorporados em produtos cárneos. Além disso, hidrocolóides em solução podem ser manipulados em vários processos de operações unitárias, sendo mais usado no transporte de partículas sólidas em equipamentos assépticos, como fluido incorporador de alimentos particulados.

Soluções de hidrocolóides são usualmente conhecidas por serem fluidos pseudoplásticos não Newtonianos e apresentarem a viscosidade aparente decrescente com o aumento da taxa de deformação (Rha, 1978).

Alguns produtos que geram soluções não-Newtonianas são caracterizados a seguir:

a) Goma Xantana – é um biopolímero exocelular secretado pela *Xanthomonas* sp. Consiste de ligações 1,4  $\beta$ -D-glicose, conforme estrutura química mostrada na Figura 2. Xantana é empregada como espessante em muitas indústrias para estabilizar suspensões e emulsões nas indústrias de papel e têxtil. Também é freqüentemente utilizada na indústria de alimentos devido à solubilidade em água quente ou fria, alta viscosidade a baixas concentrações, pequenas variações da viscosidade com a variação da temperatura, e estabilidade em sistemas ácidos. Também apresenta excelentes propriedades de suspensão devido ao alto rendimento e também boa estabilidade para descongelamento. Dentre os hidrocolóides estudados a xantana é o mais pseudoplástico e o menos dependente da temperatura.

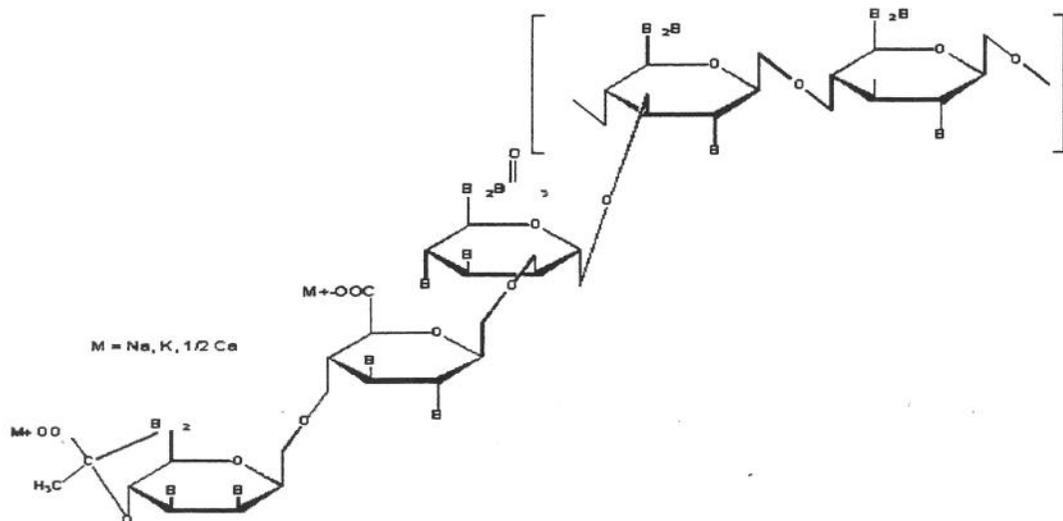


Figura 2 – Estrutura Química – Goma Xantana

b) Pectina - é um polissacarídeo complexo encontrado em muitas frutas e vegetais e também apresenta diversas aplicações na indústria alimentícia. Pectina consiste de ligações 1,4  $\alpha$ -D ácido galacturônico com uma parte do grupo carboxila esterificado por um grupo metil, conforme estrutura química mostrada na Figura 3.

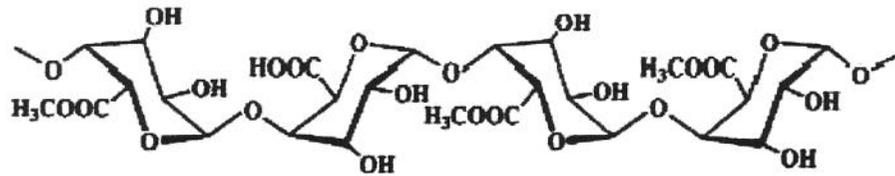


Figura 3 - Estrutura química – Pectina

c) Carragena – é utilizada predominantemente em aplicações para alimentos, sendo que o setor de laticínios representa grande parte delas. São galactantes sulfatados extraídos da espécie de alga marinha vermelha *Rhodophyceae sp.* São compostos de ligações alternadas de 3- $\beta$ -D-galactopyranose (unidade - G) e 4- $\alpha$ -D-galactopyranose (unidade - D) ou 4-3,6-anhydrogalactose (unidade - A), formando um dissacarídeo com repetidas unidades de carragena, conforme estrutura química mostrada na Figura 4.

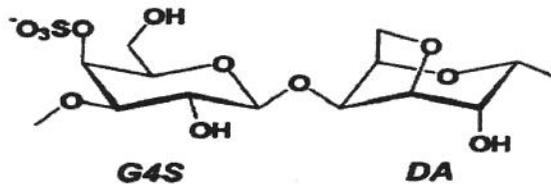


Figura 4 - Estrutura química - k-carragena

### 3.3 Reologia dos Fluidos

Os maiores parte dos produtos alimentícios são não Newtonianos e muito pouco é conhecido sobre o comportamento de fluxo e transferência de calor. Mesmo assim, muitos produtos têm as propriedades físicas similares às da água, leite, suco de laranja e vinho (Kim et al., 1999). Levando em consideração o escoamento, como muitos alimentos exibem alguma forma de comportamento não Newtoniano, é necessário conhecer a natureza reológica destes produtos (Ghan et al., 1999).

O comportamento reológico de hidrocolóides tem especial importância quando são usados para modificar as características de textura de alimentos. É bem conhecido que as propriedades reológicas tem importância em projetos de processos e modelagem. Dados reológicos são necessários para os cálculos em muitos processos envolvendo fluxo de fluido (bombeamento, extração, filtração, extrusão, purificação) e tem função importante nas análises de condição de fluxo em processos alimentícios como a pasteurização, evaporação, secagem e processos assépticos (Marcotte et al., 2001).

Hidrocolóides como xantana, carragena, pectina, amido e gelatina, são geralmente usados em aplicações na indústria de alimentos devido às suas propriedades funcionais. Muito estudo tem sido desenvolvido para quantificar as características reológicas de alimentos hidrocolóides individualmente e em formulações de alimentos. A viscosidade dos hidrocolóides pode ser afetada significativamente pelas variações na taxa de deformação, temperatura e pressão.

Muitos modelos têm sido usados para descrever o comportamento do fluxo para soluções de hidrocolóides, como o modelo linear (Newtoniano ou Bingham), Lei da Potência (Ostwald-de-Waele) e Herschel-Bulkley. O modelo da Lei da Potência é possivelmente o modelo mais amplamente utilizado para descrever as propriedades dos fluxos de líquidos e análise teórica e prática de aplicações na engenharia (Barnes et al., 1989).

Estes modelos são:

#### 1) Modelo Newtoniano

Quando a viscosidade da solução não muda com a variação da taxa de deformação, ela pode ser avaliada usando um modelo Newtoniano:

$$\eta = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} \quad (13)$$

onde:

$\eta$  é a viscosidade;  $\sigma$  é a tensão de cisalhamento e  $\dot{\gamma}$  é a taxa de deformação.

## 2) Modelo Lei da Potência

Gráficos da tensão de cisalhamento versus taxa de deformação são utilizados para calcular o índice de consistência ( $K$ ) e o índice de comportamento de fluxo ( $n$ ):

$$\sigma = K \dot{\gamma}^n \quad (14)$$

## 3) Modelo Hershel-Bulkley

O índice de consistência ( $K$ ) e o índice de comportamento de fluxo ( $n$ ), são avaliados utilizando a equação:

$$\sigma - \sigma_o = K \dot{\gamma}^n \quad (15)$$

### **3.4 Caracterização do comportamento não linear em processos dinâmicos**

Os sistemas lineares são totalmente caracterizados pelas funções de transferência e facilmente pode-se obter resultados através do uso delas (Ogunnaike & Ray, 1994).

Na realidade, variando o grau de rigor, todos os processos físicos exibem algum tipo de comportamento não linear. Quando um processo apresenta um comportamento fortemente não linear, o uso de um modelo linear pode ser inadequado.

Há duas propriedades básicas que caracterizam o comportamento de um sistema não linear:

#### 1. Princípio da Sobreposição

Se a resposta de um processo para perturbações degrau  $I_1$ , é  $R_1$ , e a resposta para  $I_2$  é  $R_2$ , então, de acordo com o princípio da sobreposição, a resposta para  $(I_1+I_2)$  é  $(R_1+R_2)$ , se o sistema for linear.

Em geral, este princípio determina que a resposta para um sistema linear, para a soma de  $N$  perturbações na entrada, é a mesma que a soma das respostas para as perturbações individuais.

Como um resultado deste princípio, por exemplo, a resposta de um sistema linear para a mesma perturbação degrau de amplitude  $I$  é exatamente a mesma que para  $I$  vezes o degrau unitário do sistema. O mesmo é válido para outros tipos de perturbações.

## 2. Independência da Resposta Dinâmica Característica e Condições do Processo

A característica dinâmica da resposta do processo a uma perturbação na entrada é independente das condições específicas de operação para o tempo de implementação da perturbação na entrada se o sistema for linear. Em outras palavras, perturbações idênticas realizadas em condições de regime permanente diferente irão gerar respostas de magnitude e características dinâmicas idênticas.

O princípio da sobreposição também permite que, às mesmas condições de regime permanente, a mudança observada na resposta para uma certa perturbação positiva terá uma perfeita imagem especular da resposta para uma perturbação negativa de mesma amplitude.

Um sistema não linear não apresenta nenhuma destas propriedades, ou seja:

- a resposta da soma das perturbações na entrada não é igual a soma das respostas individuais;
- a resposta para uma perturbação degrau de magnitude  $I$  não é igual a  $I$  vezes a resposta unitária do degrau;
- a magnitude e características dinâmicas da resposta degrau são dependentes das condições iniciais de operação em regime permanente;
- a resposta degrau negativo não é a imagem especular de um degrau positivo;

- e finalmente, a resposta para um sistema não linear para uma perturbação senoidal não é uma função perfeitamente senoidal.

O modelo de equações que irão representar o comportamento dinâmico deste sistema deve, adequadamente, conter termos não lineares e a comodidade de caracterizar o comportamento do sistema dinâmico pelo uso de funções de transferência linear é perdida (Ogunnaike & Ray, 1994).

### 3.5 Funções de Transferência de Processos Lineares

O comportamento dinâmico de um sistema pode ser representado por sistemas de primeira, segunda ordem ou por sistemas de ordens superiores.

#### 3.5.1 Sistemas de Primeira ordem

São os sistemas em que o comportamento dinâmico, ou seja, a curva de reação do processo sob perturbação degrau é modelada através de equações diferenciais de primeira ordem do tipo:

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = bu(t) \quad (16)$$

onde:

$y(t)$  e  $u(t)$  representam, respectivamente, a saída e entrada do sistema. Esta equação é comumente rearranjada como sendo:

$$\tau \frac{dy}{dt} + y = K_p u(t) \quad (17)$$

onde para  $a_0 \neq 0$ , os novos parâmetros  $\tau$  e  $k$  são dados por:

$$\tau = a_1/a_0; \quad Kp = b/a_0;$$

Se o modelo da Equação 17 for representado no Universo Laplaciano, rearranjando tem-se que:

$$y(s) = \left( \frac{Kp}{\tau s + 1} \right) u(s) \quad (18)$$

Quando uma perturbação degrau de magnitude I é aplicada num sistema de primeira ordem, a resposta dinâmica é obtida através da seguinte equação:

$$y(s) = \left( \frac{Kp}{\tau s + 1} \right) \frac{I}{s} \quad (19)$$

Resolvendo a Equação 19 no domínio do tempo, a resposta é :

$$y(t) = IKp \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (20)$$

O sistema de primeira ordem com tempo morto é representado através da equação 21:

$$G(s) = \frac{\bar{y}(s)}{\bar{c}(s)} = \frac{Kpe^{-T_D s}}{Zs + 1}; \quad (21)$$

### 3.5.2 Sistemas de Segunda ordem

Um sistema é de segunda ordem quando a variável de saída pode ser descrita pela solução de uma equação diferencial de segunda ordem do tipo (Stephanopoulos, 1984):

$$a_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = bu(t) \quad (22)$$

A Equação 22 representa a função de transferência padrão para um sistema de segunda ordem.

$$G(S) = \frac{\bar{y}(s)}{u(s)} = \frac{Kp}{(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)} \quad (23)$$

A resposta de um sistema dinâmico de segunda ordem para uma perturbação degrau é descrita pela Equação 21.

$$y(s) = \frac{Kp}{(\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1)} \frac{1}{s}; \quad (24)$$

onde:

$\tau$  = período natural de oscilação do sistema;

$\zeta$  = fator amortecimento;

$Kp$  = regime permanente ou estático, ou simplesmente ganho do sistema.

Os dois pólos da função de transferência de segunda ordem são dados pelas raízes polinomiais características,

$$\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1 = 0 \quad (25)$$

que são:

$$p_1 = -\frac{\zeta}{\tau} + \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau}, \quad p_2 = -\frac{\zeta}{\tau} - \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau}; \quad (26)$$

e a forma da resposta  $y(t)$ , dependerá da localização dos dois pólos  $p_1$  e  $p_2$ , no plano complexo. Pode-se distinguir os três casos seguintes, observados pela Figura 5.

$\zeta > 1$ , tem-se: dois pólos reais e distintos;

$\zeta < 1$ , tem-se: dois pólos conjugados complexos;

$\zeta = 1$ , tem-se: dois pólos iguais.

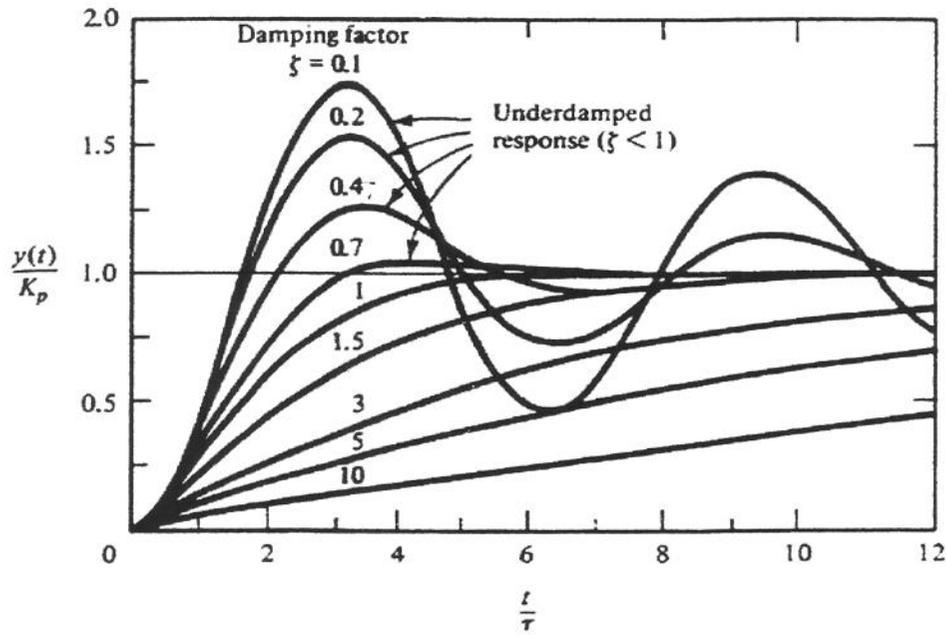


Figura 5 – Resposta Adimensional de um sistema de segunda ordem para uma perturbação degrau unitário

Resolvendo a Equação 23 no domínio do tempo, para  $\zeta=1$ , a resposta é:

$$y(t) = IK_p \left( 1 - \left( 1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (27)$$

### 3.5.3 Sistemas de Ordens Superiores

Estes sistemas são tipicamente caracterizados por funções de transferência em que o denominador polinomial é de ordem superior a dois.

O comportamento geral dos sistemas de ordens superiores é composto pela interação de n-sistemas de primeira ordem em série, ou pela combinação de diversos sistemas de segunda ordem subamortecidos.

A forma geral da função de transferência para esses sistemas é:

$$g(s) = \frac{Kp(\zeta_1 s + 1)(\zeta_2 s + 1) \dots (\zeta_q s + 1)}{(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1) \dots (\tau_p s + 1)} \quad (28)$$

$$g(s) = \frac{Kp \prod_{i=1}^q (\zeta_{is} + 1)}{\prod_{i=1}^p (\tau_{is} + 1)} \quad (29)$$

Para uma perturbação degrau tem-se:

$$y(s) = Kp \left( \frac{I_0}{s} + \sum_{i=1}^p \frac{A_i}{\tau_i s + 1} \right) \quad (30)$$

Resolvendo a equação 29 no domínio do tempo a resposta é:

$$y(t) = Kp \left( 1 + \sum_{i=1}^p \frac{A_i}{\tau_i} e^{-\frac{t}{\tau_i}} \right) \quad (31)$$

### 3.6 Estratégias de Controle e Sintonias

Segundo Stephanopoulos (1984), os tipos de estratégias de configurações de controle são definidos como:

Configuração de controle ‘Feedback’: usa medidas diretas da variável controlada para ajustar o valor da variável manipulada. O objetivo é manter a variável controlada num nível desejado (‘set point’).

Configuração de controle preditiva: usa medidas secundárias (porque a variável controlada não pode ser medida) para ajustar os valores da variável manipulada. O objetivo é manter a variável controlada (não-medida) nos níveis desejados. A variável controlada é calculada matematicamente através de balanços de massa e energia e essas estimativas são utilizadas para ajustar os valores das variáveis manipuladas.

Configuração de controle ‘feedforward’: usa medidas diretas da perturbação para ajustar os valores das variáveis manipuladas. O objetivo é manter os valores das variáveis

controladas de saída no nível desejado. Para aplicar este controle é necessário saber o comportamento da variável controlada sob todas as perturbações possíveis no processo.

Na análise e projeto de sistemas de controle, é necessário ter uma base para comparar o desempenho de sistemas. Esta base pode ser obtida especificando-se as respostas a sinais de teste particulares a serem aplicados como entradas e comparando-se as respostas de sistemas a esses sinais de entrada.

Os sinais de entrada para teste, comumente usados, são as funções degrau, rampa, aceleração, impulso, senoidal etc. Com estes sinais de teste, tanto a análise matemática quanto a experimental de sistemas de controle, podem ser feitas com facilidade, uma vez que estes sinais são funções temporais muito simples. Uma vez projetado o sistema de controle com base nos sinais de teste, normalmente, o desempenho do sistema para entradas reais é satisfatório (Ogata, 1998).

A resposta temporal de um sistema de controle consiste em duas partes: a resposta transitória e a resposta estacionária. Entende-se por resposta transitória aquela que vai do estado inicial até o estado final. Por resposta estacionária entende-se a maneira como o sinal do sistema se comporta quando  $t$  tende a infinito.

Freqüentemente, as características de desempenho de um sistema de controle são especificadas em termos da resposta transitória a uma excitação em degrau unitário, pois este sinal é fácil de ser gerado e corresponde a uma solicitação suficientemente severa.

Na prática, a resposta transitória de um sistema de controle freqüentemente apresenta oscilações amortecidas antes de alcançar o regime permanente.

Um controlador automático compara o valor real da grandeza de saída do processo com a grandeza de referência (valor desejado), determina o desvio e produz um sinal de controle que reduzirá o desvio a zero ou a um valor pequeno. A maneira pela qual o controlador automático produz o sinal de controle é chamada de ação de controle (Ogata, 1998).

Os modos de controles podem ser classificados, de acordo com a ação de controle, como:

1. Controladores liga-desliga;

2. Controladores proporcionais;
3. Controladores do tipo integral;
4. Controladores do tipo proporcional e integral;
5. Controladores do tipo proporcional e derivativo;
6. Controladores do tipo proporcional, integral e derivativo.

Os controladores possuem parâmetros ( $K_c$ ,  $\tau_i$ ,  $\tau_D$ ) que devem ser ajustados conforme o tipo de controle a ser aplicado e quanto ao tipo de comportamento dinâmico (1ª ordem, 2ª ordem ou de ordem superior) do processo. Entre as metodologias para sintonia de controladores contínuos com ajuste dos parâmetros, pode ser utilizado o método da curva de reação do processo citadas por Stephanopoulos (1984) e Coughanowr & Koppel (1978).

Dentre as metodologias empregadas para sintonia de controladores, quando não se dispõe da função de transferência do processo a ser controlado, utiliza-se o método de curva de resposta do processo a ser controlado, citado por Stephanopoulos (1984). A partir desta metodologia, determina-se a resposta dinâmica experimentalmente, ou seja, curva de reação ou curva de resposta transiente, submetendo a planta, sem ação de nenhum tipo de controle a uma excitação conhecida, normalmente uma entrada do tipo degrau e mede-se sua resposta no tempo, conforme mostrado na.Figura 6.

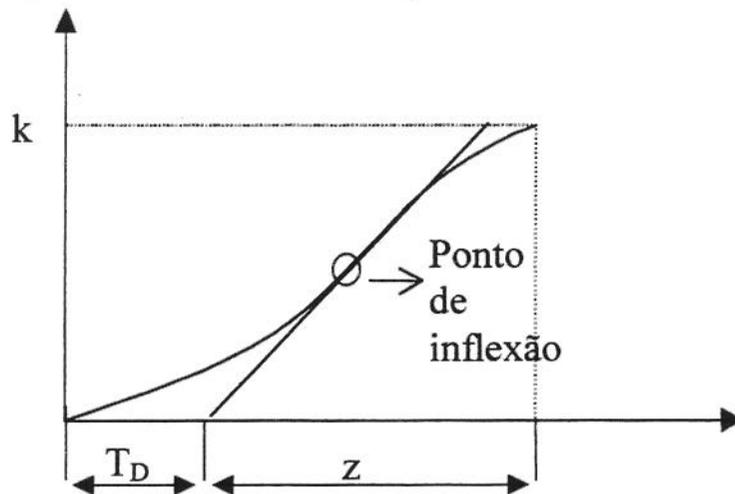


Figura 6 – Exemplo de Curva de Reação do Processo para aplicação em Sintonia de Controladores

Cohen e Coon citados por Stephanopoulos (1984), observaram que as respostas da maioria dos processos para mudanças na entrada têm uma forma de ‘S’, como a da Figura

6, que pode ser adequadamente aproximada para uma resposta de um sistema de primeira ordem com tempo morto (Equação 21), em que os parâmetros: ganho estático  $K_p$ , tempo morto  $T_D$ , e a constante de tempo  $Z$ , para uma resposta aproximada como a da Figura 6 são estimados como sendo:

$K_p = (\text{último valor da saída})/(\text{magnitude da perturbação degrau})$  ;

$$K_p = \frac{k}{I}; \quad (32)$$

$$Z = \frac{k}{S}; \quad (33)$$

onde  $S$  é a tangente do ângulo da reta ao ponto de inflexão da resposta;

$T_D$  = tempo gasto após a perturbação para sensibilizar a resposta do sistema (tempo morto).

Cohem-Coon e Zigler-Nichols citados por Ogunnaike & Ray (1994), propuseram parâmetros de sintonia para controladores mostrado na Tabela 2 e Tabela 3, respectivamente, baseado na resposta do processo a controlar, sob perturbação degrau.

*Tabela 2 – Propostas dos parâmetros de sintonia de Cohen e Coon*

Controlador	$K_p^*$	$\tau_I$	$\tau_D$
P	$\frac{1}{K_p} \frac{Z}{T_D} \left(1 + \frac{T_D}{3Z}\right)$	-	-
PI	$\frac{1}{K_p} \frac{Z}{T_D} \left(0.9 + \frac{T_D}{12Z}\right)$	$T_D \frac{30 + 3T_D/Z}{9 + 20T_D/Z}$	-
PID	$\frac{1}{K_p} \frac{Z}{T_D} \left(\frac{4}{3} + \frac{T_D}{4Z}\right)$	$T_D \frac{32 + 6T_D/Z}{13 + 8T_D/Z}$	$T_D \frac{4}{11 + 2T_D/Z}$

Tabela 3– Proposta dos parâmetros de sintonia de Ziegler – Nichols

Controlador	$K_p^*$	$\tau_I$	$\tau_D$
P	$\frac{1}{K_p} \left( \frac{Z}{T_D} \right)$	-	-
PI	$\frac{0,9}{K_p} \left( \frac{Z}{T_D} \right)$	$3,33T_D$	-
PID	$\frac{1,2}{K_p} \left( \frac{Z}{T_D} \right)$	$2T_D$	$0,5T_D$

### 3.7 Controles de Processos

Nos últimos anos, tem sido crescente o interesse em estratégia e modos de controle de processos avançados para melhorar o processo de produção de alimentos. A atração por essas configurações é primeiramente motivada pelo desejo de manter um alto grau de qualidade dos produtos para taxas de produção tanto maiores quanto possíveis.

Técnicas de controle de processo avançadas, vêm sendo utilizadas com sucesso para aumentar a produtividade e qualidade em outros processos industriais, como petroquímico e da indústria de papel. Isto sugere que a indústria de alimentos pode também obter benefícios semelhantes através da tecnologia de controle avançado.

Muitas das estratégias e modos de controle convencionais de processos dão uma avaliação geral das técnicas disponíveis, tornando comum o problema de selecionar a melhor configuração de controle para uma aplicação particular.

O controlador clássico PID/feedback, tem sido utilizado para uma ampla variedade de processos com relativo sucesso a partir dos anos 50. Controladores PID/feedback, geralmente, atuam com melhor performance em processos caracterizados como linear ou dinâmicas de baixa ordem.

Técnicas de controle avançadas, são projetadas para processos caracterizados como não lineares, ou de ordens superiores que podem variar no tempo.

Há diversos tipos básicos de técnicas de controle avançados, como, por exemplo, controlador adaptativo, controlador baseado em modelos preditivos, controlador por lógica fuzzy e controlador por rede neural artificial.

Os controladores baseados em modelos são formulados matematicamente através de modelos do processo. A aproximação matemática usada neste controle permite, 'a priori', a determinação da estabilidade e das propriedades de robustez do processo de controle.

Todos os métodos de controle baseados em modelos requerem modelos tanto analíticos como empíricos que descrevem o comportamento dinâmico do processo. Modelos analíticos de processos simples podem ser obtidos pelo desenvolvimento de equações diferenciais que descrevam as conservações de massa, energia, e movimento que ocorrem no processo. No entanto, é importante considerar a relativa complexidade das transformações físicas e químicas que ocorrem nos processos de alimentos. Esta complexidade leva a um dispêndio de tempo e dificuldade, se não, a impossibilidade para desenvolver um modelo para o processo. A partir disto, técnicas de identificação do sistema podem ser usadas para desenvolver modelos empíricos que representam adequadamente a dinâmica do processo em torno de um ponto particular de operação (Haley & Mulvaney, 1995).

Em muitos processos na indústria de alimentos, os parâmetros gráficos de sintonia  $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ , mostrados na Figura 6, são função de variáveis do processo, como, vazão ou concentração. Nesses casos, é obtido um modelo que normalize essas constantes que irá, então, eliminar essas variações dos parâmetros. Estas transformações, potencialmente, aumentam a robustez do controlador eliminando a sensibilidade do modelo para pequenas variações do sistema nos parâmetros de processo (Haley & Mulvaney, 1995).

A metodologia convencional de sintonia de controladores utiliza apenas um único ensaio experimental de perturbação individual na variável manipulada. Outra forma de caracterizar processos mais complexos utiliza os conceitos das funções de transferências básicas, sugerida por Berto (2000) e Gratão (2002), que aplicaram a metodologia de ensaios com variáveis múltiplas, ou pela utilização de Planejamento Experimental Fatorial.

Gratão (2002) realizou ensaios experimentais em trocador de calor de tubo duplo, visando à caracterização do comportamento transiente através de curvas de resposta da temperatura de saída dos produtos, obtidas sob perturbações das condições de operação da entrada do trocador, constatando uma não linearidade das curvas de resposta entre as diferentes perturbações impostas ao processo.

Berto (2000) através de modelagem matemática e simulação do resfriamento de suco de laranja natural e concentrado (não Newtoniano) em TCP, avaliou o grau de influência das variáveis perturbáveis sobre a temperatura de saída do produto após o resfriamento e concluiu que a alteração nas características do fluido, nas configurações de escoamento ou das placas e das condições iniciais de operação afeta diretamente a temperatura de saída e a dinâmica do processo de resfriamento.

### ***3.8 Planejamento Fatorial de Ensaios***

A essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer o tipo de informação que se procura.

Tanto o método de otimização por análise de superfície de resposta, quanto a modelagem empírica e multivariável de um processo dentro de faixas avaliadas, tem como base o método de planejamento fatorial, e consiste em um grupo de técnicas usadas para o estudo empírico das relações entre uma ou mais respostas medidas e um número de entradas que possam ser alteradas (Box, 1978).

Tendo selecionado as variáveis importantes, o próximo passo é avaliar quantitativamente sua influência sobre a resposta de interesse, bem como suas possíveis interações. Para fazer isso, com o mínimo de experimentos, o pesquisador pode empregar planejamentos fatoriais completos, PFC (Barros et al., 1995).

O cálculo dos efeitos (variação da resposta ao alterar os fatores envolvidos nos níveis superior (+1) e inferior (-1)), é baseado no erro puro e erro residual. O erro residual engloba tanto a falta de ajuste do modelo quanto o erro experimental.

A opção SS residual do programa STATÍSTICA 5.0 calcula os desvios dos ajustes de um modelo aos pontos experimentais, enquanto os erros calculados pela opção erro puro medem desvios em relação aos pontos experimentais, ou seja, erros inerentes aos ensaios.

Para análise dos efeitos principais são feitos alguns testes estatísticos, tais como:

Teste t: O valor de t mede o quão grande é o efeito de um fator na resposta em relação ao erro padrão.

Teste p: Probabilidade de significância baseado no t calculado. Pequenos valores de p estão associados a grandes valores de t. Na literatura científica geralmente são considerados significativos os parâmetros ou variáveis com  $p < 0,05$ . Isso corresponde a um limite de confiança de 95%.

$R^2$ : O valor de  $R^2$  fornece uma medida de quanto à variabilidade nas respostas observadas podem ser explicadas pelos fatores experimentais ou ensaiados e suas variações.

## **4 MATERIAIS E MÉTODOS**

### **4.1 Materiais**

Para o desenvolvimento deste trabalho foram utilizados os seguintes materiais:

Hardwares:

- Microcomputador AMD-K6(tm) 3D processador, 500MHz;

Softwares:

- Matlab (The Language of Technical Computing), Versão 6.1.0.450, Release 12.1;
- Estatística for Windows, Release 5.0 A;
- Microsoft Office; Windows 98;
- Simulador Dinâmico do TCP (Berto, 2000).

### **4.2 Métodos**

A metodologia de ensaios constou das seguintes etapas:

#### **4.2.1 Ajuste de Modelos das Propriedades Reológicas dos Fluidos Não Newtonianos**

As soluções alimentícias com os espessantes goma-Xantana, k-Carragena e Pectina foram caracterizadas reologicamente por Marcotte et al. (2001), através de um viscosímetro rotacional (Haake Model RV20, Haake Mess-Technik, Karlsruhe, Germany). As soluções de goma-Xantana e k-Carragena seguiram os modelos reológicos de

Herschel-Bulkley enquanto que a solução de Pectina foi caracterizada pelo modelo lei da potência. Os experimentos, realizados por Marcotte et al. (2001), foram com as seguintes amostras de hidrocolóides comerciais: goma – xantana (Rhodigel, lote nº 9635002, Rhône-Poulenc Food Ingredients, Fort Washinton, PA) , carragena (Grinsted Carrageenan, CL210, Danisco Ingredients Inc., Rexdale, ON) e pectina (Grinsted Pectin, RS 400 lote nº 701J547, Danisco Ingredients Inc., Rexdale, ON).

Os hidrocolóides escolhidos como fluido de trabalho estão apresentados na Tabela 4 nas respectivas faixas de concentração.

*Tabela 4 - Concentrações dos Hidrocolóides*

<b>Produto</b>	<b>Concentrações (%)</b>
Goma Xantana	1 a 3
k-Carragena	1 a 3
Pectina	1 a 5

Os valores de  $n$  e  $K$  dos hidrocolóides, obtidos experimentalmente por Marcotte et al. (2001), foram ajustados em função da temperatura e da concentração.

Utilizou-se o programa STATISTICA 5.0 para o ajuste de modelos para as propriedades reológicas dos fluidos (Pectina, goma-Xantana e k-Carragena). O método de estimação dos parâmetros utilizado foi o de Quasi-Newton.

Os modelos propostos para os parâmetros reológicos  $n$  e  $K$  das diferentes soluções com os hidrocolóides estudados, dependentes da concentração ( $X$ ) e da temperatura, estão mostrados nas Equações 34 e 35.

*Modelos Propostos:*

$$K = B_1 \cdot \exp(B_2 / (T_k + B_3)) (B_4 + \exp(B_5 \cdot X) + B_6); \quad (34)$$

$$n = B_1 \cdot \exp(B_2 / (T_k + B_3)) (B_4 + \exp(B_5 \cdot X) + B_6); \quad (35)$$

#### 4.2.2 Adequação do Simulador

A partir do simulador dinâmico original desenvolvido por Berto (2000), que permite opções de configurações do TCP, do tipo de escoamento, do método de resolução das equações diferenciais, tipos de fluidos de trabalho, dentre outras opções, foram realizadas as seguintes adequações:

- Armazenamento de variáveis como: temperatura (T), Número de Reynolds (Re), Coeficiente de transferência de calor (h), em Matriz de três coordenadas, quanto à posição axial, por canal e quanto ao tempo ( $k,j,t$ ), permitindo a obtenção do perfil de temperatura dentro do trocador de calor.
- Inserção de modelos das propriedades termo-físicas e reológicas correspondentes aos fluidos não Newtonianos utilizados neste trabalho, tais como Pectina, goma-Xantana e k-Carragena.

O simulador readequado funciona conforme o fluxograma da Figura 7:

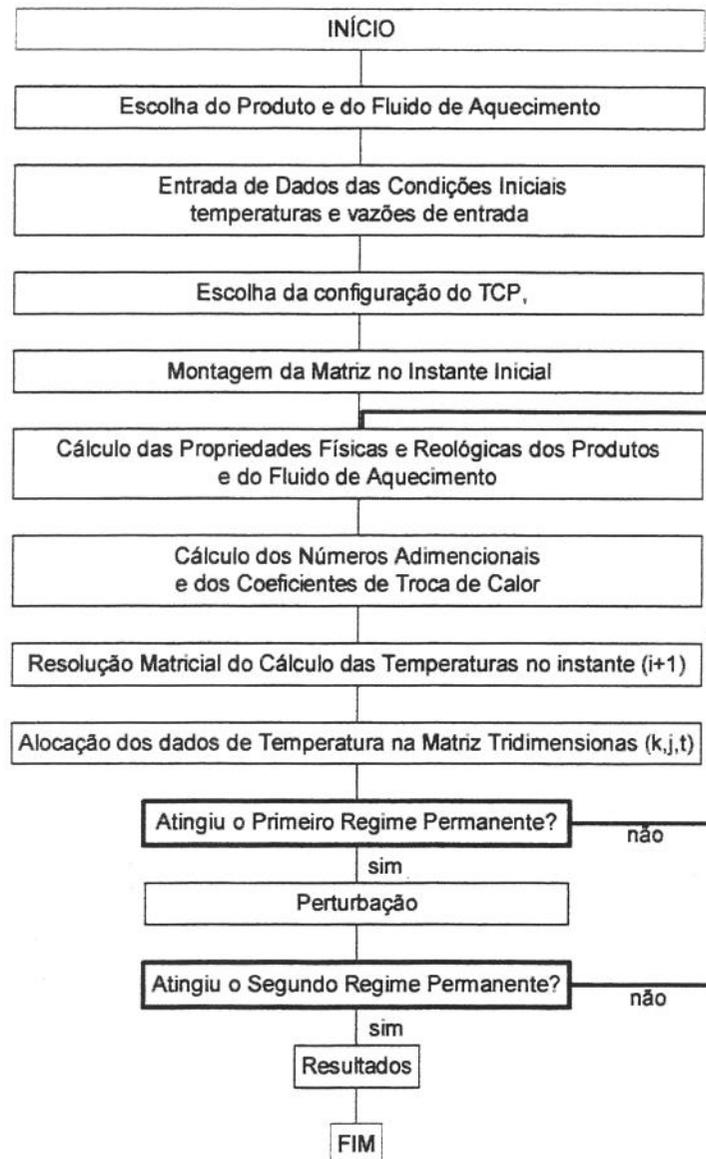


Figura 7 - Diagrama de Blocos do Algoritmo do Simulador Dinâmico readequado

### 4.2.3 Validação do Modelo Matemático

Com o objetivo da validação do modelamento matemático do processo, os dados experimentais obtidos por Kim et al. (1999) na sessão de aquecimento de para pasteurização de suco de laranja natural, utilizando a mesma configuração do trocador de calor com 16 placas (Alfa Laval modelo P5-VRB), conforme dimensões mostradas na Tabela 5, são comparados com os dados obtidos pelo modelo proposto por simulação.

*Tabela 5– Principais dimensões características da placa modelo P5-VRB*

<b>Características da placa modelo P5-VRB</b>		<b>(m)</b>
Comprimento (L)		0,5740
Largura disponível para escoamento (w)		0,1970
Espessura da placa (ep)		0,0010
Espessura média do Canal (ec)		0,0025
Diâmetro hidráulico médio (De)		0,0050
Área de Troca de calor (m <sup>2</sup> )		0,0351
Número de passos	Fluido de aquecimento	1
	Suco de laranja	8

As simulações são realizadas com suco de laranja natural sob as mesmas condições operacionais iniciais de vazão e temperatura do fluido de aquecimento e do produto de Kim et al. (1999), apresentadas na Tabela 6, uma vez que o simulador original contém as propriedades termo-físicas deste produto.

#### 4.2.4 Proposições das condições dos ensaios

##### 4.2.4.1 Condições iniciais de operação

As seguintes opções e considerações iniciais foram feitas na obtenção dos resultados:

1. Troca de calor em contra corrente;
2. Efeitos das propriedades termo-físicas e reológicas dependentes da temperatura;
3. Os fluidos não Newtonianos foram considerados soluções aquosas diluídas, com as propriedades termo-físicas semelhantes a da água, conforme sugerido por Christiansen et al. (1962);
4. Escoamento na faixa de  $n^\circ$  de Reynolds  $> 5,5$  conforme Equação 6;
5. As condições iniciais de operação foram as seguintes:

*Tabela 6 – Condições de entrada do TCP*

Variáveis	Valores
$T_{(\text{produto})}$ (°C)	25
$T_{(\text{fluido térmico})}$ (°C)	80
$V_p$ (vazão mássica do produto) (kg/h)	400
$V_f$ (vazão mássica do fluido térmico) (kg/h)	2400

A partir destas condições operacionais foram realizados ensaios para definição do método de resolução das equações diferenciais, escolha da placa e configuração do TCP.

#### 4.2.4.2 Escolha do Método de Resolução do Sistema de Equações Diferenciais Ordinárias

São testados os métodos de resolução do sistema de equações diferenciais ordinárias de diferenças finitas implícito, explícito e de Crank Nicolson, disponíveis no simulador original desenvolvido por Berto (2000).

Para a escolha do melhor método de resolução, os experimentos são realizados utilizando soluções de pectina, k-carragena e goma xantana a concentrações de 1 (%). As condições iniciais de operação utilizadas estão mostradas na Tabela 6. A configuração do TPC utilizou a placa P5, com um de passo para ambos os fluidos. O número de canais ( $j$ ) foi igual a 8 e o número de divisões ( $k$ ) do comprimento da placa ( $L$ ) igual a 6.

#### 4.2.4.3 Escolha da Placa

Optou-se por avaliar a eficiência das placas de modelos V13 e V7, citadas em Modelos Matemáticos (item 3.1.1), por serem aplicadas para fluidos não Newtonianos, onde os números adimensionais ( $Re$ ,  $Pr$  e  $Nu$ ) levam em consideração os índices  $n$  e  $K$ .

Pode-se observar através das Equações 5 e 7, que o produto  $(Re_g^{1/3} \cdot Pr_g^{1/3})$ , anula os índices  $n$  e  $K$  das Equações 3 e 4, conseqüentemente desconsiderando a influência da viscosidade nos cálculos seguintes para faixas de fluxo laminar, onde  $Re_g < 5$  para a placa modelo V13, e  $Re_g < 70$  para a placa modelo V7.

#### 4.2.4.4 Escolha da Configuração do TCP

Verificam-se, entre as três opções de configurações do TCP (Tabela 7), disponíveis no simulador desenvolvido por Berto (2000), a melhor configuração de escoamento, para as mesmas condições operacionais, dados na Tabela 6, obtém-se a melhor performance no processo de aquecimento.

Tabela 7 – Configurações dos TCP<sup>2</sup>

Configuração	Número de Passes	
	Fluido	Produto
Nº 1	1	1
Nº 2	2.j	2.j
Nº 3	1	j

#### 4.2.5 Curvas de Reação do Processo Adimensionalizadas

Para análise da imagem especular das perturbações positivas e negativas, são gerados gráficos adimensionais, onde através deles é verificada a simetria através da sobreposição das curvas de reação da temperatura de saída do produto durante o regime transiente, após perturbações positivas e negativas de mesma amplitude.

Os números adimensionais foram calculados sendo eles:

$$\text{Temperatura adimensional:} \quad T^* = \frac{T - T_{1^{\circ}rp}}{T_{2^{\circ}rp} - T_{1^{\circ}rp}} \quad (36)$$

$$\text{Tempo adimensional:} \quad t^* = \frac{t - t_{1^{\circ}rp}}{t_{2^{\circ}rp} - t_{1^{\circ}rp}} \quad (37)$$

#### 4.2.6 Avaliação dos Perfis de Temperatura Internos ao TCP

A fim de avaliar os comportamentos de transferência de calor, pelos perfis internos de temperatura por posição em cada canal no TCP, o sistema é submetido a uma

<sup>2</sup> j=nº de canais=8

perturbação degrau na vazão do produto de -11,375%. São geradas figuras que representam os canais (1, 3, 5 e 7), sendo os canais ímpares os de passagem do produto. Cada sub-figura apresenta seis perfis de temperatura, os quais representam as subdivisões dos canais (k).

Os perfis internos são avaliados para os produtos goma-Xantana, k-Carragena e Pectina na concentração de 2%.

Através de ferramentas disponíveis no Software Matlab 6.1, todas as curvas de reação da temperatura do produto, são ajustadas a uma função de segunda ordem com  $\zeta=1$ , (ajuste detalhado no item 5.9), para a obtenção dos parâmetros respectivos aos canais (j) e subdivisão dos canais (k) apresentados em tabelas.

Com o objetivo de realizar uma comparação entre os três produtos, é gerada uma figura, com as curvas de reação da temperatura de saída do produto, para o canal 7 e para a subdivisão de canal (k6).

#### 4.2.7 Análise do Fator de Sensibilidade

O fator de sensibilidade (FS) é uma forma quantitativa de analisar o grau de influência das perturbações sobre a variável resposta em regime permanente. Ele é calculado como a razão entre a variação da temperatura de saída do produto, e a variação das variáveis de perturbação, conforme mostra a Equação 38:

$$FS = \frac{\frac{T_{2^{\circ}rp} - T_{1^{\circ}rp}}{T_{1^{\circ}rp}}}{\frac{V_{pert_0} - V_{pert_1}}{V_{pert_0}}}; \quad (38)$$

onde:

$V_{pert_0}$  = valor inicial da variável perturbada;

$V_{pert_1}$  = valor da variável após perturbação;

$2^{\circ}_{rp}$  = Segundo regime permanente;

$1^{\circ}_{rp}$  = Primeiro regime permanente.

sendo que “ $V_{pert}$ ” representa as variáveis perturbadas nas quais o distúrbio é realizado nas vazões iniciais.

Os F.S. são avaliados para condições de perturbações positivas e negativas da vazão de diferentes intensidades do produto em 3 condições de concentrações (1, 2 e 3 %) para cada produto, conforme mostrado na Tabela 8.

#### 4.2.8 Avaliação da Linearidade do Processo

São aplicadas perturbações positivas e negativas de mesma amplitude na temperatura de entrada do fluido e nas vazões de entrada do fluido de aquecimento (água) e produto, a partir do primeiro regime permanente para todos os fluidos nas respectivas concentrações.

Tabela 8 – Perturbações Simétricas Positivas e Negativas

Variáveis	Perturbações ( $\Delta$ )			
	++	+	-	--
$T_P(^{\circ}C)$	5	3	3	5
$T_F(^{\circ}C)$	5	3	3	5
$V_P(kg/h)$	-25 %	-12,5%	+12,5%	+25%
$V_F(kg/h)$	-25 %	-12,5%	+12,5%	+25%

As condições iniciais, ou seja, temperaturas estabilizadas de saída do produto são determinadas para cada concentração (1, 2 e 3%) para cada produto, uma vez que estas diferem para cada um dos ensaios. Determinadas às condições do primeiro regime permanente, são realizadas perturbações, conforme Tabela 8.

A partir das proposições dos ensaios com as respectivas perturbações (Tabela 8), são avaliadas as linearidades do processo, segundo item 3.4, baseados nas curvas de reação da temperatura de saída do produto.

#### 4.2.9 Planejamento Fatorial Composto Central - PFCC

Para aplicar o método de análise de superfície de resposta é necessário primeiramente programar ensaios através de um planejamento fatorial. Este método consiste em selecionar um número fixo de níveis para cada uma das variáveis de entrada. Então se executam experimentos/ensaios com todas as combinações previstas. A primeira etapa é usualmente um planejamento fatorial com 2 níveis (nível  $-1$  e  $+1$ ) para cada variável. Assim para 'n' variáveis envolvidas no estudo, o número de experimentos que deve ser realizado para investigar todas as combinações possíveis é igual a  $2^n$ . Para estimativa do erro experimental associado aos ensaios, são realizados 3 ensaios no ponto central ou nível (zero) correspondente às condições intermediárias entre os 2 níveis atribuídos a cada variável (Box, 1978). Porém no caso de simulação, apenas um ensaio é realizado no ponto central.

Através de Planejamentos de ensaios Fatoriais Completos de dois níveis com duas variáveis independentes  $2^2$ , é analisada a influência das variáveis independentes nas variáveis respostas, utilizando o programa STATÍSTICA 5.0.

Os modelos ajustados pelo STATÍSTICA 5.0 são codificados com os níveis das variáveis independentes apresentadas na Tabela 9.

Os valores de  $\alpha$  são calculados através da equação:  $\alpha = (2^n)^{1/4}$ , onde n é o número de variáveis independentes, portanto, para este caso  $\alpha = 1,4142$ .

Os níveis das variáveis independentes selecionadas para as avaliações estão mostrados na Tabela 9.

Tabela 9– Níveis das variáveis independentes para o PFCC

Variáveis Independentes	Níveis				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Concentração do Produto, X (%p/p)	1,168	1,41	2	2,59	2,832
Perturbação na vazão do Produto, $\Delta V_p(\%)$	-11,375	-6,25	6,25	18,75	23,875

Dentre as variáveis independentes, a primeira é o valor absoluto e constante da concentração que inicia o ensaio, já a segunda é o valor da perturbação imposta no ensaio para a avaliação da curva de reação do processo, dinamicamente.

A Tabela 10 mostra os ensaios a serem realizados com as respectivas combinações das variáveis independentes, sendo que cada ensaio se caracterizará por uma perturbação degrau e individual sobre a vazão do produto e em cada condição de concentração do mesmo, para as três soluções de fluidos não Newtonianos avaliadas.

As variáveis respostas sugeridas para as análises são  $\tau$ ,  $K_p$ ,  $Z$  e  $T_D$ , onde as duas primeiras caracterizam a ordem de comportamento do processo sob perturbação degrau e as duas últimas variáveis são parâmetros gráficos para serem utilizados na sintonia de controladores convencionais. O parâmetro  $K_p$  obtido graficamente é idêntico ao valor de  $K_p$  obtido através do ajuste do modelo.

Tabela 10- Planejamento Fatorial Composto Central

n° ensaios	Variáveis Independentes		Variáveis respostas			
	X	$\Delta V_P$	$\tau$	Kp	Z	T <sub>D</sub>
1	+1	+1				
2	-1	+1				
3	+1	-1				
4	-1	-1				
5	+ $\alpha$	0				
6	- $\alpha$	0				
7	0	+ $\alpha$				
8	0	- $\alpha$				
9	0	0				

#### 4.2.10 Comparação entre Curvas de Reação de Modelos Ajustados e Ensaiaados

A partir da função de transferência, no domínio do tempo, obtida através dos modelos multivariáveis resultada dos planejamentos de ensaios, é realizada uma comparação entre curvas de reação obtidas pelos dados gerados pela função de transferência multivariável e os dados obtidos através do simulador dinâmico. Utilizou-se o coeficiente de correlação  $R^2$  para verificar se a variação dos dados ensaiados é explicada pelo modelo multivariável.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 5.1 Modelos das Propriedades Reológicas dos Fluidos de Trabalho

A partir de valores de  $n$  e  $K$  obtidos experimentalmente por Marcotte et al. (2001), foram ajustadas equações para  $n=f(T_k, X)$  e  $K=f(T_k, X)$ , conforme modelos propostos nas equações 34 e 35, onde  $T_k$  [K], e  $X$  [%p/p].

Os coeficientes dos ajustes, relativos às equações 34 e 35, dos parâmetros reológicos  $n$  e  $K$ , dos diferentes produtos utilizados (soluções aquosas com respectivas faixas de concentrações mostradas na Tabela 4) estão apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Coeficientes Ajustados dos Modelos Propostos para os Parâmetros Reológicos dos Diferentes Produtos

Produtos	índices	$B_1$	$B_2$	$B_3$	$B_4$	$B_5$	$B_6$	$R^2$
Pectina	K	0,000	4219,86	0,00	0,00	0,93	0,00	0,9979
	n	18,30	-11,1	0,00	0,00	-0,0013	-16,77	0,8504
goma-Xantana	K	2,36	-313,8	7,05	-1,006	0,0055	2,494	0,9528
	n	0,524	-723,15	1,53	0,00	-0,030	0,00	0,9438
k-Carragena	K	28,19	6565,7	-15,65	-1,00	0,0003	0,00	0,9746
	n	0,0048	-727,04	9,113	-0,843	-0,012	0,00	0,9738

### 5.2 Validação do Modelo Matemático

Os resultados obtidos pelo simulador são comparados com os obtidos experimentalmente por Kim et al. (1999) na condição de regime permanente. Esta comparação é mostrada na Tabela 12, apresentando desvios nas temperaturas de saída de +1,00 e de - 4,23 % para o produto e o fluido de aquecimento, respectivamente. Pode-se concluir, a partir desses pequenos desvios, que a modelagem empregada e as adequações realizadas no simulador resultaram em dados com baixos desvios aos resultados experimentais.

*Tabela 12– Comparação entre dados experimentais e preditos*

Variáveis	Kim et al. (1999)	Preditas	Diferença (%)
T. entrada do produto (°C)	5,00	5,00	-
T. saída do produto (°C)	79,37	80,16	+1,00
T. entrada do fluido de aquecimento (°C)	82,30	82,30	-
T. saída do fluido de aquecimento (°C)	71,67	68,64	-4,23
Vazão do fluido de aquecimento (kg/s)	2,255	2,255	-
Vazão do produto (kg/s)	0,342	0,342	-

Assim, pode-se considerar que o modelo matemático utilizado está validado aos resultados experimentais, pois, tanto as condições operacionais quanto à configuração física do TCP foram às mesmas.

Uma vez que as validações do modelo matemático e a simulação foram consideradas pelas comparações das condições finais, considera-se a transferência de calor interna (Balanço de energia) ao TCP também validada, ou seja, os perfis de temperatura internos

também representariam a realidade, já que tanto em regime permanente como transiente não há dados experimentais para tal comparação.

### 5.3 Verificação do Método de Resolução dos Sistemas de Equações Diferenciais Ordinárias, Escolha do Tipo de Placa e Configuração do TCP.

#### 5.3.1 Escolha do Método de Resolução do Sistema de Equações Diferenciais

Pela análise da Figura 8, verificou-se o comportamento da temperatura de saída do produto a partir da resolução do modelo matemático com os três métodos citados, optou-se pelo uso do método de Crank-Nicolson em todos os ensaios, porque este contempla os outros dois métodos e apresenta maior estabilidade.

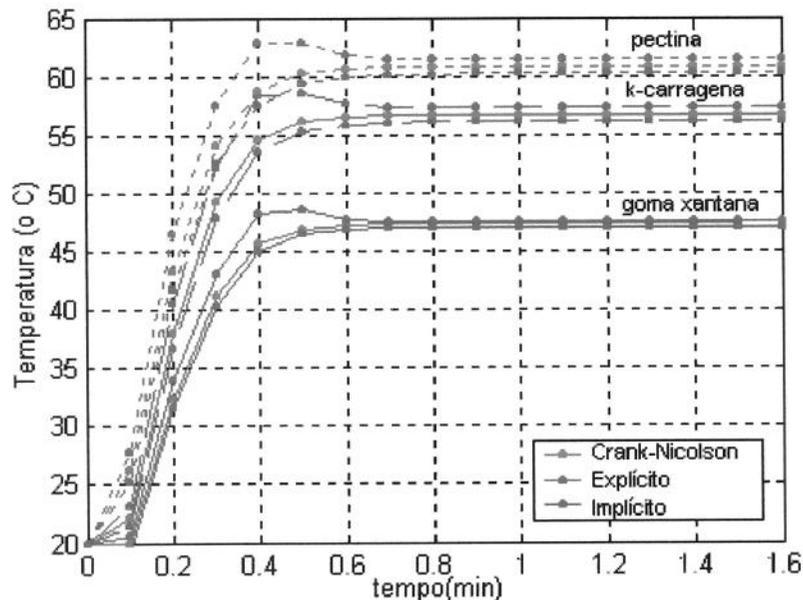


Figura 8 - Comparação entre os métodos de resolução para o primeiro regime permanente

### 5.3.2 Escolha da placa

Para as condições iniciais escolhidas para o desenvolvimento do trabalho (Tabela 6), obtêm-se valores de  $Re_g < 70$  para a placa modelo V7, e os resultados obtidos a partir desta não apresentaram variações na temperatura de estabilização e quando realizadas perturbações para diferentes concentrações dos fluidos testados não se observaram influência nas variáveis respostas.

Sendo assim, como o objetivo deste trabalho é avaliar a influência reológica nas variáveis de interesse, optou-se portanto pelo uso da placa modelo V13 (corrugações inclinadas  $60^\circ$  tipo ‘espinha de peixe’), que é indicada para fluidos viscosos, para a continuação do trabalho.

### 5.3.3 Escolha da Configuração do TCP

Dentre as opções de configuração do TCP, mostradas na Tabela 7, a configuração de escoamento n° 3, mostrada na Figura 10, com placa modelo V13, atingiu a maior temperatura de estabilização no primeiro regime permanente, conforme Figura 9, para a goma-Xantana (1%), apresentando o mesmo comportamento para os outros dois fluidos, sendo portanto a configuração escolhida para a continuidade do trabalho.

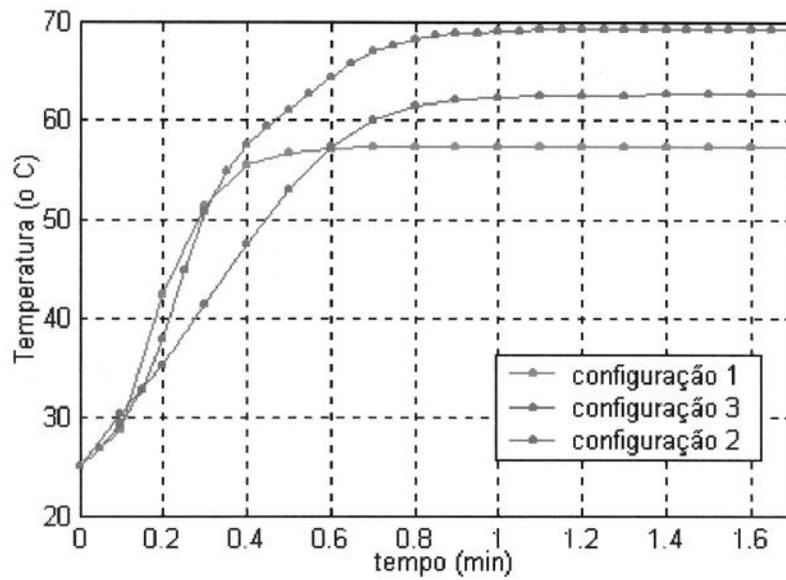


Figura 9– Curvas de temperatura de saída do produto, goma-Xantana (1%), para configurações do TCP, com a placa de modelo V13.

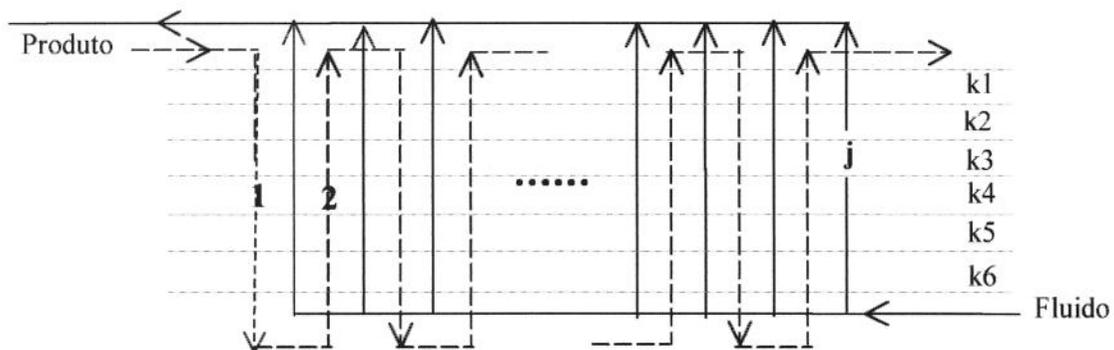


Figura 10– Esquema do Trocador de Calor a Placas para configuração 3, onde  $j=8$ .

Cada canal ( $j$ ) da Figura 10 é subdividido em seis partes ( $k$ ).

Sendo assim, dentre as diversas opções que o simulador oferece para as avaliações propostas, a Figura 11 sintetiza as escolhas de operação do simulador, enfatizadas e justificadas nos itens anteriores.

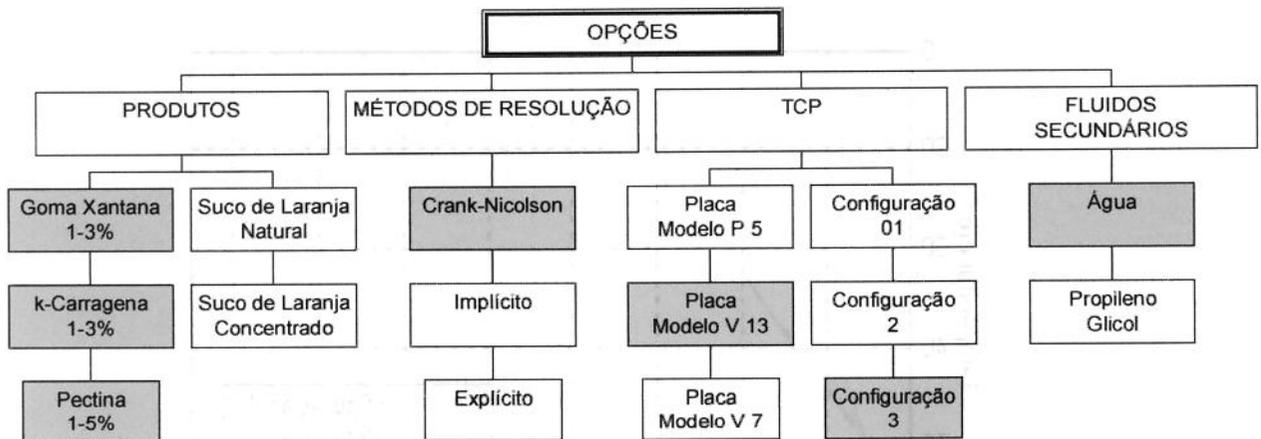


Figura 11– Fluxograma das opções de operação

#### 5.4 Temperaturas Estabilizadas dos Produtos na Saída do TCP

A partir das definições da configuração do TCP (configuração nº3), do modelo da placa (modelo V13 – corrugações inclinadas 60°, tipo espinha de peixe), do método de resolução do sistema de equações diferenciais ordinárias (Crank Nicolson) e ainda com as condições operacionais de entrada de ambos os fluidos, conforme Tabela 6, obteve-se as temperaturas de saída dos diferentes produtos às respectivas concentrações, numa condição estável de regime permanente, mostrado na Tabela 13, estas são utilizadas para avaliar os desvios das temperaturas de saída com referência a estas condições iniciais para as avaliações de Perfis de Temperatura, Fator de Sensibilidade e PFCC.

*Tabela 13 – Temperaturas estabilizadas dos produtos na saída do TCP no Primeiro Regime Permanente*

Produtos	Temperaturas de estabilização nas concentrações:						
	1 (%)	1,168(%)	1,41(%)	2 %	2,59(%)	2,832(%)	3 %
goma-Xantana	54,80	52,97	51,54	49,30	47,98	47,54	47,23
k-Carragena	57,80	55,21	52,92	50,30	48,97	48,66	48,49
Pectina	59,17	55,33	54,42	52,10	49,89	48,97	47,50

### **5.5 Perfis de Temperatura Internos ao TCP**

As Figuras 12 a 14 mostram os perfis de temperatura dos 3 produtos, goma-Xantana, k-Carragena e Pectina respectivamente, a 2% de concentração, para os quatro canais de fluxo de produto (1, 3, 5 e 7). As curvas de reação da temperatura de saída do produto foram obtidas após perturbação degrau na vazão do produto ( $\Delta V_p$ ) de -11,375.

Cada canal apresenta os comportamentos transientes da temperatura do produto em cada subdivisão dos canais (k) em 6 diferentes curvas de reação (k1 a k6) na ordem do sentido da vazão do produto, conforme Figura 10.

As figuras que representam as curvas de reação de cada canal foram obtidas pelos diferenciais de tempo e temperatura.

onde:

$$Dt = (t - t(1))$$

$$DT = (T - T(1))$$

I = magnitude da perturbação na vazão do produto (45,5 kg/h)

sendo:

(1) = inicial (após estabelecido 1°rp)

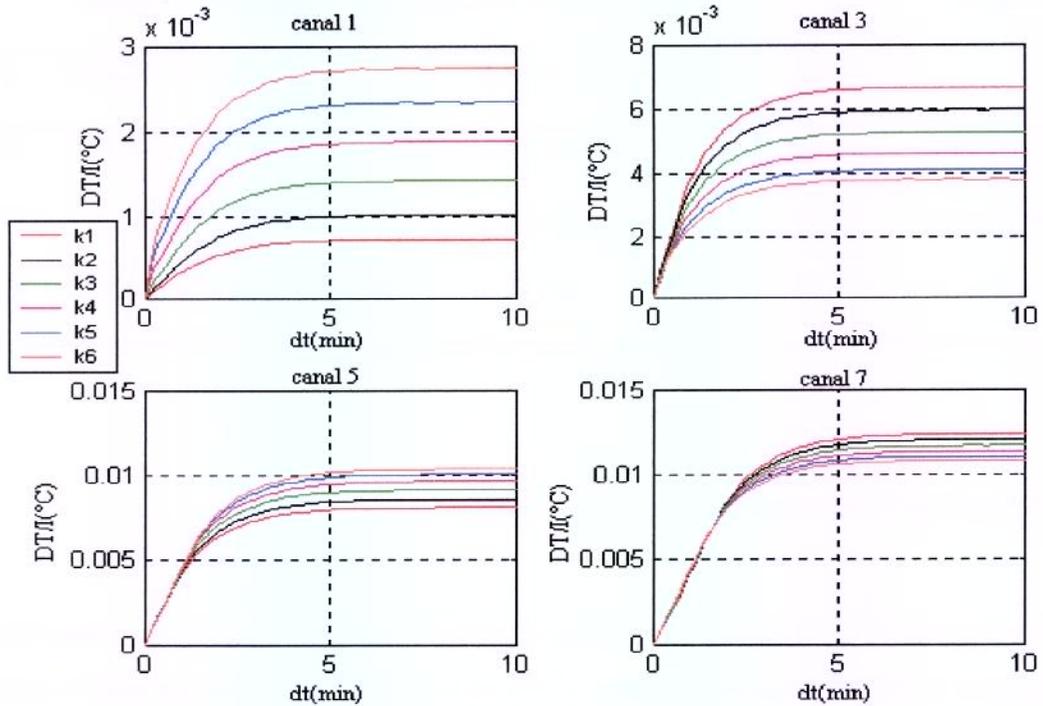


Figura 12 – Curvas de reação da temperatura do produto por canal após perturbação de grau na vazão do produto ( $\Delta Vp = -11,375\%$ ) para goma xantana 2%

Pode-se observar através da Figura 12 e da Tabela 14, a evolução dos valores do ganho do sistema  $Kp$  dentro do trocador através dos canais e das subdivisões dos mesmos, mostrando um crescente aumento do ganho do sistema.

Deve-se enfatizar que a passagem do produto segue a representação da Figura 10.

Tabela 14 - Parâmetro  $K_p$  ajustado para cada canal ( $j$ ) e subdivisão do canal ( $k$ ) para goma-Xantana 2%

$K_p$	Canal 1	Canal 3	Canal 5	Canal 7
k1	0,0007	0,0066	0,0080	0,0123
k2	0,0010	0,0059	0,0085	0,0120
k3	0,0014	0,0052	0,0090	0,0116
k4	0,0019	0,0045	0,0095	0,0113
k5	0,0023	0,0040	0,0100	0,0110
k6	0,0027	0,0037	0,0103	0,0107

OBS: As setas representam o sentido do fluxo do produto

Através da Tabela 15, pode-se observar a evolução do comportamento da constante de tempo  $\tau$  que apresenta uma queda no primeiro canal e um crescente aumento nos demais.

Tabela 15 - Parâmetro  $\tau$ , ajustado para cada canal ( $j$ ) e subdivisão do canal ( $k$ ) para goma-Xantana 2%

$\tau$	Canal 1	Canal 3	Canal 5	Canal 7
k1	0,6744	0,5600	0,6154	0,8591
k2	0,7139	0,5382	0,6357	0,8325
k3	0,6841	0,5260	0,6585	0,8087
k4	0,6281	0,5192	0,6768	0,7862
k5	0,5807	0,5101	0,6933	0,7633
k6	0,5492	0,5109	0,7105	0,7466

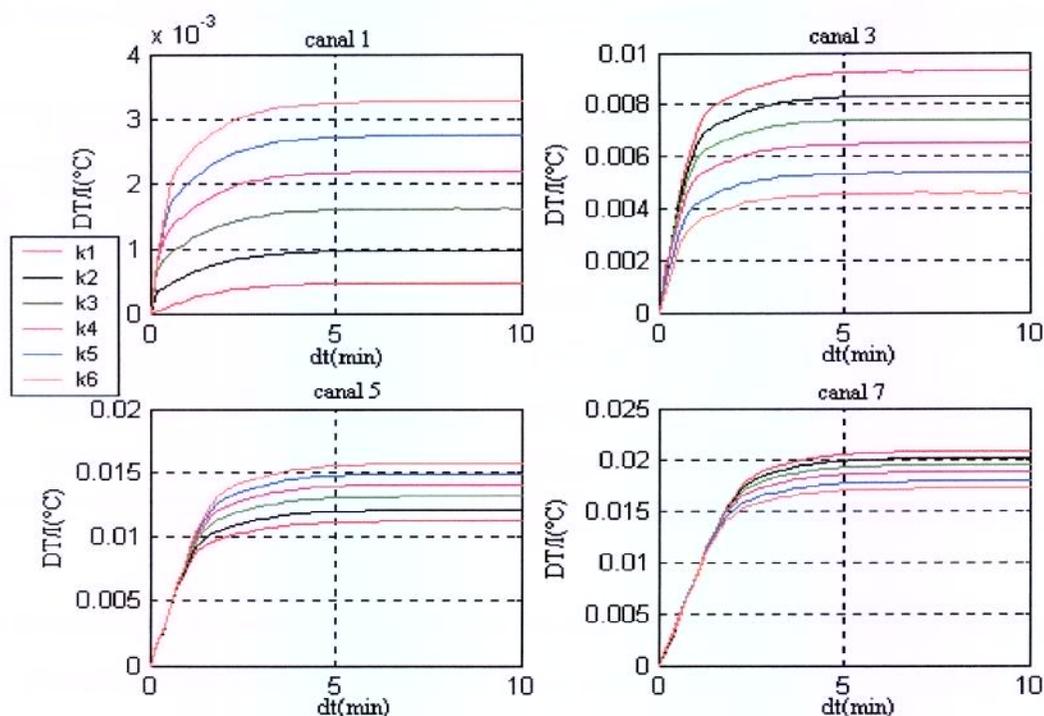


Figura 13 – Curvas de reação da temperatura do produto por canal após perturbação degrau na vazão do produto ( $\Delta Vp = -11,375\%$ ) para  $k$ -Carragena 2%

Semelhante ao comportamento da goma-Xantana, observa-se pela Figura 13 e Tabela 16 um aumento crescente do o ganho do sistema em todos os canais e subdivisões.

Tabela 16 - Parâmetro  $Kp$  ajustado para cada canal ( $j$ ) e subdivisão do canal ( $k$ ) para  $k$ -Carragena 2%

$Kp$	Canal 1	Canal 3	Canal 5	Canal 7
k1	0,0004	0,0091	0,0110	0,0207
k2	0,0009	0,0082	0,0119	0,0200
k3	0,0016	0,0073	0,0130	0,0193
k4	0,0021	0,0064	0,0139	0,0186
k5	0,0027	0,0053	0,0147	0,0177
k6	0,0032	0,0045	0,0155	0,0170

A constante de tempo para a k-Carragena, observada na Tabela 17, apresentou queda no primeiro canal e aumento nos demais. O comportamento de queda da constante de tempo no primeiro canal é devido ao maior diferencial de temperatura entre o fluido de aquecimento e o produto neste canal, ou seja, a temperatura do produto para o primeiro canal exige menos tempo para atingir o regime permanente após a perturbação devido a maior taxa transferência de calor no canal 1.

Tabela 17 - Parâmetro  $\tau$ , ajustado para cada canal (j) e subdivisão do canal (k) para k-Carragena 2%

$\tau$	Canal 1	Canal 3	Canal 5	Canal 7
k1	0,5327	0,3671	0,4308	0,7088
k2	0,4589	0,3422	0,4540	0,6794
k3	0,3440	0,3203	0,4792	0,6508
k4	0,3144	0,3153	0,5048	0,6245
k5	0,3090	0,3132	0,5285	0,6034
k6	0,3113	0,3380	0,5499	0,5873

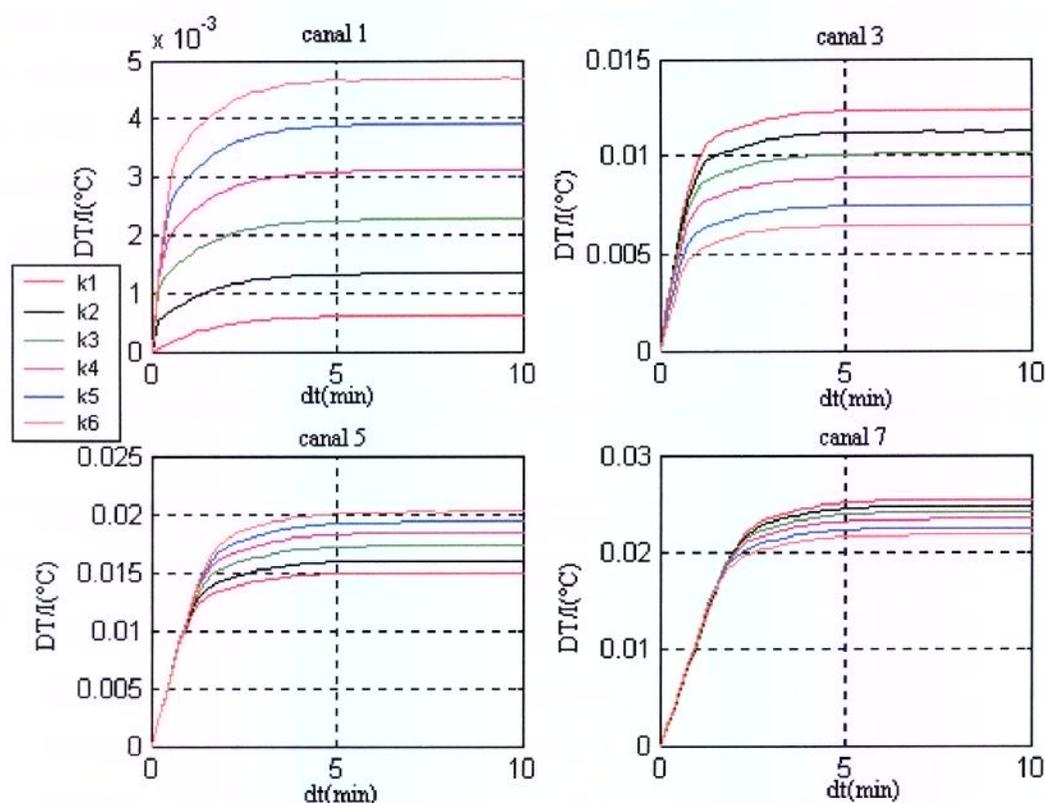


Figura 14 – Curvas de reação da temperatura do produto por canal após perturbação degrau na vazão do produto ( $\Delta V_p = -11,375\%$ ) para pectina 2%

Tabela 18 - Parâmetro  $K_p$  ajustado para cada canal ( $j$ ) e subdivisão do canal ( $k$ ) para Pectina 2%

$K_p$	Canal 1	Canal 3	Canal 5	Canal 7
$k_1$	0,0006	0,0122	0,0148	0,0253
$k_2$	0,0013	0,0111	0,0158	0,0247
$k_3$	0,0022	0,0100	0,0171	0,0240
$k_4$	0,0030	0,0088	0,0182	0,0233
$k_5$	0,0038	0,0073	0,0192	0,0223
$k_6$	0,0046	0,0063	0,0200	0,0216

A característica principal, observada em todos os produtos, é o aumento crescente do ganho do sistema no sentido do fluxo do produto, tanto em relação aos canais quanto em relação às subdivisões.

O parâmetro  $\tau$  para a k-Carragena, seguiu o comportamento dos outros dois fluidos, ou seja, apresentou decréscimo no primeiro canal, no sentido do fluxo do produto, e aumento nos outros canais.

Tabela 19 - Parâmetro  $\tau$ , ajustado para cada canal ( $j$ ) e subdivisão do canal ( $k$ ) para k-Carragena 2%

$\tau$	Canal 1	Canal 3	Canal 5	Canal 7
k1	0,5960	0,3321	0,3956	0,6850
k2	0,3938	0,3099	0,4206	0,6556
k3	0,2759	0,2909	0,4480	0,6272
k4	0,2547	0,2861	0,4746	0,6009
k5	0,2580	0,2840	0,4992	0,5787
k6	0,2675	0,3025	0,5216	0,5612

A variação do comportamento dinâmico, como pode ser observado pela Figura 15, é de ordem crescente para o ganho do sistema e aparece com maior intensidade para os produtos na seguinte ordem: Pectina, k-Carragena e goma-Xantana.

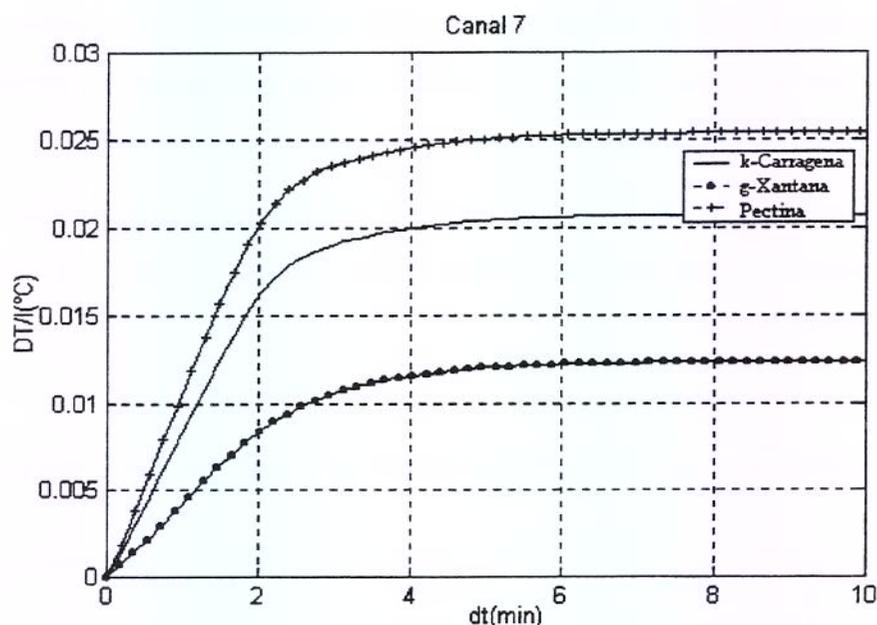


Figura 15 - Curvas de Reação da Temperatura de saída, para os três produtos, para o canal 7 e subdivisão do canal k1, após Perturbação na Vazão do Produto.

Através da Tabela 20, pode-se confirmar as tendências das curvas de reação observadas na Figura 15, para a subdivisão de saída (k1) do canal 7. A Tabela 20 apresenta os valores dos parâmetros ( $K_p$  e  $\tau$ ) para os três fluidos.

Tabela 20 – Parâmetros  $K_p$  e  $\tau$  das Curvas de Reação da Temperatura de saída, para os três produtos, para o canal 7 e subdivisão do canal k1, após Perturbação na Vazão do Produto.

Produtos	$K_p$	$\tau$
goma-Xantana	0,0123	0,8591
k-Carragena	0,0207	0,7088
Pectina	0,0253	0,6850

As curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbação degrau na vazão do produto de  $-11,375\%$ , expressas em DT versus Dt, podem ser vistas para as diferentes concentrações (1, 2 e 3%) para os produtos no Anexo V.

### 5.6 Avaliação do Fator de Sensibilidade

A partir das condições de entrada (Tabela 6), utilizadas para todos os ensaios, obteve-se as temperaturas estabilizadas dos produtos na saída do TCP em cada concentração, a fim de ser as condições de temperatura de referência no primeiro regime permanente, mostrados na Tabela 13.

A Tabela 21, apresenta o módulo dos fatores de sensibilidade calculados para perturbações individuais simétricas, de diferentes amplitudes e concentrações, onde os níveis estão apresentados na Tabela 8.

As curvas de reação da temperatura de saída do produto para as diversas perturbações estão mostradas no *Anexo I*.

*Tabela 21 – Fatores de Sensibilidade, em módulo, para perturbações na vazão do produto ( $\Delta V_p$ ) à diferentes concentrações*

<b>goma - Xantana</b> ( $\Delta V_p$ )	<b>1%</b>	<b>2%</b>	<b>3%</b>
++	0,102	0,089	0,067
+	0,117	0,081	0,050
-	0,095	0,097	0,067
--	0,080	0,069	0,167
<b>k-Carragena - (<math>\Delta V_p</math>)</b>			
++	0,138	0,111	0,079
+	0,180	0,111	0,105
-	0,152	0,191	0,140
--	0,118	0,143	0,132
<b>Pectina - (<math>\Delta V_p</math>)</b>			
++	0,147	0,138	0,109
+	0,172	0,154	0,017
-	0,193	0,192	0,303
--	0,158	0,169	0,227

Pode-se observar que a magnitude da resposta para uma mesma perturbação inicial é dependente das condições iniciais de operação em regime permanente, ou seja, é dependente das concentrações e, conseqüentemente, dos parâmetros reológicos  $n$  e  $K$ .

O comportamento do fator de sensibilidade foi decrescente com o aumento da concentração na maioria das concentrações dos produtos e perturbações nas vazões. Em relação à amplitude das perturbações realizadas na vazão do produto, tanto positivas como negativas, pode-se perceber um decréscimo do fator de sensibilidade com o aumento da amplitude de perturbação, exceto para as perturbações positivas dos produtos a 3%.

Os produtos apresentaram ordem crescente de importância, em relação ao fator de sensibilidade, na seguinte seqüência: goma-Xantana, k-Carragena e Pectina.

Perturbações negativas e positivas na vazão do produto apresentam curvas de reação com comportamentos contrários, ou seja, perturbações negativas provocam respostas positivas na temperatura de saída do produto. Este comportamento é esperado, já que para perturbações negativas na vazão há um aumento do tempo de residência do produto, permitindo um aumento na troca de calor e conseqüentemente na temperatura de saída do produto.

Pode-se concluir que a solução aquosa de Pectina apresentou respostas mais susceptíveis as perturbações realizadas, pois seus valores do F.S. são maiores, em módulo, que para os da goma-Xantana e k-Carragena em suas diversas concentrações.

## ***5.7 Caracterização da Linearidade do Processo***

### ***5.7.1 Avaliação do Princípio da Sobreposição***

#### ***5.7.1.1 Por Imagem Especular da Resposta***

De acordo com o princípio da sobreposição, item 3.4, o processo seria linear se a mudança observada na resposta para uma certa perturbação positiva tivesse uma perfeita imagem especular da resposta para uma perturbação negativa de mesma amplitude. Sendo

assim foram graficadas respostas adimensionais, a partir das figuras do Anexo I, para uma perturbação positiva e outra negativa de mesma amplitude, das vazões e temperaturas iniciais dos produtos e do fluido de aquecimento, conforme Tabela 8, para diferentes concentrações, a fim de obter uma comparação visual, da possível sobreposição, mostradas nas Figuras 16 a 24.

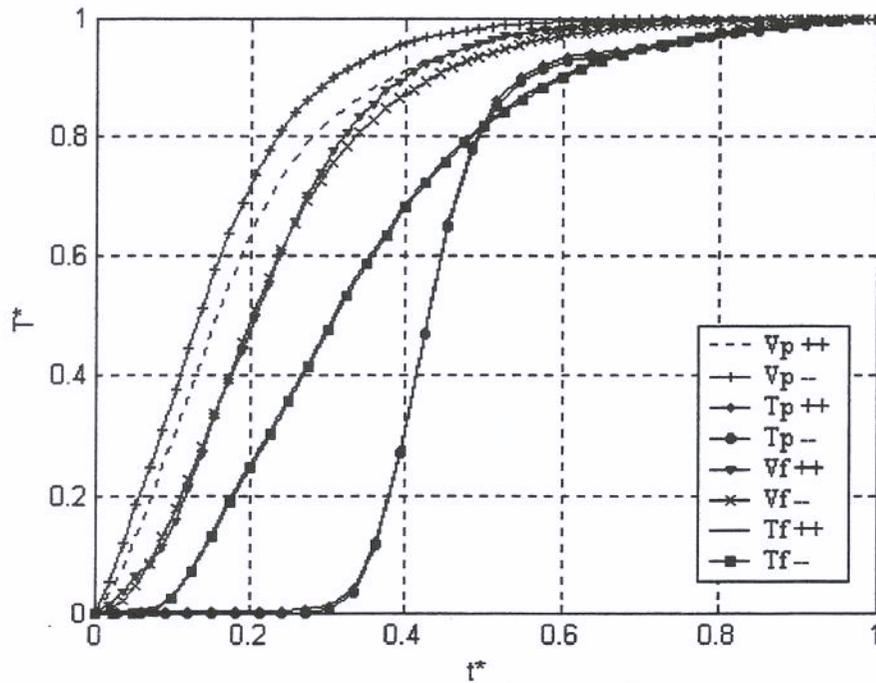


Figura 16 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizadas para Goma-Xantana (1%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

Através das curvas de reação das temperaturas de saída adimensionalizadas relativas aos produtos nas três concentrações, observa-se que perturbações positivas e negativas de mesma amplitude nas temperaturas, tanto do produto quanto do fluido de aquecimento, apresentam boa sobreposição, enquanto que perturbações na vazão do fluido de aquecimento e principalmente do produto não se sobrepõem.

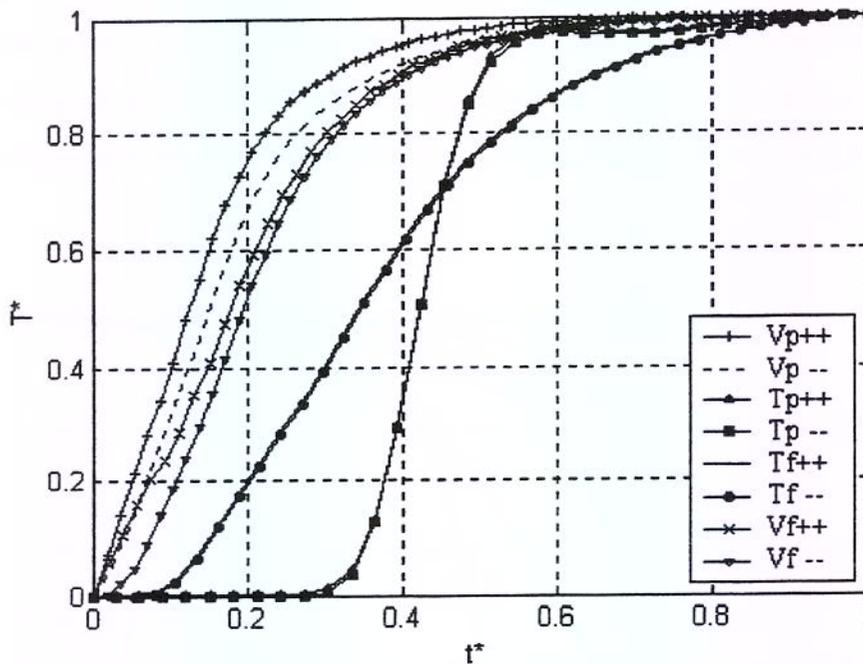


Figura 17- Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para Goma-Xantana (2%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

Pode-se observar pela Figura 17, que perturbações tanto positivas quanto negativas na vazão do produto, reagem mais rapidamente exigindo um tempo menor para se aproximar do segundo regime permanente, quando comparadas com a resposta da perturbação nas temperaturas do produto e fluido de aquecimento, que respondem mais lentamente às perturbações demandando mais tempo para se aproximar do segundo regime permanente. Este comportamento é devido à configuração escolhida, que consta de 4 passos para o produto e um para o fluido de aquecimento, ou seja, há um tempo de residência maior da frente do produto que altera a dinâmica de resposta da temperatura de saída do produto.

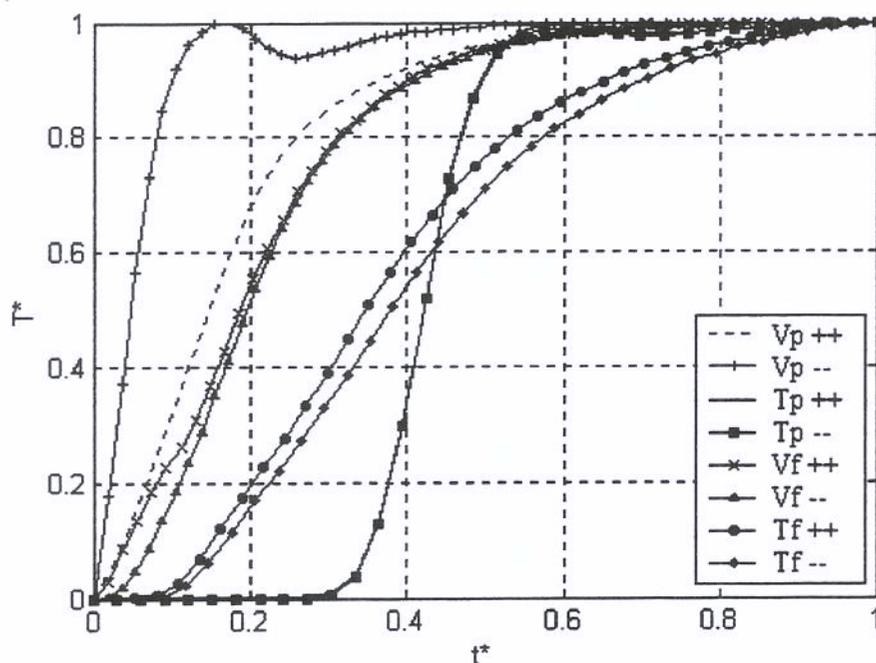


Figura 18- Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para Goma-Xantana (3%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

A Figura 18 mostra que perturbações, tanto nas temperaturas do produto quanto na temperatura e vazão do fluido de aquecimento, provocam curvas de reação com boa sobreposição.

A curva de reação referente à perturbação na vazão do produto ( $\Delta V_p$ ), apresenta um desvio significativo da linearidade e uma depressão na temperatura de saída do produto devido à fase de transição de regime de escoamento de turbulento para laminar nesta região, ou seja, os cálculos realizados até  $t^* \cong 0,018$  utilizam a equação (6) para  $Re > 5,5$  a partir deste tempo até  $t^* = 1$ , os cálculos são realizados utilizando a equação (5) para  $Re \leq 5,5$ .

Este tipo de comportamento é visualizado apenas na maior concentração para a goma-Xantana, e não nas outras concentrações, porque para menores concentrações não há influência significativa no sistema de forma a mudar o regime de escoamento de turbulento para laminar.

Para o caso de simulação dinâmica a transição entre esses dois regimes acontece de forma repentina, ou seja, não há uma fase de transição. Na realidade, esta região de transição seria também variável no tempo, sendo assim, não haveria a depressão visualizada na Figura 18.

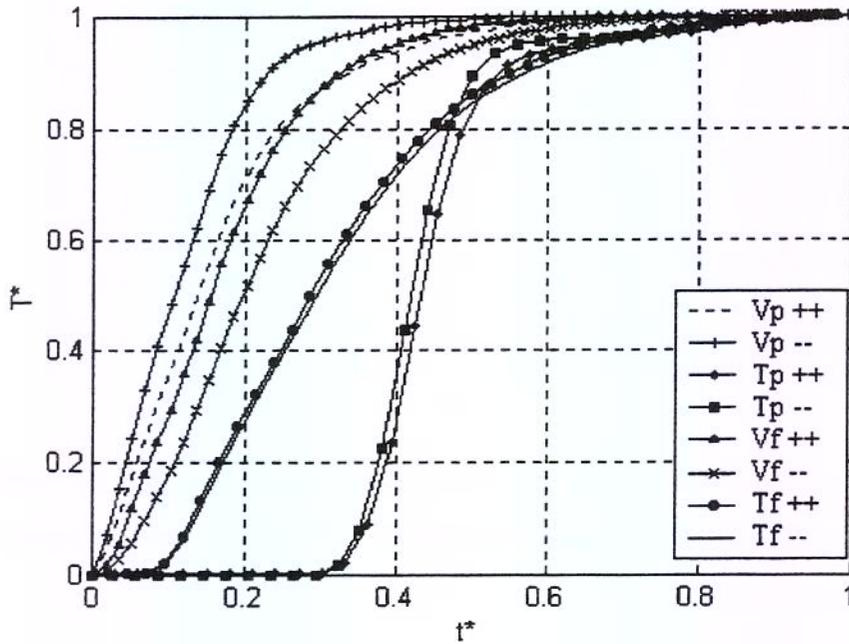


Figura 19 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para *k*-Carragena (1%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

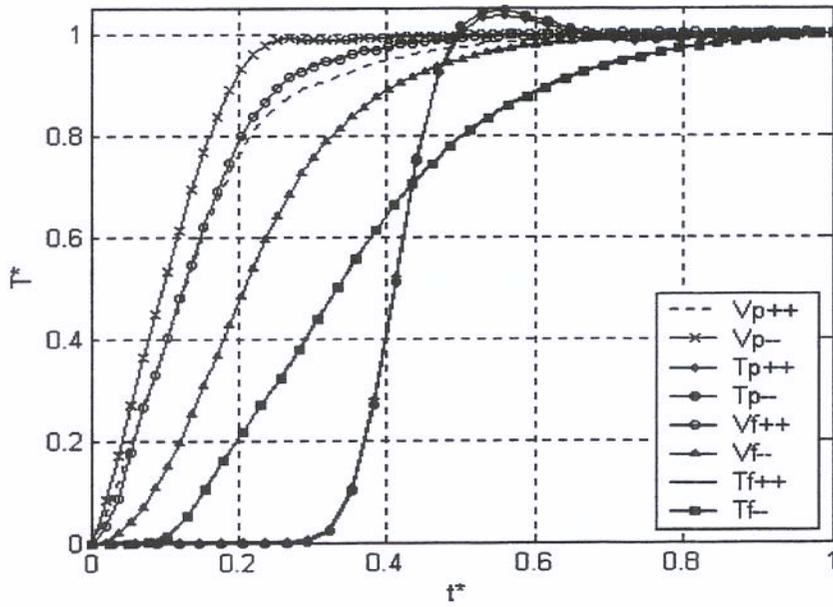


Figura 20 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para  $k$  - Carragena (2%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

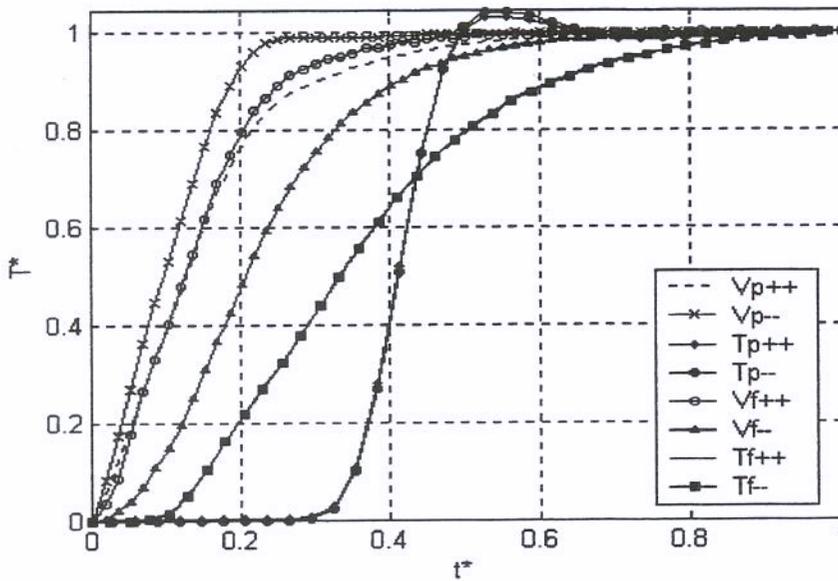


Figura 21 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizada para  $k$  - Carragena (3%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

Observa-se que o comportamento das curvas de reação da k-Carragena é semelhante ao da goma-Xantana, apresentando maior desvio da simetria para as respostas às perturbações na vazão do produto e fluido de aquecimento.

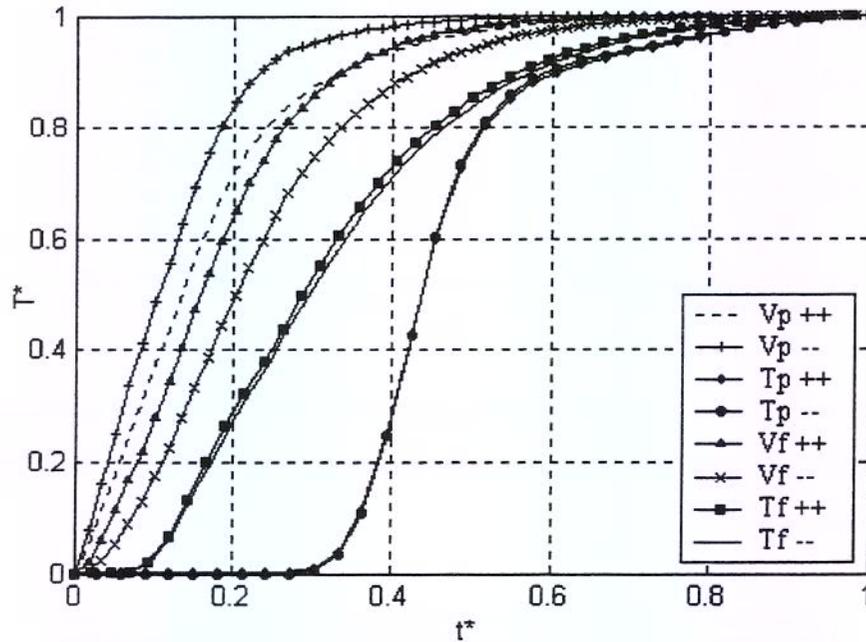


Figura 22 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizadas para Pectina (1%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

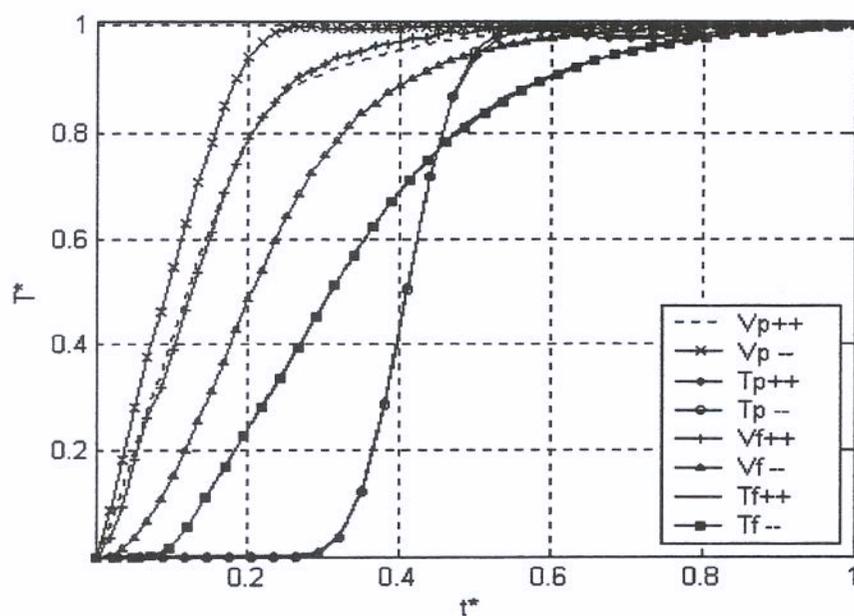


Figura 23 - Curvas de reação da temperatura de saída adimensionalizadas para Pectina (2%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento

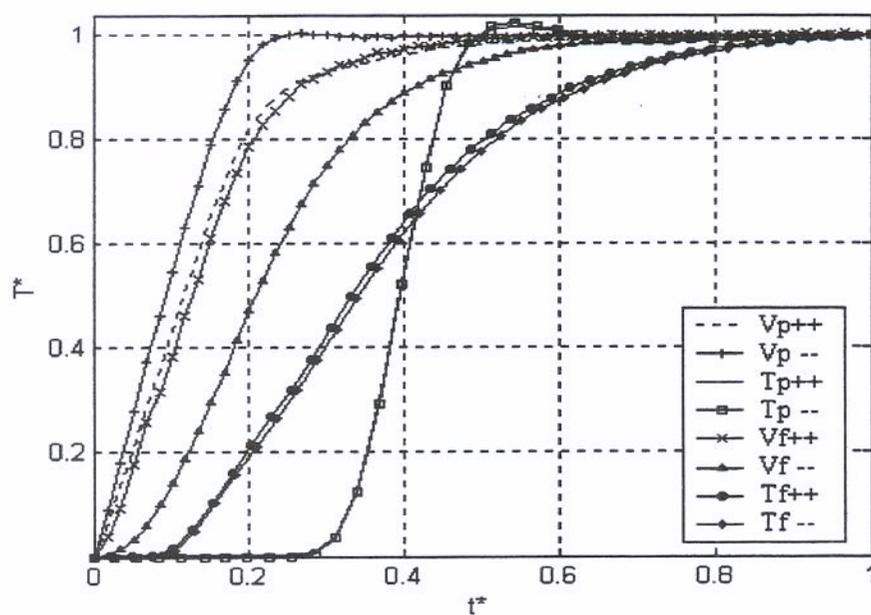


Figura 24 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas para Pectina (3%) após perturbações nas vazões e temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento

Quanto ao comportamento dos outros dois produtos, pode-se concluir de maneira análoga a goma-Xantana, em que se observa um maior desvio da linearidade para curvas de reação da temperatura de saída do produto, obtidas após perturbações nas vazões do produto e do fluido de aquecimento.

#### 5.7.1.2 Por Soma das Respostas

Além da apresentação gráfica dos espectros das temperaturas de saída do produto, realizaram-se ensaios para os três produtos à mesma concentração, e de acordo com o princípio da sobreposição, o processo é linear se a soma das respostas do processo for exatamente igual à resposta da perturbação da soma.

Avaliou-se o diferencial da temperatura de saída do produto sob diversas perturbações, conforme apresentados na Tabela 22, a fim de mostrar graficamente a o comportamento dos fluidos testados em relação ao princípio da sobreposição, demonstrando a não linearidade deste processo.

É importante salientar que  $\Delta(1+2)$  é a soma dos valores das respostas, da temperatura de saída do produto, obtidas a partir das perturbações  $\Delta 1$  e  $\Delta 2$ .

*Tabela 22 – Amplitudes das perturbações da vazão do produto*

Perturbações	$\Delta V_p$ (%)	$\Delta V_p$ (kg/h)
$\Delta 1$	6,25	+25
$\Delta 2$	18,75	+75
$\Delta 3$	25	+100

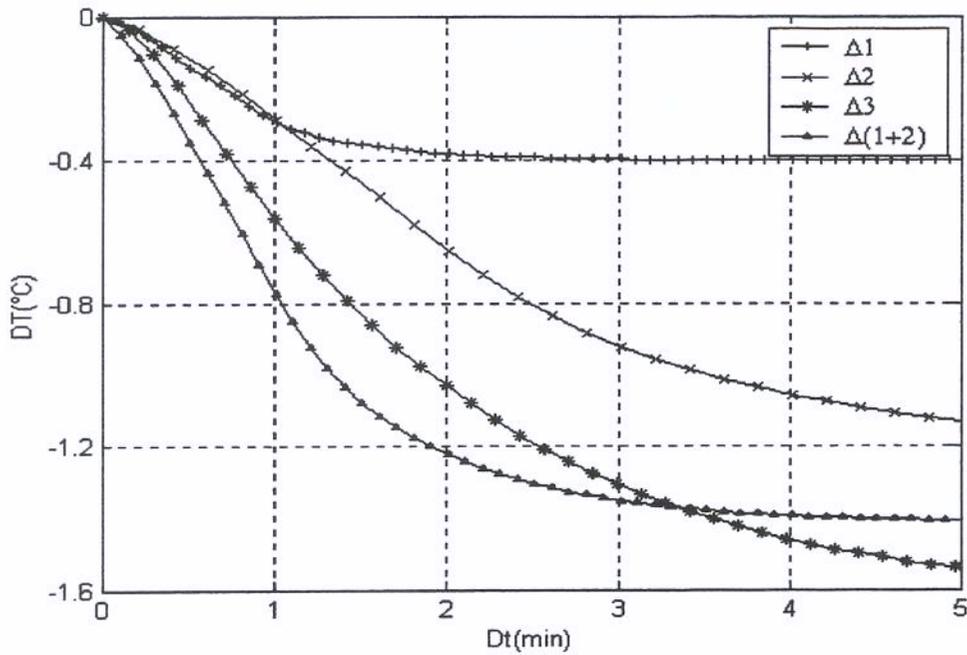


Figura 25 – Curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbações individuais de diferentes amplitudes da vazão do produto para goma-Xantana a 1%.

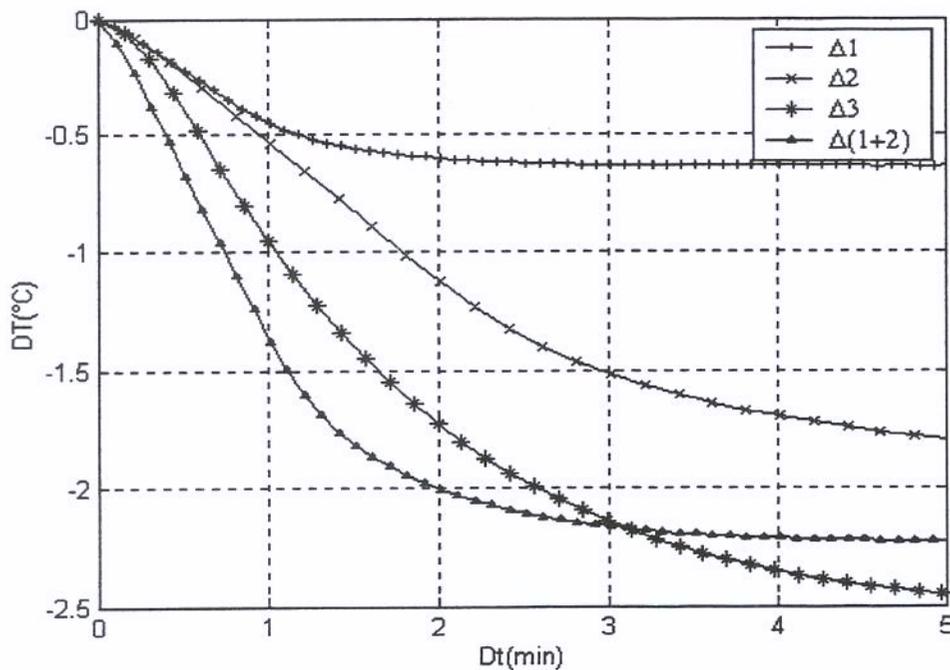


Figura 26 – Curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbações individuais de diferentes amplitudes da vazão do produto para k-Carragena a 1%.

Observa-se que a soma das respostas do processo (1 + 2), não é exatamente igual a resposta da perturbação da soma (3), conforme se observa pelas Figuras 25, 26 e 27, para perturbações na vazão dos produtos a 1%, confirmando a não linearidade do processo para perturbações nas vazões do produto.

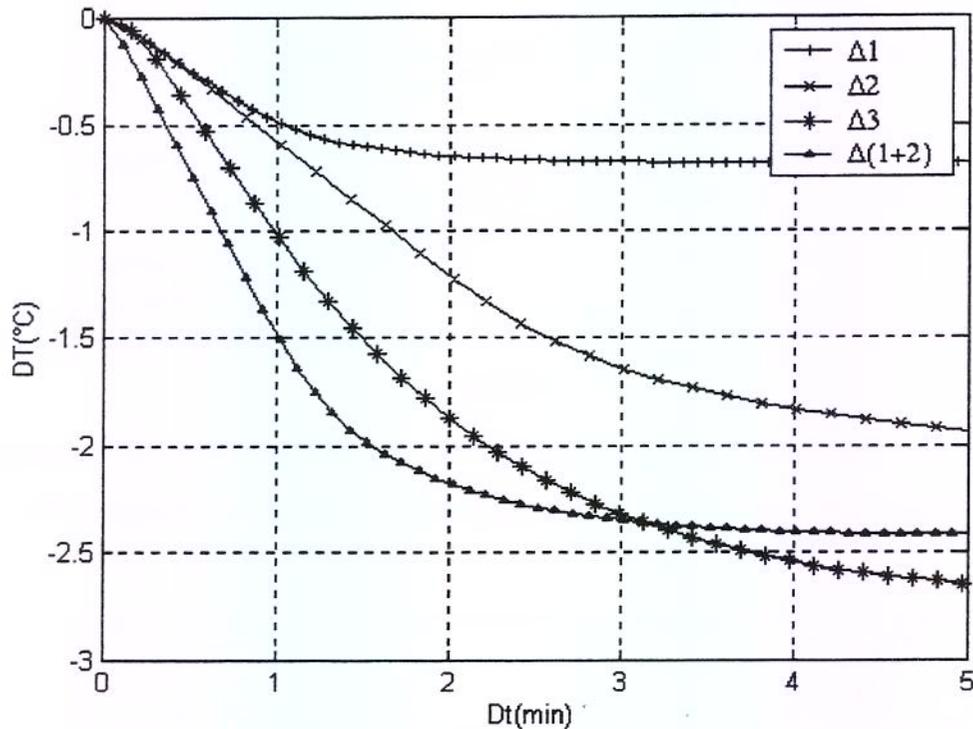


Figura 27 – Curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbações individuais de diferentes amplitudes da vazão do produto para Pectina a 1%.

### 5.7.2 Comparação das Curvas de Reação às Diferentes Concentrações

Foram realizadas comparações através de gráficos adimensionais das curvas de reação da temperatura de saída para cada produto em diferentes concentrações através de perturbações idênticas na vazão dos produtos de -25%, diferenciando apenas as condições do primeiro regime permanente as quais estão representadas pelas Figuras 28, 29 e 30.

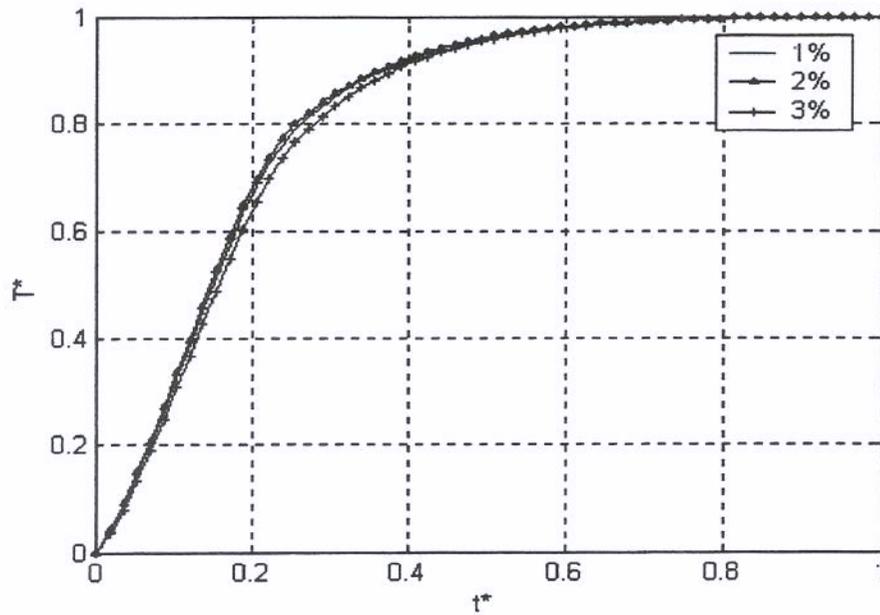


Figura 28 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas após perturbações na vazão do produto a diferentes concentrações para goma-Xantana

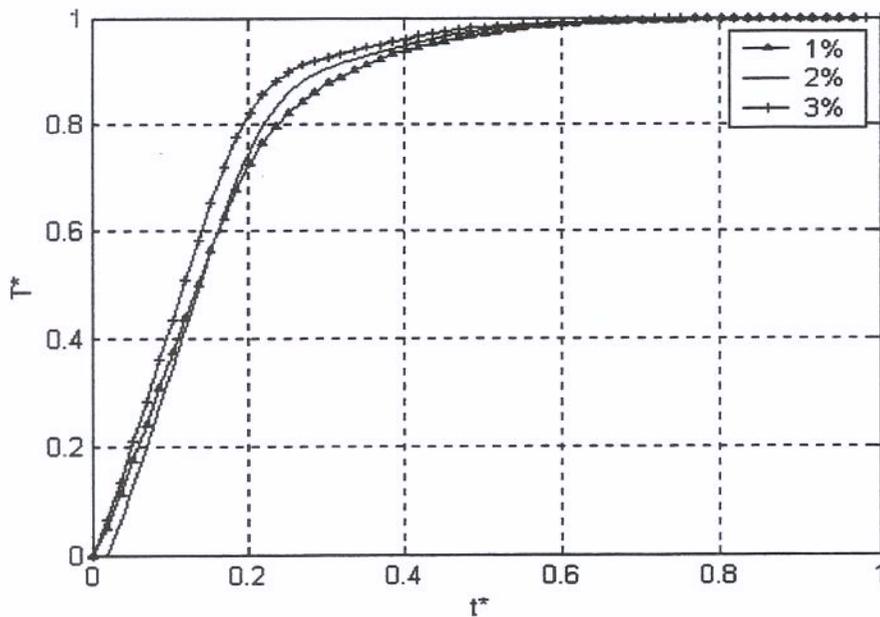


Figura 29 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas após perturbações na vazão do produto a diferentes concentrações para Pectina

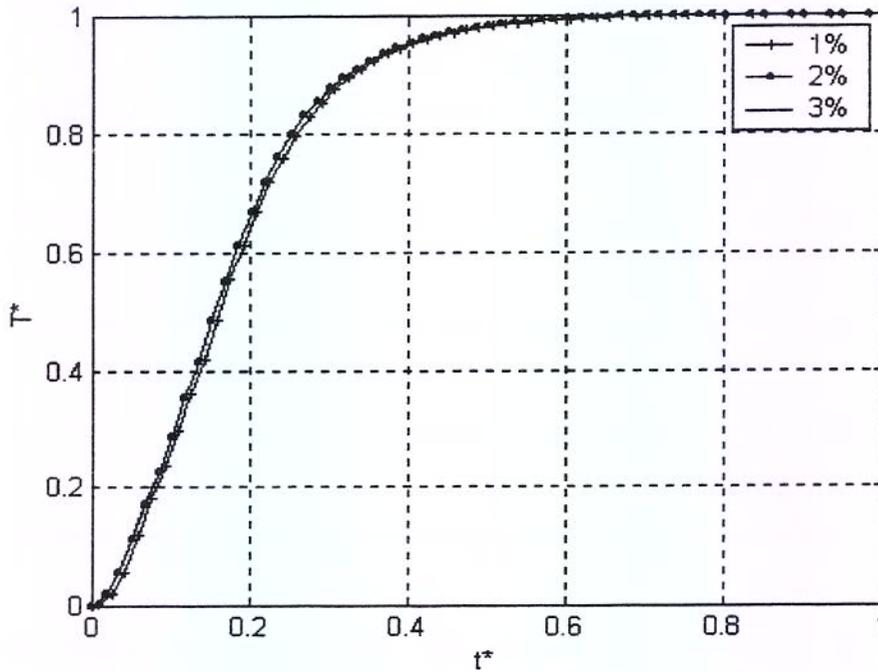


Figura 30 - Curvas de reação da temperatura de saída do produto adimensionalizadas após perturbações na vazão do produto a diferentes concentrações para *k*-Carragena

A característica dinâmica das respostas do processo obtidas nas Figuras 28, 29 e 30, geradas a partir de perturbações idênticas na vazão do produto, mostram uma dependência das condições específicas de operação, ou seja, das concentrações e, conseqüentemente, dos parâmetros reológicos. Apesar das curvas de respostas serem próximas, o sistema ainda pode ser caracterizado como não linear.

Portanto, pode-se concluir para o sistema avaliado que todos os produtos apresentaram comportamentos característicos de um sistema não linear em relação à concentração e às perturbações nas vazões do produto.

Estas não linearidades do sistema são incorporadas na função de transferência através da variação dos parâmetros, para a obtenção de modelos empíricos, com o auxílio da metodologia de planejamento de ensaios.

### 5.8 Comparação das Curvas de Reação entre Produtos

A Figura 31 apresenta as curvas de reação em tempo e temperatura diferenciais, obtidas após perturbação na vazão dos produtos goma-Xantana, k-Carragena e Pectina a 2%, onde é facilmente visualizada a diferença do comportamento dinâmica entre os produtos.

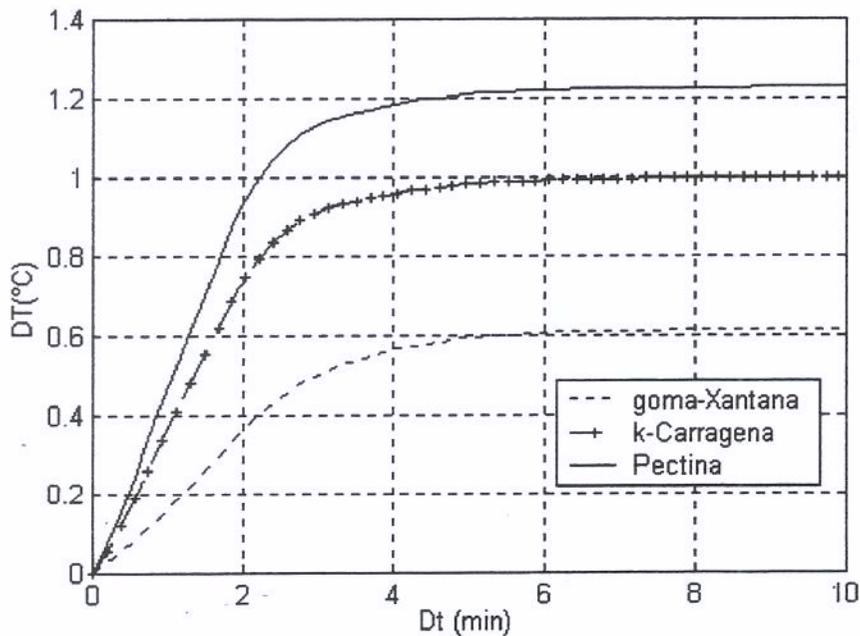


Figura 31 – Curvas de reação das temperaturas de saída dos três produtos obtidas após perturbação na vazão do produto de  $-11,375\%$ .

Essas diferenças são identificadas quantitativamente nos itens a seguir, através da identificação do sistema e da obtenção das funções de transferências respectivas para cada fluido.

### 5.9 Ajuste de Modelos para Identificação do Sistema

Para as curvas de reação da temperatura de saída do produto, obtidas para perturbações individuais, como explicado na Figura 32, foram testados diferentes ajustes de equações, dos tipos equação de primeira ordem, primeira ordem com tempo morto<sup>3</sup> e equações de segunda ordem. Para os ajustes de equações de segunda ordem foi avaliado o melhor ajuste, variando-se o fator de amortecimento entre:  $\zeta = 1$ ,  $\zeta > 1$  e  $\zeta < 1$ , descritos no item 3.5. Os ajustes realizados com solução de k-Carragena, encontram-se no *Anexo III*.

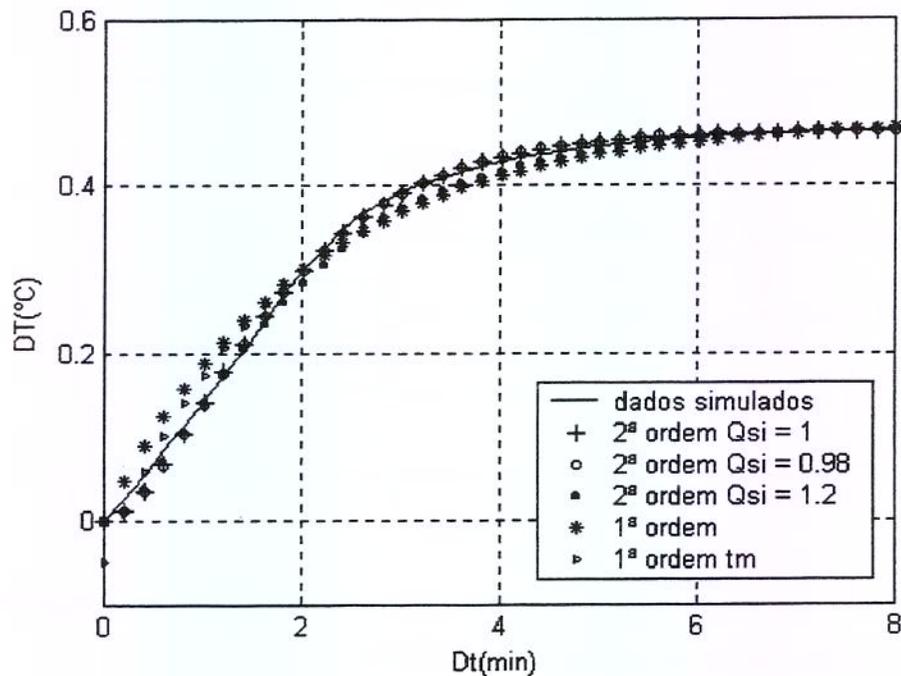


Figura 32 – Exemplo de ajustes das curvas de reação da temperatura de saída do produto sob perturbação degrau das variáveis propostas em cada ensaio à diversos modelos matemáticos<sup>4</sup>

Sendo:  $DT (°C) = T - T_{1^{o}tp}$  e  $Dt(\text{min}) = t - t_{1^{o}tp}$ ;

As curvas de reação da temperatura do produto, obtidas por simulação do processo, apresentaram formato em ‘S’, semelhantes ao da Figura 33.

<sup>3</sup> tempo morto = tm

<sup>4</sup>  $Q_{si} = \zeta$

Uma vez que todas as curvas de reação do processo sob perturbações individuais foram melhor ajustadas para um modelo de 2ª ordem com o valor do fator de amortecimento igual a um ( $\zeta=1$ ), em cada ensaio, então se considerou este tipo de comportamento como representativo do processo.

A partir do modelo de 2ª ordem com  $\zeta$  igual a um (Equação 26), os parâmetros  $\tau$  e  $K_p$  são identificados através de um ajuste de dados não linear pelo método de Newton-Gauss, utilizando-se de ferramentas disponíveis no Software Matlab.

Pelo método da curva de reação para determinação de parâmetros gráficos para sintonia de controladores, descritos no item 3.6, obteve-se os parâmetros  $T_D$ ,  $K_p$  e  $Z$ , exemplificado na Figura 33. Exemplos de figuras obtidas para solução de goma-Xantana, encontram-se no *Anexo IV*.

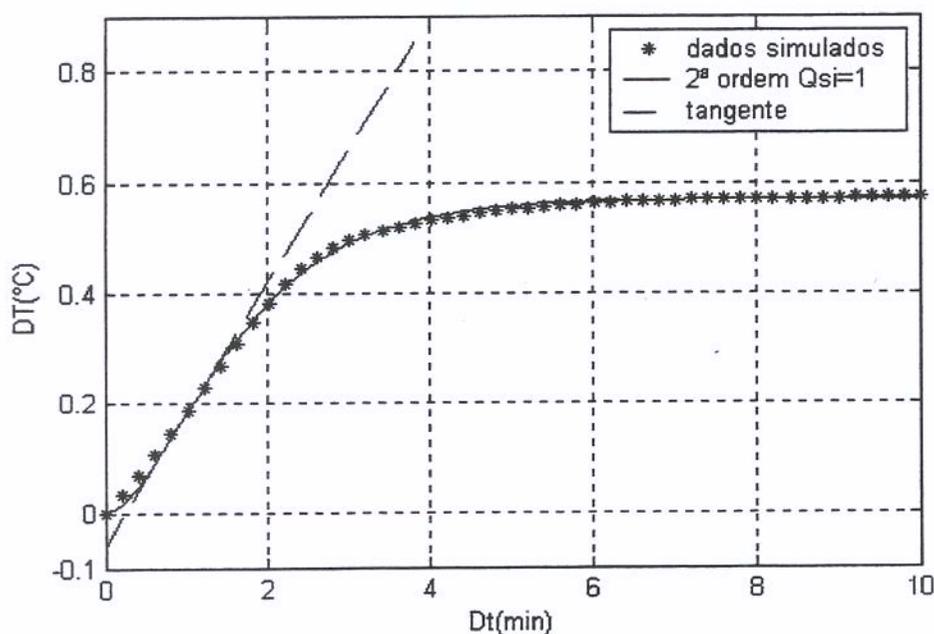


Figura 33 – Exemplo do método da curva de reação do processo para obtenção dos parâmetros gráficos ( $T_D$ ,  $K_p$  e  $Z$ ) para cálculo dos parâmetros de sintonia de controladores.

Sendo assim, os valores dos parâmetros  $\tau$ ,  $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ , obtidos a partir das descrições anteriores, estão apresentados nos ensaios que compõem os Planejamentos Fatoriais Compostos Centrais, realizados para cada produto, apresentados a seguir.

### 5.10 *Planejamento Fatorial Composto Central (PFCC)*

Uma vez que o processo em estudo se caracterizou com um comportamento não linear entre as alterações variáveis analisadas, porém, foi adequadamente ajustado por um modelo de segunda ordem linear com o valor do fator de amortecimento igual a um, então, propôs-se à aplicação da Metodologia de Planejamento de Ensaios, a fim de determinar a não linearidade dos parâmetros deste modelo.

Os comportamentos dos parâmetros  $\tau$ ,  $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$  são avaliados através de planejamentos de ensaios, onde são gerados modelos empíricos destes parâmetros em função das concentrações e perturbações da vazão do produto. Os modelos são avaliados e validados estatisticamente.

A partir do PFCC proposto, com os respectivos níveis das variáveis independentes, mostrados na Tabela 9, cada curva de reação do processo foi ajustada pelo modelo de comportamento do processo de 2ª ordem e  $\zeta=1$ . Nas tabelas seguintes de resultados, são mostrados os coeficientes de correlação de cada ajuste.

Nota-se que o ganho do sistema, parâmetro  $K_p$ , é obtido pela razão entre o valor de  $k$  (parâmetro de ajuste do modelo de 2ª ordem) e o valor da amplitude da perturbação imposta à variável independente, conforme equação 32.

Códigos foram designados para os diferentes níveis de cada variável escolhida, conforme Tabela 9.

Por tratar-se de dados obtidos por simulação, os efeitos são calculados apenas para o erro residual, que está relacionado aos erros devido à falta de ajuste do modelo, e apenas um ensaio é realizado no ponto central.

Assim, os PFCC propostos são avaliados para duas variáveis independentes (concentração do produto X (%) e perturbação na vazão do produto  $\Delta V_p$  (%)) para cada um dos produtos (goma-Xantana, k-Carragena e Pectina).

## 5.10.1 PFCC para a Goma-Xantana

O planejamento de ensaios proposto para goma-Xantana, com os respectivos níveis e com os resultados das variáveis dependentes e com os coeficientes de correlação dos ajustes das curvas de reação pelo modelo de 2ª ordem com  $\zeta=1$ , está mostrado na Tabela 23.

Tabela 23 – Resultados do PFCC para goma Xantana

Ensaio	Variáveis Independentes		Valores das Variáveis Dependentes					Ajuste
	X(%)	$\Delta V_p(\%)$	$k$	$K_p$	$\tau$	$T_D$	Z	$R^2$
1	+1	+1	0,841	-11,217	1,050	0,295	2,897	0,9992
2	-1	+1	1,047	-13,968	1,200	0,322	3,145	0,9995
3	+1	-1	0,310	-12,436	0,355	0,090	0,900	0,9993
4	-1	-1	0,381	-15,272	0,384	0,108	1,099	0,9994
5	$+\alpha$	0	0,286	-11,440	0,929	0,260	2,500	0,9989
6	$-\alpha$	0	0,396	-15,856	1,116	0,313	3,045	0,9996
7	0	$+\alpha$	1,147	-12,017	1,545	0,434	4,200	0,9992
8	0	$-\alpha$	0,616	-12,848	0,322	0,080	0,811	0,9992
9	0	0	0,303	-11,500	0,380	0,092	0,980	0,9991

Pode-se observar que os valores dos coeficientes de correlação apresentam valores de aproximadamente 0,99, demonstrando que os dados obtidos ajustam-se adequadamente ao modelo de segunda ordem com  $\zeta$  igual a um.

Os quatro primeiros ensaios correspondem ao modelo linear ( $2^2$ ), seguido por quatro ensaios que contemplam o modelo quadrático e um ensaio no ponto central.

A partir dos resultados dos parâmetros ajustados para cada ensaio, utilizou-se o “Software – Estatística 5.0” para obter os efeitos das variáveis, os coeficientes de regressão do modelo quadrático, a análise de variância do modelo e as superfícies de resposta.

#### 5.10.1.1 Dependência Multivariável do Parâmetro $K_p$ para goma-Xantana

As Tabelas 24 e 25 mostram os efeitos das variáveis independentes e a interação entre elas no comportamento da variável resposta  $K_p$ .

Tabela 24 - Estimativa dos Efeitos sobre  $K_p$ , considerando-se todos os termos

$R^2 = 0,98725$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média.	-11,499	0,151	-76,121	0,000
X (L)	2,962	0,185	15,986	0,000
X (Q)	-2,249	0,221	-10,172	0,000
$\Delta V_p$ (L)	0,926	0,185	5,000	0,004
$\Delta V_p$ (Q)	-1,026	0,221	-4,641	0,006
<b>X.<math>\Delta V_p</math></b>	<b>-0,043</b>	<b>0,262</b>	<b>-0,163</b>	<b>0,877</b>

Através de análise dos testes t e p observa-se que os efeitos apresentados em negrito são estatisticamente não significativos, ou seja, valores de p maiores que 0,05 relacionados a baixos valores de t, atestam a não significância do termo de interação entre as variáveis independentes, portanto o termo (**X. $\Delta V_p$** ) é estatisticamente não significativo podendo ser desprezado.

Tabela 25 - Estimativa dos Efeitos sobre  $K_p$  desconsiderando o termo ( $\Delta V_p \cdot X$ )

Estimativa dos Efeitos; $R^2 = 0,98718$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média.	-11,499	0,138	-83,166	0,000
X (L)	2,962	0,170	17,465	0,000
X (Q)	-2,249	0,202	-11,113	0,000
$\Delta V_p$ (L)	0,926	0,170	5,462	0,002
$\Delta V_p$ (Q)	-1,026	0,202	-5,070	0,002

Observa-se que o modelo ajustado, desconsiderando-se o termo de interação entre as duas variáveis, apresenta significância na resposta no nível de confiança de 95%.

Um valor do coeficiente de correlação ( $R^2 = 0,98718$ ) significa que 98,718% da variação das respostas são explicadas pelo modelo. O coeficiente  $R^2$  indica o nível de correlação entre os valores preditos pelo modelo e os observados nos ensaios.

Observa-se pela Figura 34 que a reta tem um bom ajuste aos valores ensaiados, o que mostra que os valores preditos estão próximos aos obtidos nos ensaios através de simulação.

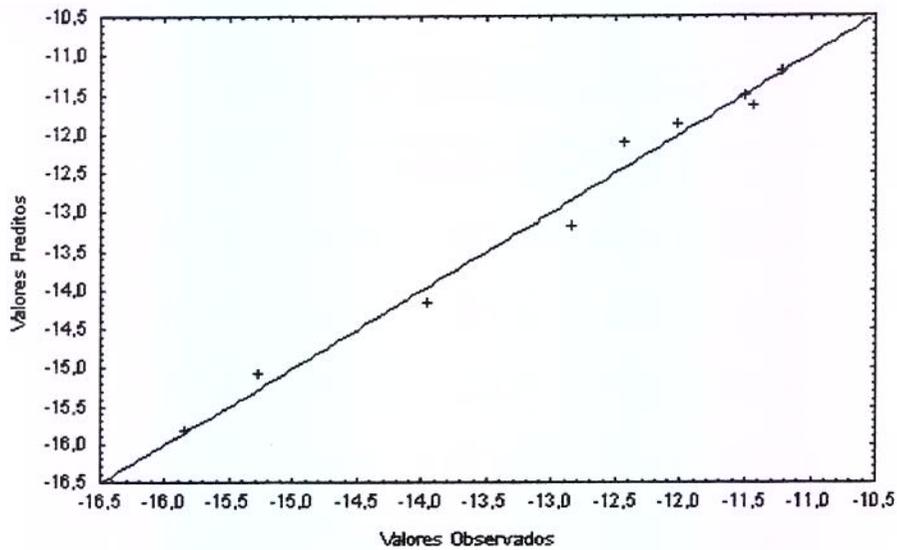


Figura 34 – Valores Preditos versus Observados do parâmetro  $K_p$  para goma-Xantana

De modo a verificar se o modelo explica uma quantidade significativa da variação nos dados ensaiados, pode-se utilizar o teste F de significância. Para isto, compara-se o valor de F estimado a partir dos dados ensaiados com o valor tabelado de uma distribuição de frequência de referência  $F_{(p-1, n-1)}$ , onde o valor calculado é expresso segundo a equação abaixo:

$$F_{\text{calculado}} = \frac{MQ_R}{MQ_r}; \quad (39)$$

onde:

$MQ_R$  = Média Quadrática da Regressão;

$MQ_r$  = Média Quadrática do Resíduo.

A Tabela 26 mostra os fatores ANOVA para a avaliação do parâmetro  $K_p$  para a goma-Xantana.

Tabela 26 - Tabela Anova<sup>5</sup> do parâmetro  $K_p$  para goma-Xantana

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	26,502	$p - 1 = 4,000$	6,625	115,511
Resíduos	0,344	$n - p = 6,000$	0,057	
Falta de Ajuste	0,344	$m - p = 6,000$	0,057	
Erro puro	0,000	$n - m = 0,000$	0,000	
Total	26,846	$n - 1 = 10,000$	2,685	
F tabelado (95%)	4,530			
<b>F<sub>calc</sub>/F<sub>tab</sub></b>	<b>25,499</b>			

onde:

$p$  = número de parâmetros do modelo;

$n$  = número total de ensaios;

$m$  = número de ensaios distintos.

Como o valor calculado de  $F$  foi aproximadamente 25 vezes maior que o valor tabelado, pode-se afirmar que a variação descrita pelo modelo é significativamente maior que a variação não explicada, atestando assim a validade do modelo obtido.

O modelo final obtido pela regressão que relaciona concentração da goma-Xantana ( $X$ ) e perturbação da vazão do produto ( $\Delta Vp$ ), é uma equação polinomial de 2<sup>a</sup> ordem, preditiva e significativa, descrita matematicamente como:

$$K_p = -11,499 + 1,481.X - 1,1278.X^2 + 0,4632.(\Delta Vp) - 0,348.(\Delta Vp)^2 \quad (40)$$

onde as variáveis independentes estão codificadas para os níveis, inferior (-1) e superior (+1).

<sup>5</sup> Análise de Variância

Assim sendo o modelo quadrático válido, é possível gerar as superfícies de resposta e as curvas de contorno, representadas pelas Figuras 35 e 36 para o parâmetro  $K_p$  em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto. Através destas figuras verifica-se claramente a influência destas variáveis no comportamento de  $K_p$ .

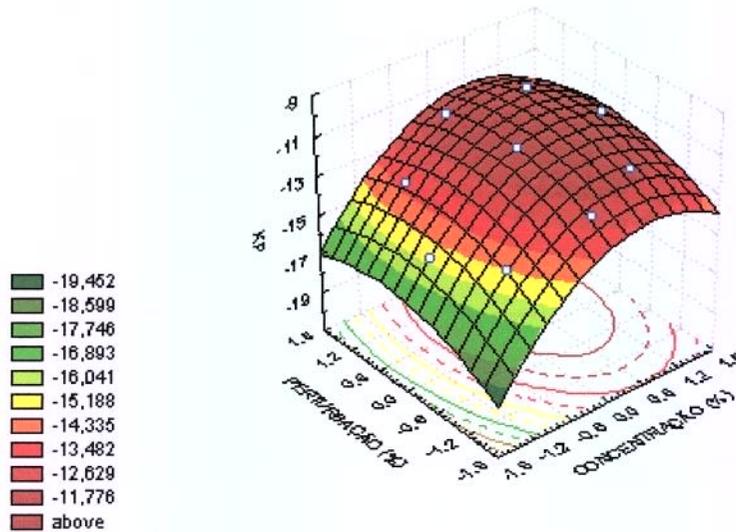


Figura 35 – Superfície de Resposta de  $K_p$  em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto.

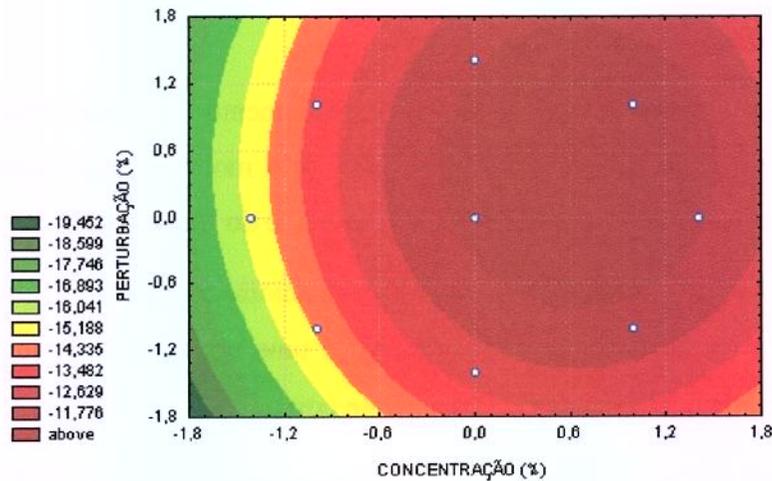


Figura 36 – Curvas de Contorno para  $K_p$  em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto.

5.10.1.2 Dependência Multivariável do Parâmetro  $\tau$  para goma-Xantana

Na Tabela 27 são apresentados os efeitos individuais e os efeitos de interação entre as variáveis independentes sobre o parâmetro  $\tau$ .

Tabela 27 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro  $\tau$ , considerando todos os termos

$R^2 = 0,94098$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,381	0,088	4,325	0,008
X(L)	-0,111	0,108	-1,027	0,352
X(Q)	0,528	0,129	4,093	0,009
$\Delta V_p$ (L)	0,812	0,108	7,513	0,001
$\Delta V_p$ (Q)	0,438	0,129	3,397	0,019
X . $\Delta V_p$	-0,060	0,153	-0,395	0,709

O termo linear da variável concentração e o termo de interação entre as duas variáveis independentes, não influenciam de forma estatisticamente significativa a variável resposta estudada.

Encontram-se, na Tabela 28, os coeficientes de regressão para o modelo quadrático que leva em consideração todos os termos considerados significativos. É importante salientar que os parâmetros obtidos são para o modelo codificado.

Tabela 28 – Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro  $\tau$ , desconsiderando-se os termos não significativos

$R^2 = 0,9267$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,381	0,083	4,592	0,003
X(Q)	0,528	0,121	4,345	0,003
$\Delta V_p$ (L)	0,812	0,102	7,977	0,000
$\Delta V_p$ (Q)	0,438	0,121	3,607	0,009

Observa-se pela Figura 37 que a reta tem um bom ajuste aos valores ensaiados, o que mostra que os valores preditos estão próximos aos ensaiados.

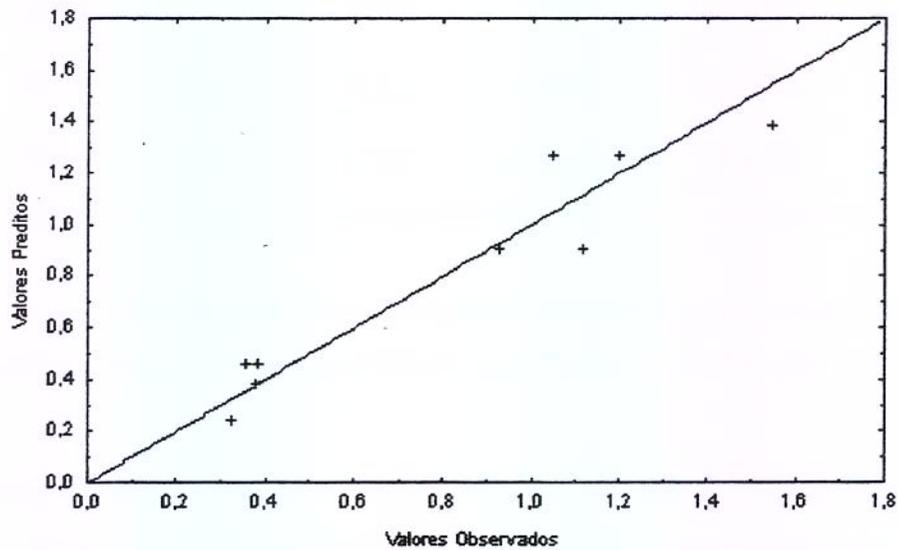


Figura 37 – Valores Preditos versus Observados do parâmetro  $\tau$ , para goma-Xantana

O exame dos resíduos é fundamental na avaliação da qualidade do ajuste de qualquer modelo. Um modelo que deixe resíduos consideráveis é obviamente um modelo ruim.

A Tabela 29 mostra, através do teste F, a avaliação do desempenho do modelo.

Tabela 29 - Tabela Anova para o parâmetro  $\tau$  para goma-Xantana

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	F <sub>calculado</sub>
Regressão	1,827	3,000	0,609	29,498
Resíduos	0,144	7,000	0,021	
Falta de Ajuste	0,144	5,000	0,029	
Erro puro	0,000	2,000	0,000	
Total	1,971	10,000	0,197	
F <sub>tabelado</sub>	4,350			
F <sub>calc</sub> /F <sub>tab</sub>	6,781			

Como o valor de  $F_{\text{calculado}}$  foi 6,781 vezes superior ao  $F_{\text{tabelado}}$ , atestando a validade do modelo.

O modelo final obtido pela regressão que relaciona concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto, é uma equação polinomial de 2ª ordem descrita matematicamente como:

$$\tau = 0,381 + 0,264.X^2 + 0,406.\Delta Vp + 0,219.\Delta Vp^2 \quad (41)$$

A superfície de resposta e as curvas de contorno estão representadas pela Figura 38 e Figura 39 respectivamente.

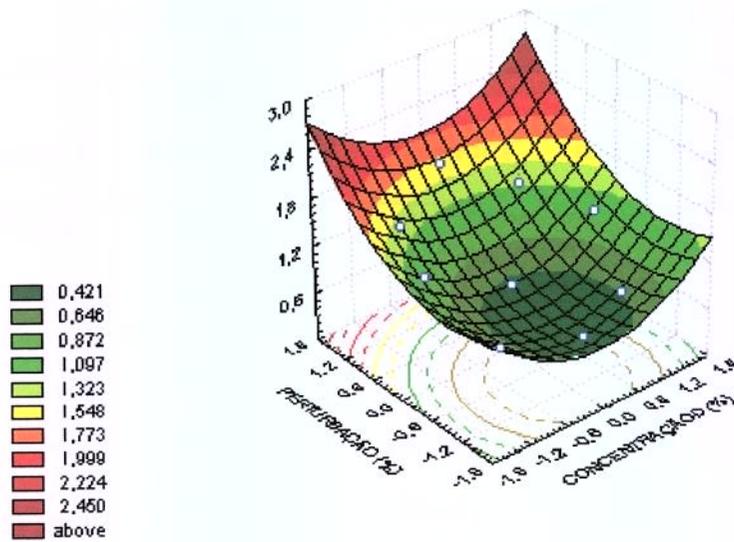


Figura 38 - Superfície de resposta do Parâmetro  $\tau$  em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto

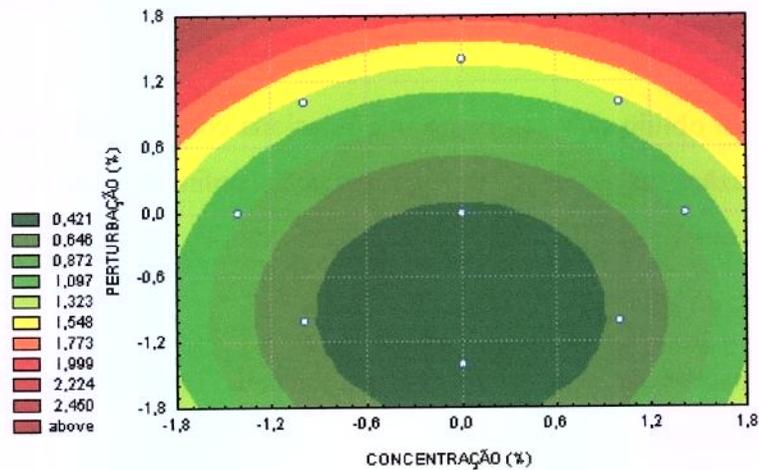


Figura 39 – Curvas de Contorno para  $\tau$  em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto

Após o estudo do comportamento do sistema e da caracterização do mesmo pela Equação 41, foi realizado outro estudo, utilizando a metodologia de planejamento de experimentos, para as variáveis obtidas através do método da curva de reação (TD e Z).

Estas variáveis podem ser utilizadas para sintonia de controladores convencionais adaptativos, citadas no item 3.4.

### 5.10.1.3 Dependência Multivariável do Parâmetro $T_D$ para goma-Xantana

Tabela 30 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro  $T_D$

$R^2 = 0,93676$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,092	0,026	3,500	0,017
X (L)	-0,030	0,032	-0,930	0,395
X(Q)	0,161	0,039	4,164	0,009
$\Delta V_p$ (L)	0,230	0,032	7,118	0,001
$\Delta V_p$ (Q)	0,131	0,039	3,391	0,019
X. $\Delta V_p$	-0,005	0,046	-0,103	0,922

Os efeitos X (L) e (X. $\Delta V_p$ ) são estatisticamente não significativos, ou seja, não há influência dos termos linear X(L) e do termo de interação entre as variáveis nas respostas.

A Tabela 31 apresenta os efeitos apenas para os termos significativos.

Tabela 31 – Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro  $T_D$ , desconsiderando-se os termos não significativos

$R^2 = 0,92569$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,092	0,024	3,820	0,007
X (Q)	0,161	0,035	4,545	0,003
$\Delta V_p$ (L)	0,230	0,030	7,769	0,000
$\Delta V_p$ (Q)	0,131	0,035	3,702	0,008

Tabela 32 – Tabela Anova para o parâmetro  $T_D$  para a goma-Xantana

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	0,153	3,000	0,051	29,065
Resíduos	0,012	7,000	0,002	
Falta de Ajuste	0,012	4,000	0,003	
Erro puro	0,000	3,000	0,000	
Total	0,165	10,000	0,016	
$F_{\text{tabelado}}$	4,350			
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	6,682			

Pode-se afirmar que através do valor da razão  $(F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}) = 6,68$  que a variação descrita pelo modelo é significativamente maior que a não descrita, validando o modelo obtido para o parâmetro  $T_D$  para a goma-Xantana.

## 5.10.1.4 Dependência Multivariável do Parâmetro Z para goma-Xantana

A Tabela 33 apresenta os efeitos individuais e de interação entre as variáveis. Os termos em negrito são estatisticamente não significativos e posteriormente desprezados na Tabela 34 para a avaliação do modelo.

Tabela 33 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro Z para a goma-Xantana

$R^2 = 0,94098$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,983	0,244	4,019	0,010
<b>X(L)</b>	-0,305	0,300	-1,017	0,356
X(Q)	1,479	0,358	4,134	0,009
$\Delta V_p$ (L)	2,212	0,300	7,376	0,001
$\Delta V_p$ (Q)	1,211	0,358	3,384	0,020
<b>X.<math>\Delta V_p</math></b>	-0,025	0,423	-0,058	0,956

Tabela 34 – Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro Z desconsiderando-se os termos não significativos

$R^2 = 0,9267$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,983	0,227	4,327	0,003
X(Q)	1,479	0,332	4,452	0,003
$\Delta V_p$ (L)	2,212	0,278	7,942	0,000
$\Delta V_p$ (Q)	1,211	0,332	3,644	0,008

O valor de  $R^2$  é igual a 0,9267 observado na Tabela 34, o significa que a maior parte das variações das respostas é explicada pelo modelo.

*Tabela 35 – Tabela Anova do parâmetro Z para a goma-Xantana*

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	13,752	3,000	4,584	29,640
Resíduos	1,083	7,000	0,155	
Falta de Ajuste	1,083	4,000	0,271	
Erro puro	0,000	3,000	0,000	
Total	14,835	10,000	1,483	
$F_{\text{tabelado}}$	4,350			
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	<b>6,814</b>			

O valor de  $F_{\text{calculado}}$  deve ser aproximadamente quatro vezes maior que  $F_{\text{tabelado}}$ . O valor da razão  $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$  é superiores a seis e pode-se considerar o modelo perfeitamente adequado.

Os valores preditos versus os valores ensaiados apresentam-se próximos e podem ser observados para TD e Z, através da Figura 40.

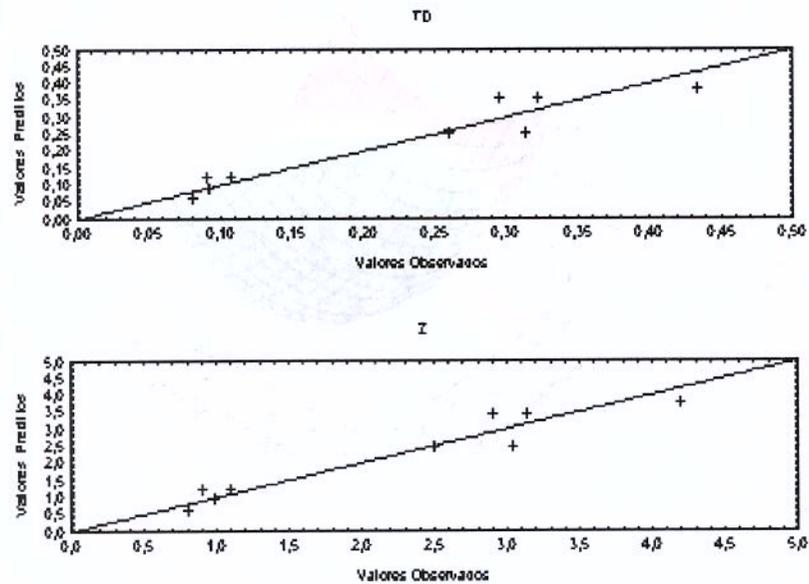


Figura 40 – Valores Preditos versus Observados Dos Parâmetros  $T_D$  e  $Z$  para a goma-Xantana

Os modelos codificados dos parâmetros  $T_D$  e  $Z$  para goma-Xantana, são funções polinomiais de segunda ordem representados pelas equações (42) e (43):

$$T_D = 0,0923 + 0,0803.X^2 + 0,115.\Delta Vp + 0,0654.\Delta Vp^2 \quad (42)$$

$$Z = 0,982 + 0,739.X^2 + 1,106.\Delta Vp + 0,605.\Delta Vp^2 \quad (43)$$

Assim sendo o modelo quadrático válido, é possível gerar as superfícies de resposta e as curvas de contorno para os parâmetros  $T_D$  e  $Z$  em função da concentração e perturbação. Através das Figuras 41 a 44, verifica-se claramente a influência destas variáveis no comportamento de  $T_D$  e  $Z$ .

As superfícies de resposta permitem uma visualização global do comportamento dos parâmetros  $T_D$  e  $Z$  dentro das faixas de perturbações e concentrações aplicadas.

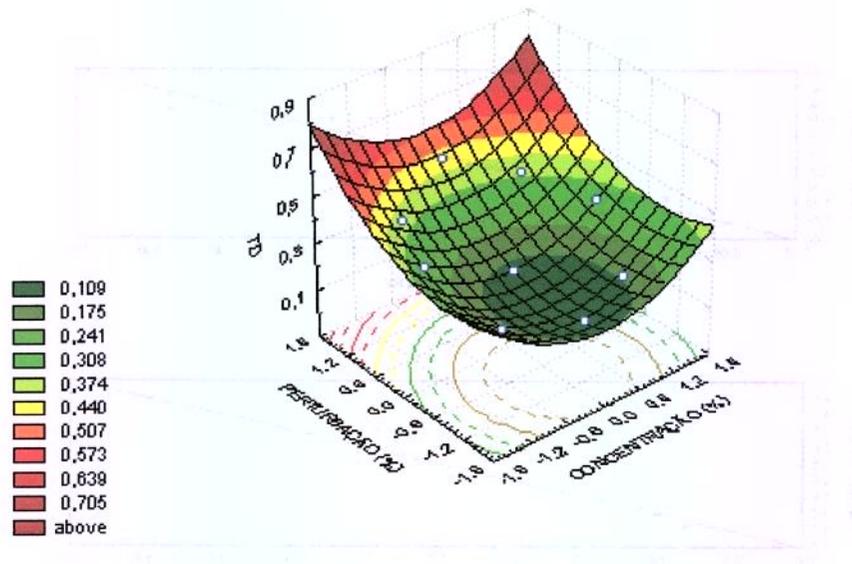


Figura 41 – Superfície de resposta do Parâmetro  $T_D$  em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto

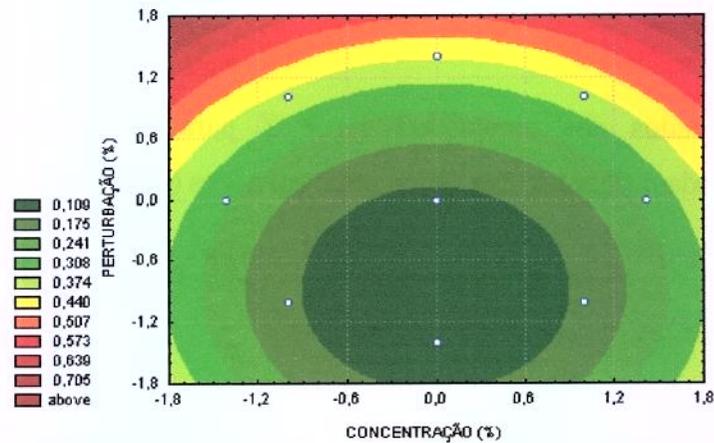


Figura 42 – Curvas de Contorno  $T_D$  em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto

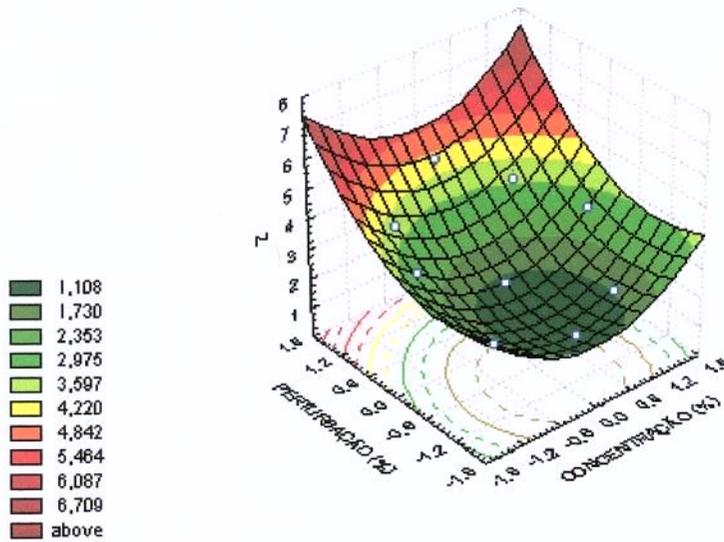


Figura 43 - Superfície de resposta do Parâmetro Z em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto

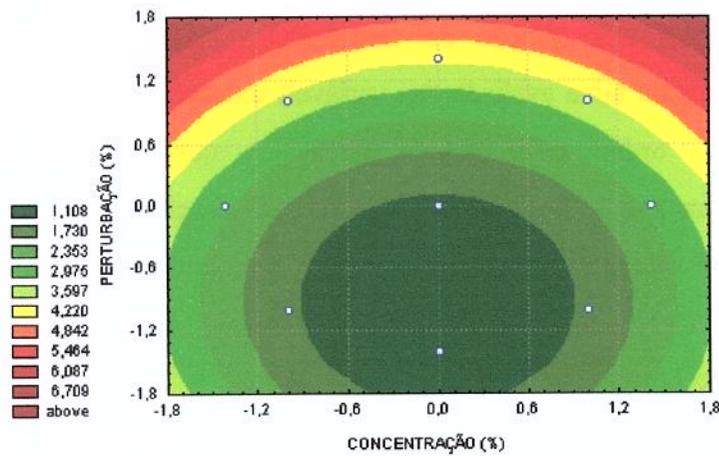


Figura 44 - Curvas de Contorno Z em função da concentração da goma-Xantana e perturbação na vazão do produto

## 5.10.1.5 Modelos Multivariáveis Reais e Globais para goma-Xantana

Os modelos matemáticos reais<sup>6</sup> dos parâmetros da função de transferência de segunda ordem com  $\zeta=1$ , estão apresentados nas equações (44) e (45) e os parâmetros de sintonia de controladores convencionais adaptativos para goma-Xantana, estão mostrados nas equações (44), (46) e (47):

$$K_p = -29,35 + 15,16.X - 3,296.X^2 - 0,084.\Delta V_p + 0,0059.\Delta V_p^2 \quad (44)$$

$$\tau = 0,61 - 0,0094.X^2 + 0,029.\Delta V_p + 0,00034.\Delta V_p^2 \quad (45)$$

$$T_D = 0,16 - 0,0018.X^2 + 0,0082.\Delta V_p + 0,000094.\Delta V_p^2 \quad (46)$$

$$Z = 1,61 - 0,021.X^2 + 0,079.\Delta V_p + 0,00089.\Delta V_p^2 \quad (47)$$

A fim de obter uma função de transferência com parâmetros não lineares e multivariáveis, dentro da faixa avaliada das variáveis independentes, propôs-se globalizar o modelo de segunda ordem com  $\zeta=1$ , a partir dos ajustes dos parâmetros  $K_p$  e  $\tau$ , dependentes da concentração do produto ( $X$ ) e da perturbação da vazão do produto ( $\Delta V_p$ ) estudada. Assim, substituindo as Equações 44 e 45 na Equação 23, considerando-se o fator de amortecimento  $\zeta=1$ , encontra-se a seguinte função de transferência, no universo Laplaciano, que incorpora as não linearidades do sistema :

$$y(s) = \frac{(-29,35 + 15,16X - 3,29X^2 - 0,084\Delta V_p + 0,006\Delta V_p^2)I}{s\left((0,61 - 0,009X^2 + 0,03\Delta V_p + 0,00034\Delta V_p^2)^2 s^2 + 2((0,61 - 0,009X^2 + 0,03\Delta V_p + 0,00034\Delta V_p^2))s + 1\right)} \quad (48)$$

sendo  $X$  e  $\Delta V_p$  valores decodificados.

Através das Figuras 45 e 46, pode-se comparar as curvas de reação obtidas, por exemplo, para os ensaios 01 e 03 do PFCC para goma-Xantana, através da substituição das Equações 44 e 45, na função de transferência para sistemas de segunda ordem e  $\zeta=1$ , no

<sup>6</sup> Modelo Decodificado

domínio do tempo:  $y(t) = IKp \left( 1 - \left( 1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right)$ , com a curva de reação obtida através do simulador dinâmico.

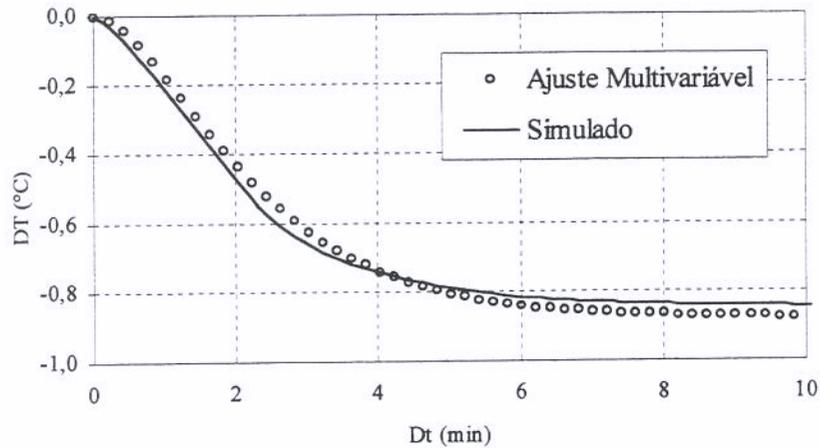


Figura 45 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X = 2,59$  e  $\Delta Vp = +18,75\%$ ) do PFCC para goma-Xantana, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis

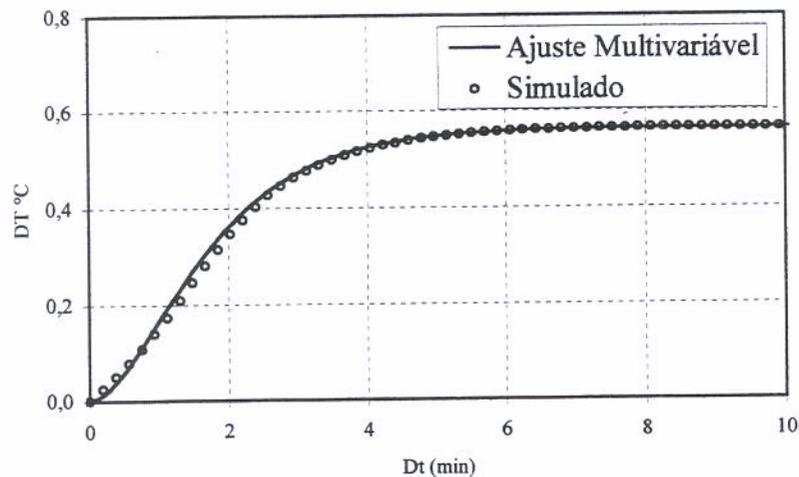


Figura 46 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X = 2,59$  e  $\Delta Vp = -11,375\%$ ) do PFCC para goma-Xantana, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis

O modelo proposto pela Equação 48, obtido com o auxílio da metodologia de planejamento de experimentos, foi testado no domínio do tempo. Os ajustes apresentaram coeficiente de correlação de aproximadamente  $R^2 = 0,994$  e pode-se observar, pelas Figuras 45 e 46 que os dados ajustados apresentam boa concordância com os obtidos através da simulação dinâmica.

## 5.10.2 PFCC para a k-Carragena

5.10.2.1 Análise Multivariável do Parâmetro  $K_p$  para k-Carragena

Modelos empíricos e testes estatísticos foram realizados de maneira análoga ao desenvolvido para a goma-Xantana. Pode-se observar pela Tabela 36, os dados utilizados nessas avaliações.

Tabela 36 – Resultados do PFCC para k-Carragena

Ensaio	Variáveis Independentes		Valores das Variáveis Dependentes					Ajustes
	X (%)	$\Delta V_p$ (%)	k	$K_p$	$\tau$	$T_D$	Z	$R^2$
1	+1	+1	1,254	-16,713	0,925	0,260	2,500	0,9985
2	-1	+1	1,559	-20,785	0,900	0,250	2,400	0,9987
3	+1	-1	0,493	-19,716	0,330	0,092	0,910	0,9989
4	-1	-1	0,607	-24,268	0,287	0,082	0,800	0,9994
5	$+\alpha$	0	0,429	-17,144	0,915	0,260	2,507	0,9988
6	$-\alpha$	0	0,573	-22,920	0,820	0,220	2,200	0,9986
7	0	$+\alpha$	1,688	-17,674	1,310	0,366	3,600	0,9982
8	0	$-\alpha$	0,997	-21,001	0,320	0,075	0,750	0,9989
9	0	0	0,440	-17,013	0,370	0,091	1,020	0,9988

Tabela 37- Estimativa dos Efeitos do parâmetro  $K_p$  para  $k$ -Carragena, desconsiderando os termos estatisticamente não significativos

$R^2 = 0,98128$				
	Efeitos	Desvio Padrão	t	p
Média.	-16,997	0,275	-61,774	0,000
X (L)	4,205	0,338	12,458	0,000
X (Q)	-3,390	0,403	-8,417	0,000
$\Delta V_p(L)$	2,802	0,338	8,302	0,000
$\Delta V_p(Q)$	-2,691	0,403	-6,682	0,001

O termo de interação entre as duas variáveis estudadas ( $X \cdot \Delta V_p$ ) foi previamente desprezado por ser estatisticamente não significativo.

Há uma boa concordância entre os valores preditos e os observados (obtidos pela simulação dinâmica), observados através da Figura 47.

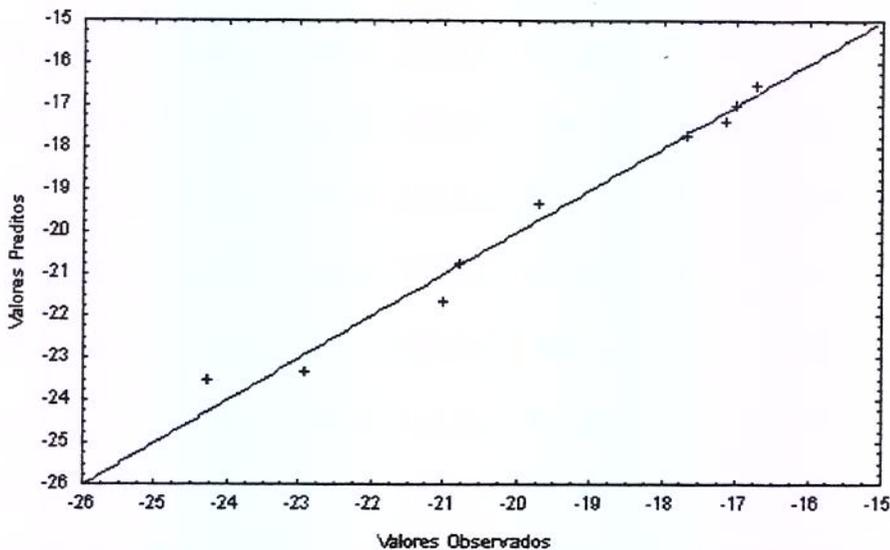


Figura 47 – Valores Preditos versus Observados para o parâmetro  $K_p$  para  $k$ -Carragena

A validade do modelo obtido pode ser atestada através do teste F, apresentado na Tabela 38, que afirma que a variação descrita pelo modelo é significativamente maior que a variação não explicada, já que a razão entre  $F_{\text{calculado}}$  e  $F_{\text{tabelado}}$ , observado em negrito, apresentou valor muito superior a quatro.

Tabela 38 – Tabela Anova para o Parâmetro  $K_p$  para  $k$ -Carragena

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	71,438	4,000	17,859	78,629
Resíduos	1,363	6,000	0,227	
Falta de Ajuste	1,363	6,000	0,227	
Erro puro	0,000	0,000	0,000	
Total	72,801	10,000	7,280	
$F_{\text{tabelado}}$	4,560			
<b><math>F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}</math></b>	<b>17,243</b>			

Após a realização de todos os testes e comprovação da validade estatística do modelo ajustado, é obtida a superfície de resposta e curvas de contorno para a  $k$ -Carragena, Figura 48 e Figura 49 respectivamente, onde se pode observar a influência das variáveis independentes, concentração e perturbação, nas respostas.

O modelo codificado do parâmetro  $K_p$  para  $k$ -Carragena, é uma função polinomial de segunda ordem representada pela equação (49):

$$K_p = -16,997 + 2,102.X - 1,695.X^2 + 1,401.\Delta V_p - 1,345.\Delta V_p^2 \quad (49)$$

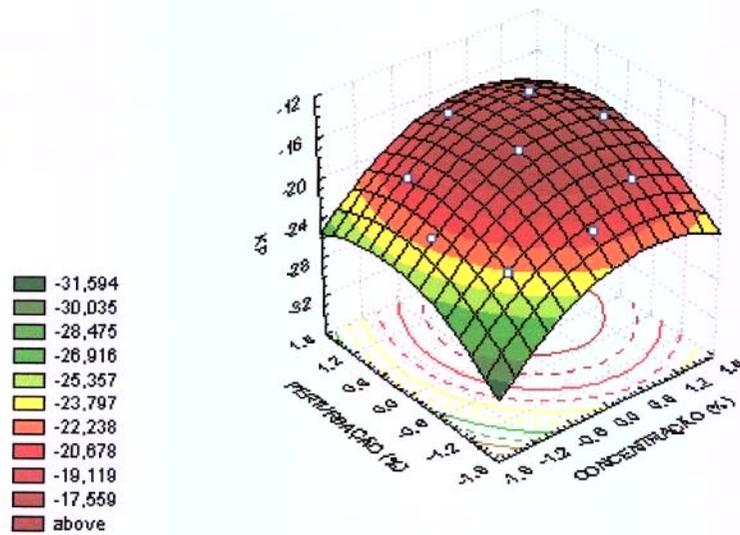


Figura 48 – Superfície de Resposta de  $K_p$  em função da concentração da  $k$ -Carragena e da perturbação na vazão do produto

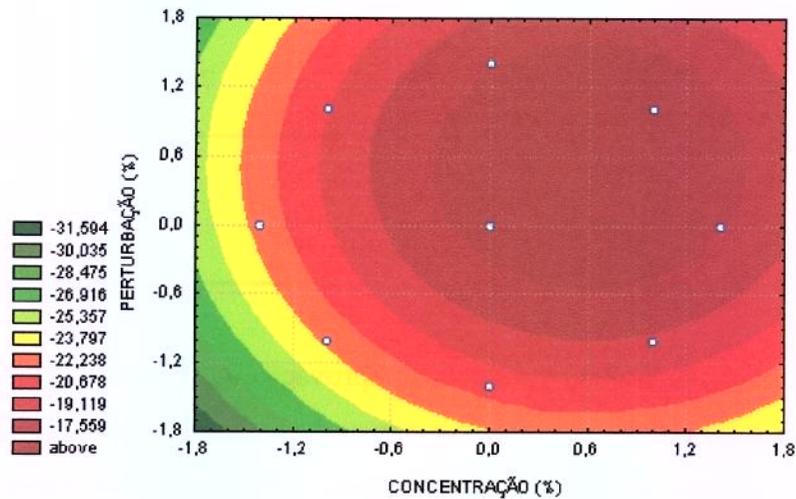


Figura 49 – Curvas de Contorno  $K_p$  em função da concentração da  $k$ -Carragena e da perturbação na vazão do produto

5.10.2.2 Análise Multivariável do Parâmetro  $\tau$  para k-Carragena

Os termos estatisticamente não significativos da Tabela 39 estão apresentados em negrito e, são eles, o termo linear da variável concentração X(L) e o termo de interação entre as duas variáveis (X. $\Delta$ Vp).

Tabela 39 - Estimativa dos Efeitos do Parâmetro  $\tau$ 

$R^2 = 0,90875$				
	Efeitos <sup>7</sup>	Desvio padrão	t	p
Média	0,371	0,087	4,260	0,008
<b>X(L)</b>	0,051	0,107	0,473	0,656
X(Q)	0,382	0,127	2,997	0,030
$\Delta$ Vp (L)	0,653	0,107	6,114	0,002
$\Delta$ Vp (Q)	0,329	0,127	2,584	0,049
<b>X.<math>\Delta</math>Vp</b>	-0,009	0,151	-0,060	0,954

As análises estatísticas subseqüentes, do parâmetro  $\tau$  para a k-Carragena, são realizadas a partir da Tabela 40, a qual desconsidera os termos estatisticamente não significativos.

<sup>7</sup> Valores significativos no nível de 95%

Tabela 40 – Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro  $\tau$  desconsiderando-se os termos não significativos

$R^2 = 0,9046$					
	Efeitos	Desvio padrão	t	p	
	Média	0,371	0,075	4,930	0,002
	X(Q)	0,382	0,110	3,469	0,010
	$\Delta V_p$ (L)	0,653	0,092	7,075	0,000
	$\Delta V_p$ (Q)	0,329	0,110	2,990	0,020

Observa-se pela Figura 50 que a reta tem um bom ajuste aos valores ensaiados, o que mostra que os valores preditos estão próximos aos valores ensaiados, obtidos através de simulação dinâmica.

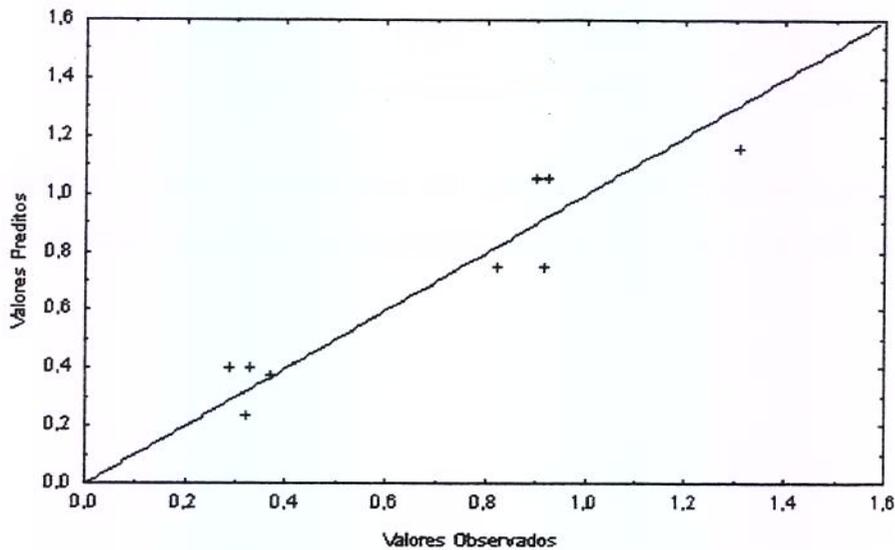


Figura 50 – Valores Preditos versus Observados do parâmetro  $\tau$  para *k*-Carragena

Tabela 41 - Tabela Anova do parâmetro  $\tau$  para k-Carragena

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	1,127	3,000	0,376	22,125
Resíduos	0,119	7,000	0,017	
Falta de Ajuste	0,119	7,000	0,017	
Erro puro	0,000	0,000	0,000	
Total	1,246	10,000	0,125	
$F_{\text{tabelado}}$	4,350			
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	<b>5,086</b>			

Através do teste F, observado em negrito na Tabela 41, pode-se afirmar que a variação descrita pelo modelo é significativamente maior que a variação não explicada, atestando a validade do modelo do parâmetro  $\tau$  para a k-Carragena.

O modelo final obtido pela regressão que relaciona concentração e perturbação é uma equação de 2ª ordem descrita matematicamente como:

$$\tau = 0,371 + 0,191.X^2 + 0,326.\Delta Vp + 0,165.\Delta Vp^2 \quad (50)$$

As Figuras 51 e 52 representam a superfície de resposta e curvas de contorno, respectivamente.

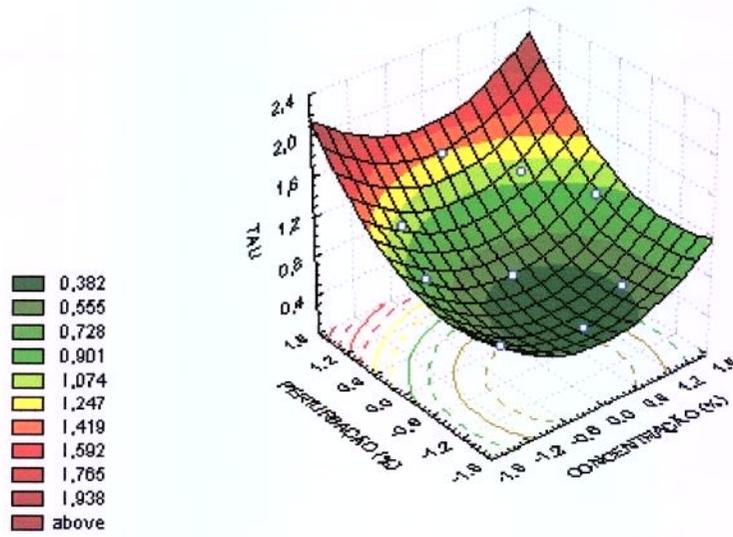


Figura 51 - Superfície de resposta do Parâmetro  $\tau$  em função da concentração da *k*-Carragena e da perturbação na vazão do produto

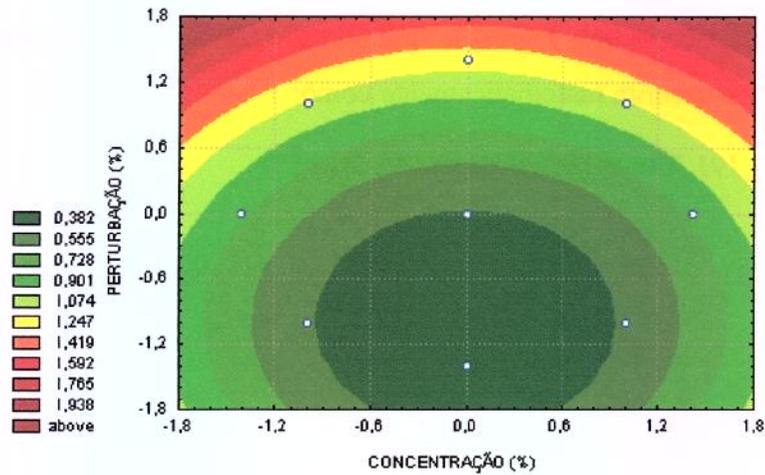


Figura 52 – Curvas de Contorno para  $\tau$  em função da concentração da *k*-Carragena e da perturbação na vazão do produto

5.10.2.3 Análise Multivariável do Parâmetro  $T_D$  para k-Carragena

A Tabela 42 mostra a influência das variáveis independentes na variável resposta  $T_D$ , quando se desconsidera os efeitos não significativos, ou seja, o termo linear da concentração  $X(L)$  e o termo de interação entre as duas variáveis ( $X.\Delta V_p$ ), para um intervalo de confiança de 95%.

Tabela 42 - Estimativa dos Efeitos Para o Parâmetro  $T_D$  para k-Carragena

$R^2 = 0,91652$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,090	0,020	4,405	0,003
X(Q)	0,120	0,030	4,017	0,005
$\Delta V_p$ (L)	0,187	0,025	7,448	0,000
$\Delta V_p$ (Q)	0,101	0,030	3,363	0,012

O teste F de significância é mostrado Tabela 43 e pode-se observar que a razão ( $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$ ) apresentou valor próximo a seis afirmando que a variação descrita pelo modelo é significativamente maior que a variação não explicada, atestando assim a validade do modelo obtido.

Tabela 43 – Tabela Anova do parâmetro  $T_D$  para k-Carragena

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	$F_{\text{calculado}}$
Regressão	0,097	3,000	0,032	25,618
Resíduos	0,009	7,000	0,001	
Falta de Ajuste	0,009	7,000	0,001	
Erro puro	0,000	0,000	0,000	
Total	0,106	10,000	0,011	
$F_{\text{tabelado}}$	4,350			
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	5,889			

## 5.10.2.4 Análise Multivariável do Parâmetro Z para k-Carragena

A Tabela 44 foi construída desconsiderando-se os efeitos não significativos, previamente determinados, sendo eles o termo linear da concentração X(L) e o termo de interação entre as duas variáveis (X. $\Delta$ Vp).

Tabela 44 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro Z

$R^2 = 0,9046$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,090	0,020	4,405	0,003
X(Q)	0,120	0,030	4,017	0,005
$\Delta$ Vp (L)	0,187	0,025	7,448	0,000
$\Delta$ Vp (Q)	0,101	0,030	3,363	0,012

Através da Tabela 45 são realizados a análise de variância e o teste F de significância do modelo, onde o valor é apresentado em negrito, atestando a representatividade do modelo ajustado.

Tabela 45 – Tabela Anova do parâmetro Z para k-Carragena

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	8,454	3,000	2,818	21,654
Resíduos	0,911	7,000	0,130	
Falta de Ajuste	0,911	7,000	0,130	
Erro puro	0,000	0,000	0,000	
Total	9,365	10,000	0,936	
F tabelado	4,350			
F <sub>calc</sub> /F <sub>tab</sub>	<b>4,978</b>			

Observa-se pela Figura 53 que a reta ajustou-se bem aos valores ensaiados, o que mostra que os valores preditos pelo modelo são próximos aos reais para as variáveis  $T_D$  e  $Z$ .

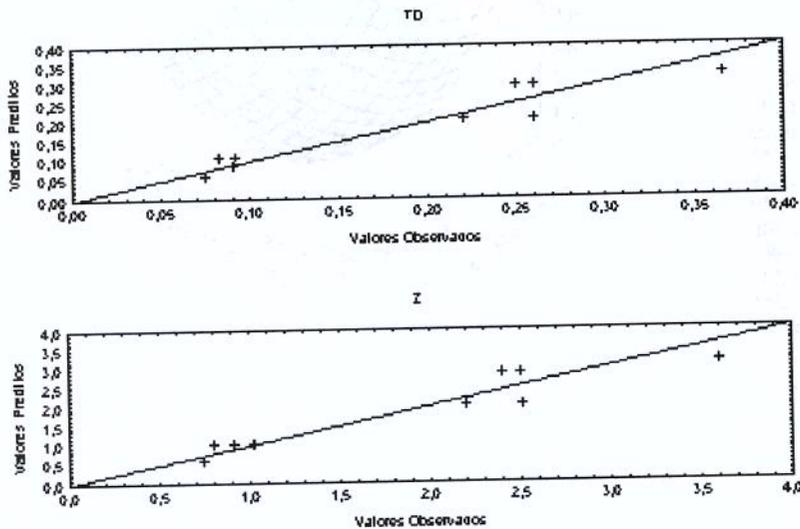


Figura 53 – Valores Preditos versus Observados Dos Parâmetros  $T_D$  e  $Z$  para  $k$ -Carragena

Assim sendo, o modelo quadrático é válido e é possível gerar as superfícies de resposta e as curvas de contorno para os parâmetros  $T_D$  e  $Z$  em função da concentração e perturbação. Através destas figuras verifica-se claramente a influência destas variáveis no comportamento de  $T_D$  e  $Z$ .

Os modelos matemáticos codificados para  $k$ -Carragena, estão apresentados nas equações (51) e (52):

$$T_D = 0,0902 + 0,0602.X^2 - 0,0936.(\Delta Vp) - 0,0504.(\Delta Vp)^2 \quad (51)$$

$$Z = 1,274 - 0,06015.X^2 - 0,0262.(\Delta Vp) - 0,0656.(\Delta Vp)^2 \quad (52)$$

As superfícies de respostas e as curvas de contorno para a  $k$ -Carragena são mostradas através das Figuras 54 a 57.

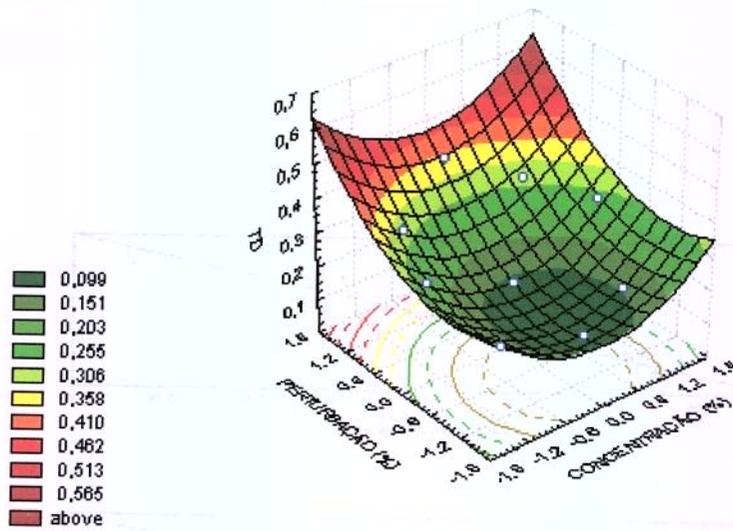


Figura 54 – Superfícies de resposta do parâmetro  $T_D$  em função da concentração da *k*-Carragena e da perturbação na vazão do produto

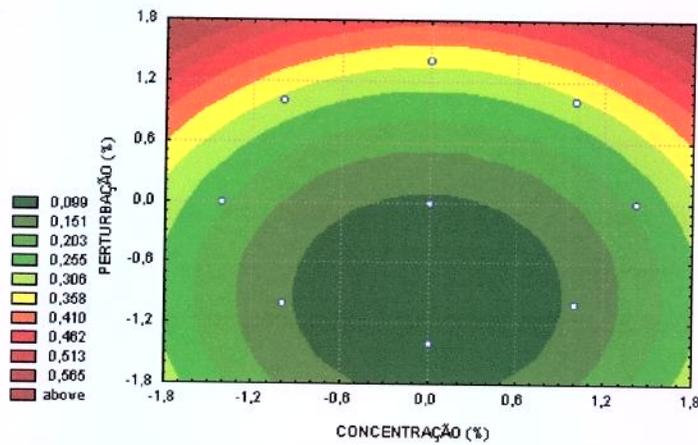


Figura 55 – Curvas de contorno do parâmetro  $T_D$  em função da concentração da *k*-Carragena e da perturbação na vazão do produto

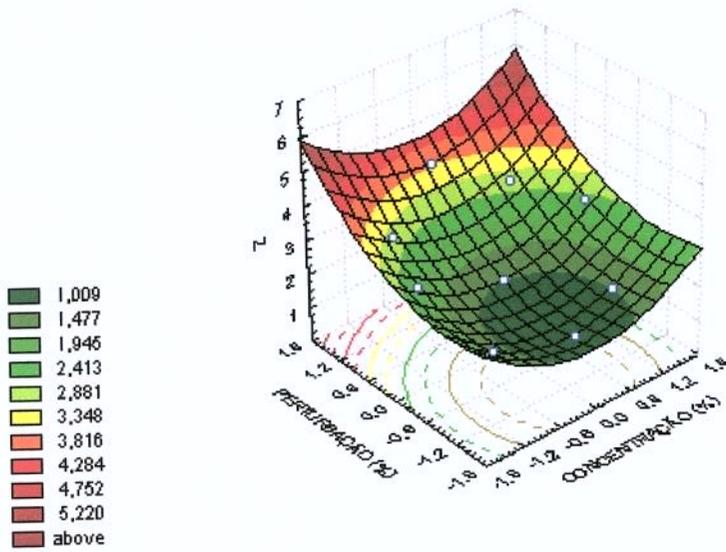


Figura 56 – Superfícies de resposta dos Parâmetros  $Z$  em função da concentração da  $k$ -Carragena e da perturbação na vazão do produto

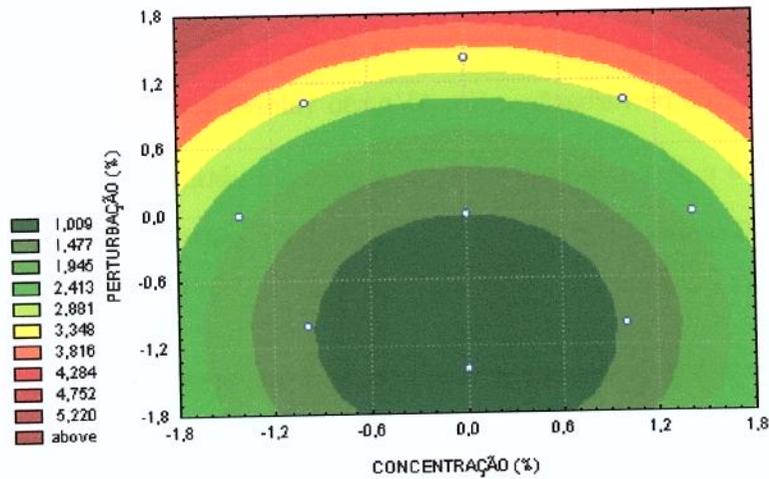


Figura 57 – Curvas de Contorno  $Z$  em função da concentração da  $k$ -Carragena e da perturbação na vazão do produto

## 5.10.2.5 Modelos Multivariáveis Reais e Globais para a k-Carragena

Os modelos reais dos parâmetros são apresentados nas equações (53) a (56):

$$Kp = -39,35 + 17,59.X - 3,68.X^2 + 0,0014.\Delta Vp + 0,0035.\Delta Vp^2 \quad (53)$$

$$\tau = 0,43 + 0,017.X^2 + 0,021.\Delta Vp + 0,00025.\Delta Vp^2 \quad (54)$$

$$T_D = 0,113 + 0,0062.X^2 + 0,0061.\Delta Vp + 0,000069.\Delta Vp^2 \quad (55)$$

$$Z = 1,13 + 0,059.X^2 + 0,060.\Delta Vp + 0,00054.\Delta Vp^2 \quad (56)$$

Substituindo as Equações 53 e 54 na Equação 23, considerando-se o fator de amortecimento  $\zeta=1$ , encontra-se a seguinte função de transferência do processo de aquecimento da k-Carragena:

$$y(s) = \frac{(-39,35 + 17,59X - 3,68X^2 + 0,0014\Delta Vp + 0,0035\Delta Vp^2)I}{s\left(\left(0,43 + 0,017X^2 + 0,021\Delta Vp + 0,00025\Delta Vp^2\right)^2 s^2 + 2\left(0,43 + 0,017X^2 + 0,021\Delta Vp + 0,00025\Delta Vp^2\right)s + 1\right)} \quad (57)$$

onde I é a amplitude da perturbação e X e  $\Delta Vp$  são valores decodificados.

As Figuras 58 e 59 comparam as curvas de reação obtidas para os ensaios 01 e 03 do PFCC para k-Carragena, através da substituição das Equação 53 e 54, na função de transferência, para sistemas de segunda ordem e  $\zeta=1$ , no domínio do tempo:

$$y(t) = IKp \left( 1 - \left( 1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \text{ com a curva de reação obtida através do simulador dinâmico.}$$

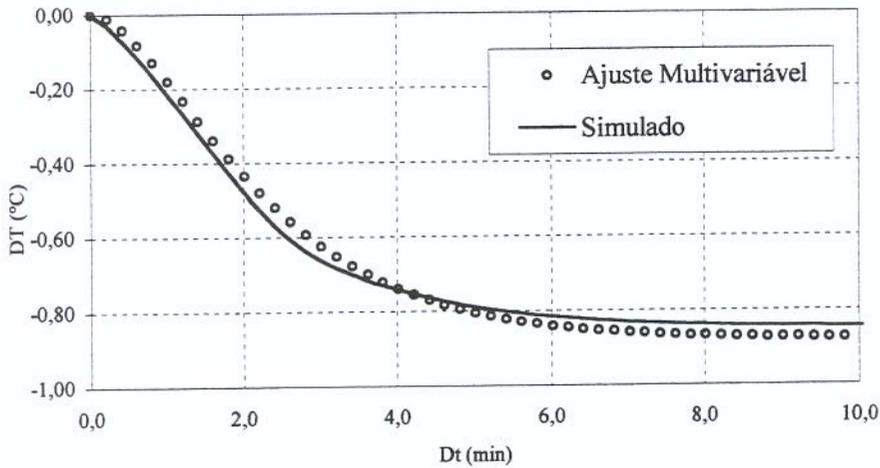


Figura 58 - Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X= 2,59$  e  $\Delta Vp=18,75\%$ ) do PFCC para  $k$ -Carragena, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis

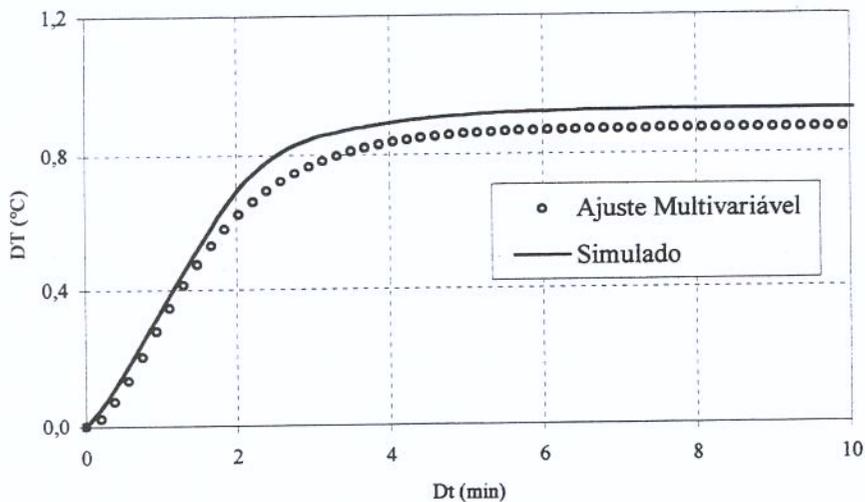


Figura 59 - Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X= 2,59$  e  $\Delta Vp=-11,375\%$ ) do PFCC para  $k$ -Carragena, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis

Obteve-se um coeficiente de correlação, em torno de  $R^2 = 0,997$  para os ajustes observados através das Figuras 58 e 59, atestando a utilização da metodologia empregada para a incorporação das não linearidades no modelo de segunda ordem.

## 5.10.3 PFCC para a Pectina

5.10.3.1 Análise Multivariável do Parâmetro  $K_p$  para Pectina

A Tabela 46, apresenta os dados do PFCC, obtidos a partir dos ajustes comentados no item 5.7, que serão utilizados nas avaliações subseqüentes.

Tabela 46 – Resultados do PFCC para Pectina

Ensaio	Variáveis Independentes		Valores das Variáveis Dependentes					Ajustes
	X (%)	$\Delta V_p(\%)$	k	KP	$\tau$	$T_D$	Z	$R^2$
1	+1	+1	1,501	-20,009	0,820	0,220	2,254	0,9984
2	-1	+1	1,812	-24,155	0,900	0,260	2,484	0,9986
3	+1	-1	0,593	-23,716	0,290	0,083	0,782	0,9992
4	-1	-1	0,708	-28,320	0,300	0,087	0,810	0,9991
5	$+\alpha$	0	0,495	-19,812	0,842	0,230	2,300	0,9986
6	$-\alpha$	0	0,645	-25,800	0,913	0,260	2,500	0,9991
7	0	$+\alpha$	2,061	-21,580	1,100	0,340	3,400	0,9982
8	0	$-\alpha$	1,225	-25,519	0,280	0,080	0,863	0,9987
9	0	0	0,870	-34,800	0,320	0,090	0,101	0,9988

Através de análise dos testes t e p observa-se que o efeito de interação entre as duas variáveis estudadas ( $\Delta V_p \cdot X$ ) é estatisticamente não significativo. A Tabela 47 apresenta apenas os termos que apresentaram efeitos significativos nas variáveis dependentes.

Tabela 47 - Estimativa dos Efeitos, desconsiderando ( $\Delta V_p \cdot X$ ) para Pectina

Estimativa dos Efeitos; $R^2 = 0,94522$				
	Média	Desvio padrão	t	p
Média.	-20,799	0,473	-43,962	0,000
X (L)	3,854	0,580	6,641	0,001
X(Q)	-1,964	0,692	-2,836	0,030
$\Delta V_p(L)$	3,366	0,580	5,801	0,001
$\Delta V_p(Q)$	-3,362	0,692	-4,854	0,003

Em relação à importância dos efeitos principais, pode-se observar na Tabela 47 que os termos lineares são positivamente de maior importância e os termos quadráticos apresentam efeitos negativos sobre a variável resposta.

Observa-se pela Figura 60 que os valores preditos estão próximos aos ensaiados evidenciando que o modelo ajustado é preditivo.

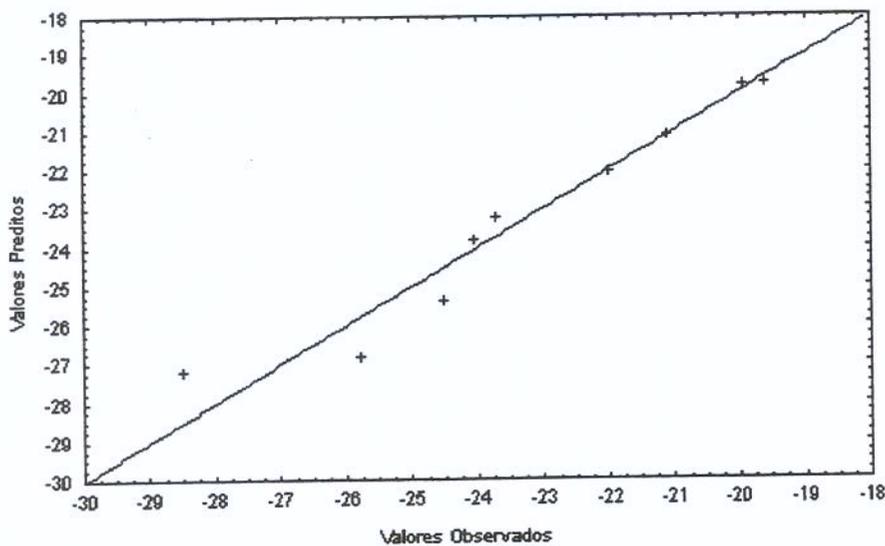


Figura 60 – Valores Preditos versus Observados para Pectina

Tabela 48 – Tabela Anova do Parâmetro  $K_p$  para Pectina

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	70,338	4,000	17,584	27,735
Resíduos	3,804	6,000	0,634	
Falta de Ajuste	3,804	6,000	0,634	
Erro puro	0,000	0,000	0,000	
Total	74,142	10,000	7,414	
F tabelado	4,560			
F <sub>calc</sub> /F <sub>tab</sub>	6,082			

O teste F, apresentado na Tabela 48, afirmou que a variação descrita pelo modelo é significativamente maior que a variação não explicada.

O modelo matemático codificado para o parâmetro  $K_p$  em função da concentração da k-Carragena e da perturbação na vazão do produto está apresentado na equação (58):

$$K_p = - 20,796 + 1,927.X - 0,982.X^2 + 1,683.\Delta V_p - 1,681.\Delta V_p^2 \quad (58)$$

Através dos testes estatísticos anteriores, comprovou-se que o modelo quadrático é válido permitindo a geração das superfícies de resposta e curvas de contorno para o parâmetro  $K_p$  em função da concentração e perturbação, apresentadas nas Figuras 61 e 62.

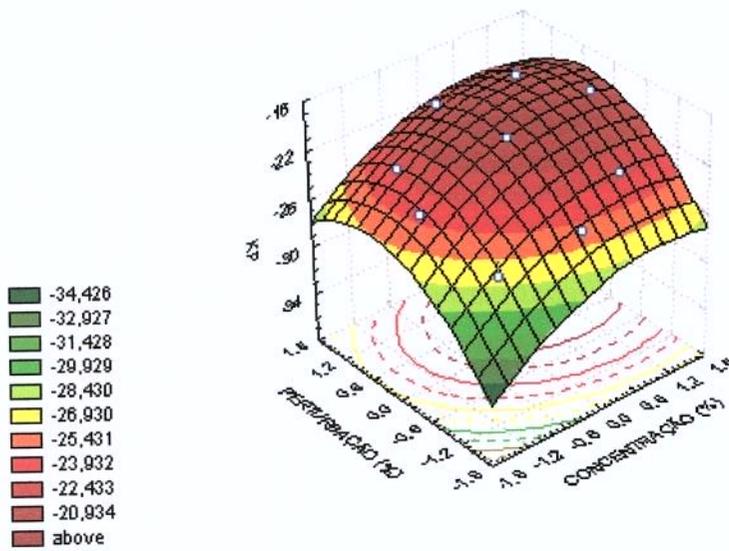


Figura 61 – Superfície de Resposta de  $K_p$  em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

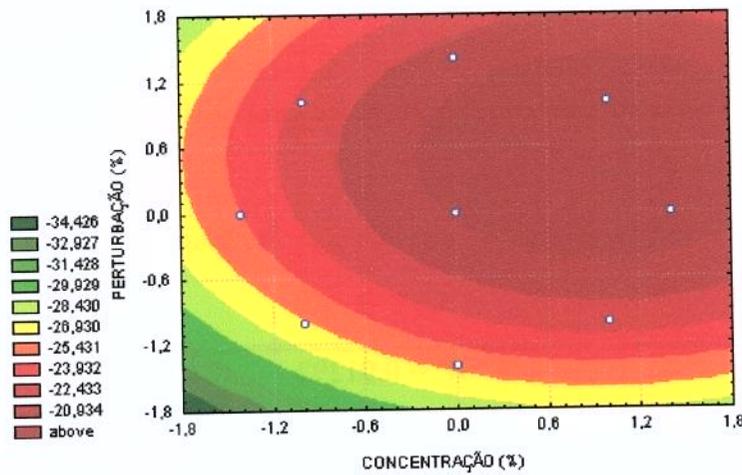


Figura 62 – Curvas de Contorno de  $K_p$  em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

Através destas figuras verifica-se claramente a influência das variáveis independentes no comportamento de  $K_p$ .

5.10.3.2 Análise Multivariável do Parâmetro  $\tau$  para Pectina

Os efeitos individuais e de interação das variáveis independentes sobre a variável resposta  $\tau$ , estão demonstrados na Tabela 49.

Tabela 49 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro  $\tau$ 

$R^2 = 0,91831$				
	<b>Efeitos</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>t</b>	<b>p</b>
Média	0,321	0,076	4,212	0,008
<b>X(L)</b>	-0,048	0,093	-0,510	0,632
X(Q)	0,455	0,111	4,081	0,010
$\Delta V_p$ (L)	0,573	0,093	6,136	0,002
$\Delta V_p$ (Q)	0,266	0,111	2,388	0,063
<b>X.<math>\Delta V_p</math></b>	-0,035	0,132	-0,265	0,801

Os efeitos estatisticamente não significativos são: X(L) e (X. $\Delta V_p$ ) são os que não influenciam as variáveis dependentes.

Tabela 50 – Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro  $\tau$  desconsiderando-se os termos não significativos

$R^2 = 0,91292$				
	<b>Efeitos</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>t</b>	<b>p</b>
Média	0,321	0,066	4,828	0,002
X(Q)	0,455	0,097	4,676	0,002
$\Delta V_p$ (L)	0,573	0,082	7,032	0,000
$\Delta V_p$ (Q)	0,266	0,097	2,737	0,029

A Figura 63 mostra que a reta tem um bom ajuste aos valores ensaiados e que, portanto, os valores preditos estão próximos aos ensaiados.

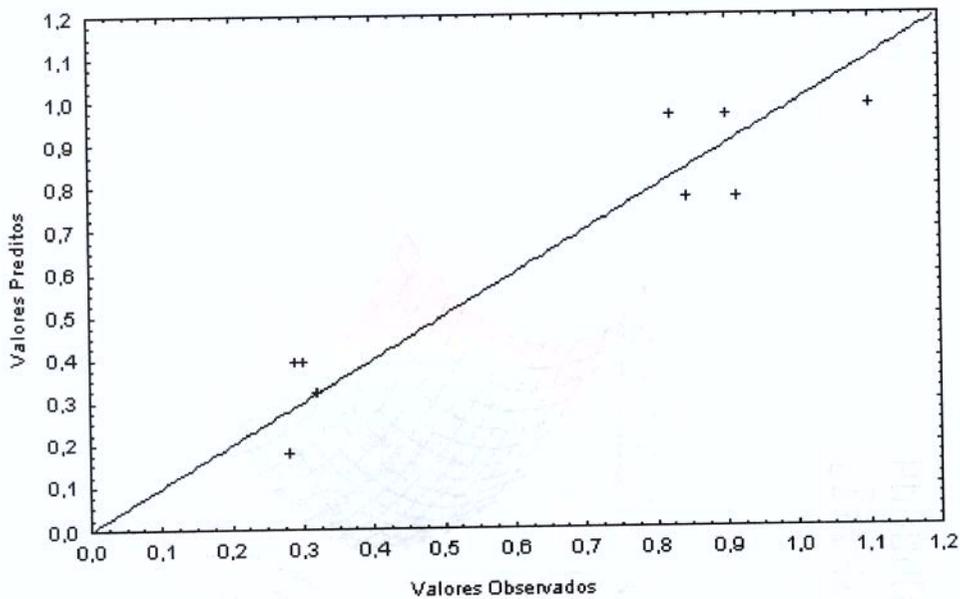


Figura 63 – Valores Preditos versus Observados do parâmetro  $\tau$  para *Pectina*

Através Tabela 51, pode-se observar o teste F que afirma que a variação descrita pelo modelo é significativamente maior que a variação não explicada, atestando a validade do modelo obtido.

Tabela 51 - Tabela Anova do parâmetro  $\tau$  para *Pectina*

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	1,127	3,000	0,376	22,125
Resíduos	0,119	7,000	0,017	
Falta de Ajuste	0,119	7,000	0,017	
Erro puro	0,000	0,000	0,000	
Total	1,246	10,000	0,125	
F tabelado	4,350			
F <sub>cal</sub> /F <sub>tab</sub>	5,086			

O modelo codificado final obtido pela regressão que relaciona concentração e perturbação é uma equação de 2ª ordem descrita matematicamente como:

$$\tau = 0,321 + 0,227.X^2 + 0,2866.\Delta Vp + 0,133.\Delta Vp^2 \quad (59)$$

A superfície de resposta e a curva de reação para o parâmetro  $\tau$ , estão apresentadas nas Figuras 64 e 65.

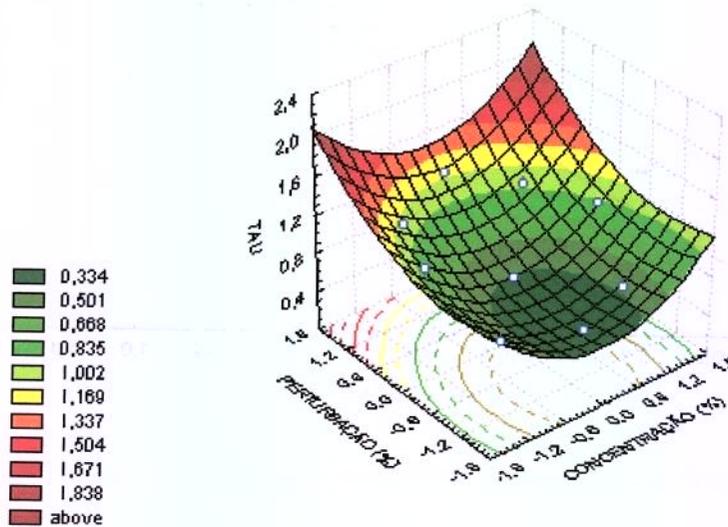


Figura 64 - Superfície de resposta do Parâmetro  $\tau$  em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

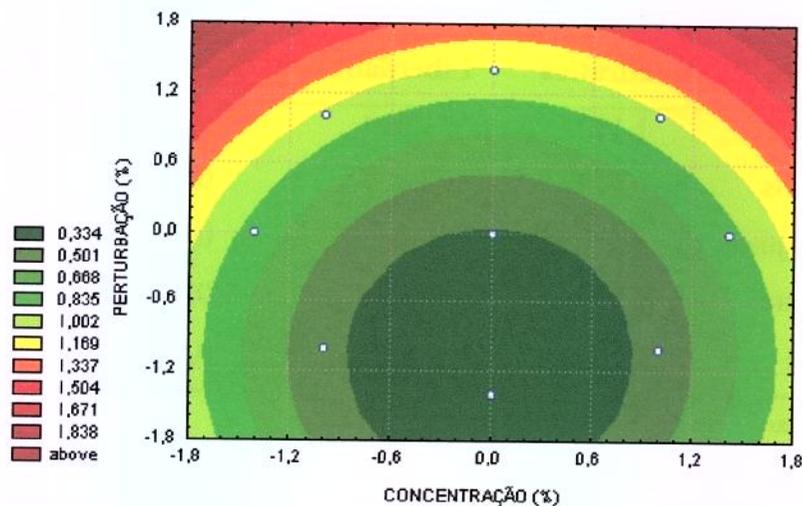


Figura 65 - Curvas de Contorno para  $\tau$  em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

5.10.3.3 Análise Multivariável do Parâmetro  $T_D$  para Pectina

Os efeitos mostrados na Tabela 52, foram calculados desconsiderando-se os termos não significativos que foram o termo linear da concentração X (L) e o termo de interação entre as duas variáveis (X. $\Delta V_p$ ).

Tabela 52 - Estimativa dos Efeitos Para o Parâmetro  $T_D$ 

$R^2 = 0,8888$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,090	0,022	4,071	0,005
X (Q)	0,123	0,032	3,775	0,007
$\Delta V_p(L)$	0,170	0,027	6,242	0,000
$\Delta V_p(Q)$	0,087	0,032	2,690	0,031

A Tabela 53 mostra a validade do modelo através do teste F de significância.

Tabela 53 – Tabela Anova de TD

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	F calculado
Regressão	0,0826	3,0000	0,0275	18,6562
Resíduos	0,0103	7,0000	0,0015	
Falta de Ajuste	0,0103	7,0000	0,0015	
Erro puro	0,0000	0,0000	0,0000	
Total	0,0929	10,0000	0,0093	
$F_{\text{tabelado}}$	4,3500			
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	<b>4,2888</b>			

## 5.10.3.4 Análise Multivariável do Parâmetro Z para Pectina

Os efeitos mostrados na Tabela 54, foram calculados desconsiderando-se os termos não significativos que foram o termo linear da concentração X (L) e o termo de interação entre as duas variáveis (X. $\Delta$ Vp).

Tabela 54 - Estimativa dos Efeitos para o Parâmetro Z para Pectina

$R^2 = 0,9269$				
	Efeitos	Desvio padrão	t	p
Média	0,103	0,222	0,463	0,658
X (Q)	1,961	0,325	6,035	0,001
$\Delta$ Vp(L)	1,686	0,272	6,190	0,000
$\Delta$ Vp (Q)	1,691	0,325	5,203	0,001

O teste F, mostrado em **negrito** na Tabela 55, atesta a validade do modelo obtido.

Tabela 55 – Tabela Anova do parâmetro Z para Pectina

Fonte de variação	Soma quadrática	Graus de Liberdade	Média quadrática	<b>F calculado</b>
Regressão	12,970	3,000	4,323	29,234
Resíduos	1,035	7,000	0,148	
Falta de Ajuste	1,035	7,000	0,148	
Erro puro	0,000	0,000	0,000	
Total	14,005	10,000	1,401	
$F_{\text{tabelado}}$	4,350			
$F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$	<b>6,721</b>			

Observa-se pela Figura 66 que a reta tem um bom ajuste aos valores ensaiados, o que mostra que os valores preditos estão próximos aos ensaiados.

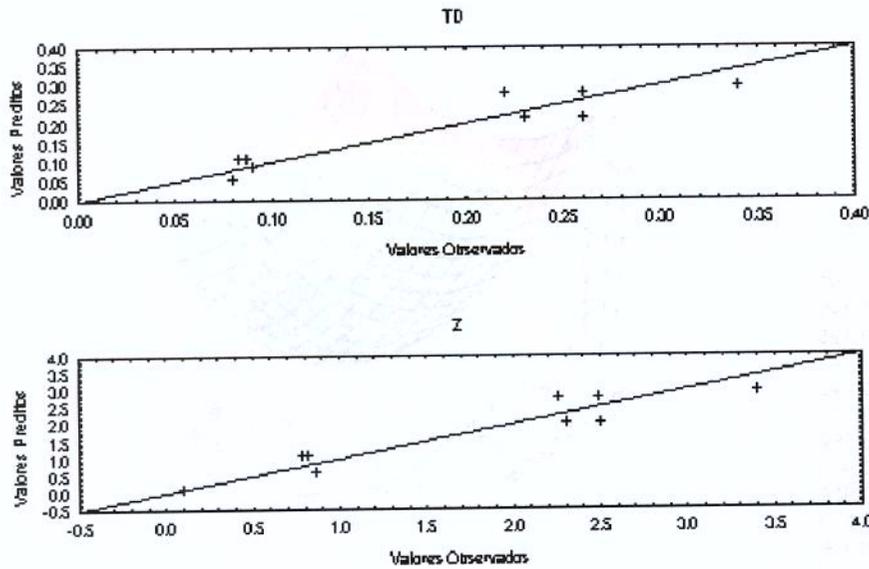


Figura 66 – Valores Preditos versus Observados Dos Parâmetros  $T_D$  e  $Z$  para Pectina

O modelo quadrático é, portanto, válido e pode-se gerar as superfícies de resposta e as curvas de contorno para os parâmetros  $T_D$  e  $Z$  em função da concentração e perturbação. Através destas figuras verifica-se claramente a influência das variáveis independentes no comportamento de  $T_D$  e  $Z$ .

Os Modelos matemáticos codificados para os parâmetros  $T_D$  e  $Z$  para pectina estão apresentados nas equações (60) e (61), respectivamente:

$$T_D = 0,0903 + 0,0612.X^2 + 0,0848.\Delta Vp + 0,0436.\Delta Vp^2 \quad (60)$$

$$Z = 0,103 + 0,980.X^2 + 0,843.\Delta Vp + 0,8453.\Delta Vp^2 \quad (61)$$

As curvas de reação e superfícies de respostas, obtidas a partir destes modelos, estão mostradas nas Figuras 67 a 70.

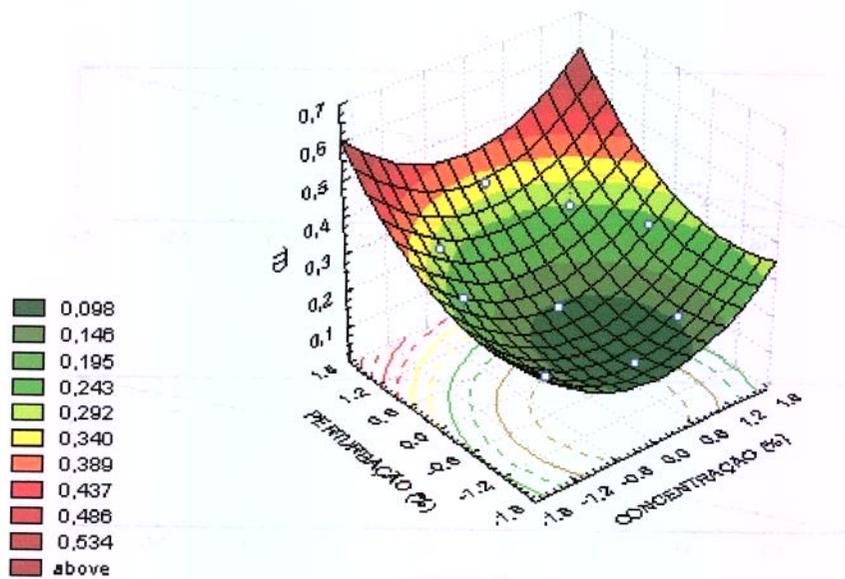


Figura 67 – Superfícies de resposta dos Parâmetros  $T_D$  em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

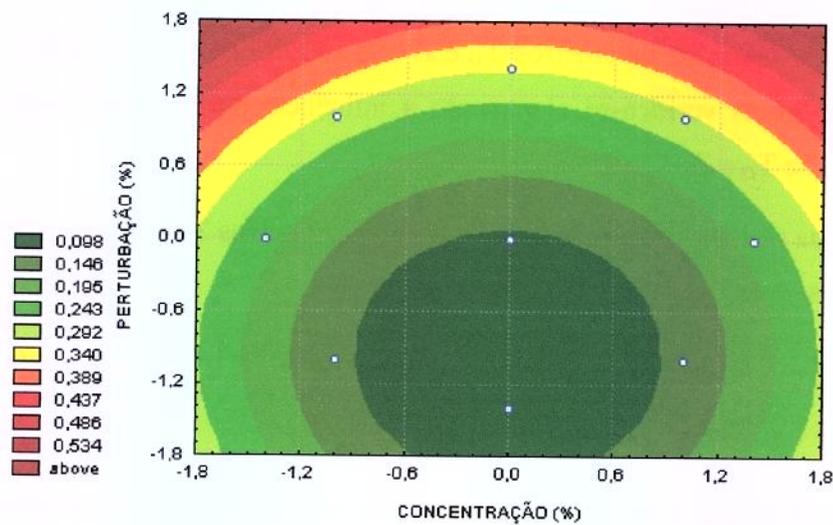


Figura 68 – Curvas de Contorno para  $T_D$  em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

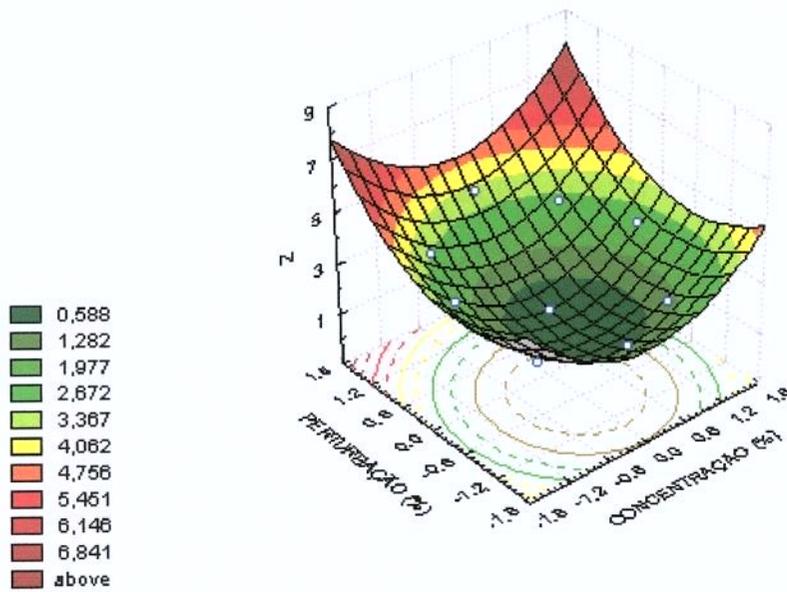


Figura 69 – Superfície de resposta do Parâmetro Z em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

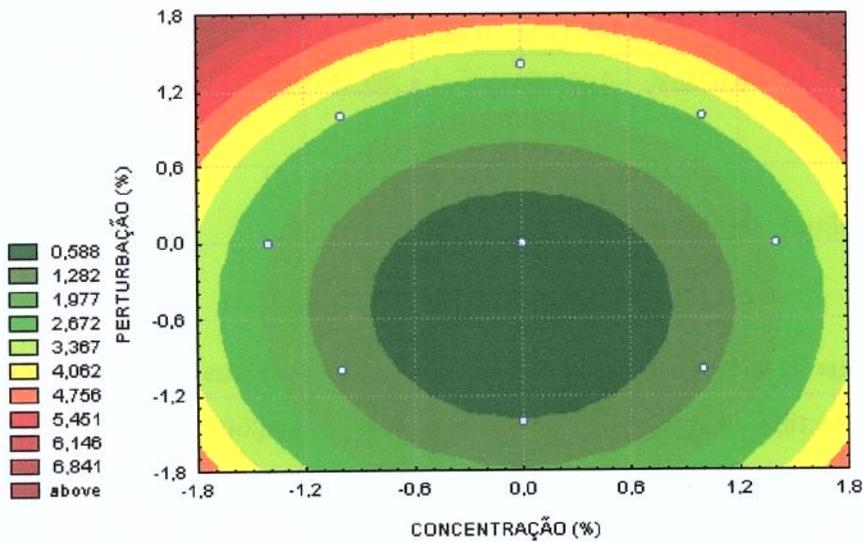


Figura 70 – Curvas de Contorno para Z em função da concentração da Pectina e da perturbação na vazão do produto

## 5.10.3.5 Modelos Multivariáveis Reais e Globais para Pectina

As equações (62) a (65), mostram os modelos reais dos parâmetros:

$$Kp = -26,74 + 1,099.X + 0,38.X^2 + 0,16.\Delta Vp - 0,0073.\Delta Vp^2 \quad (62)$$

$$\tau = 0,52 - 0,0041.X^2 + 0,024.\Delta Vp - 0,000068.\Delta Vp^2 \quad (63)$$

$$T_D = 0,14 - 0,0014.X^2 + 0,0065.\Delta Vp + 0,000032.\Delta Vp^2 \quad (64)$$

$$Z = 1,15 + 0,0014.X^2 + 0,049.\Delta Vp + 0,0014.\Delta Vp^2 \quad (65)$$

Substituindo as Equações 62 e 63 na Equação 23, considerando-se o fator de amortecimento  $\zeta=1$ , encontra-se a seguinte função de transferência que incorpora as não linearidades do sistema :

$$y(s) = \frac{(-26,74 + 1,01x + 0,38x^2 + 0,16\Delta Vp - 0,0073\Delta Vp^2).I}{s \left( (0,52 - 0,004x^2 + 0,024\Delta Vp - 0,00007\Delta Vp^2)^2 s^2 + 2 \left( (0,52 - 0,004x^2 + 0,024\Delta Vp - 0,00007\Delta Vp^2) \right) s + 1 \right)} \quad (66)$$

onde I é a amplitude da Perturbação.

As Figuras 71 e 72 comparam as curvas de reação obtidas para os ensaios 01 e 03 do PFCC para Pectina, através da substituição das Equações 62 e 63, na função de transferência, para sistemas de segunda ordem e  $\zeta=1$ , no domínio do tempo:

$$y(t) = IKp \left( 1 - \left( 1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \text{ com a curva de reação obtida através do simulador dinâmico.}$$

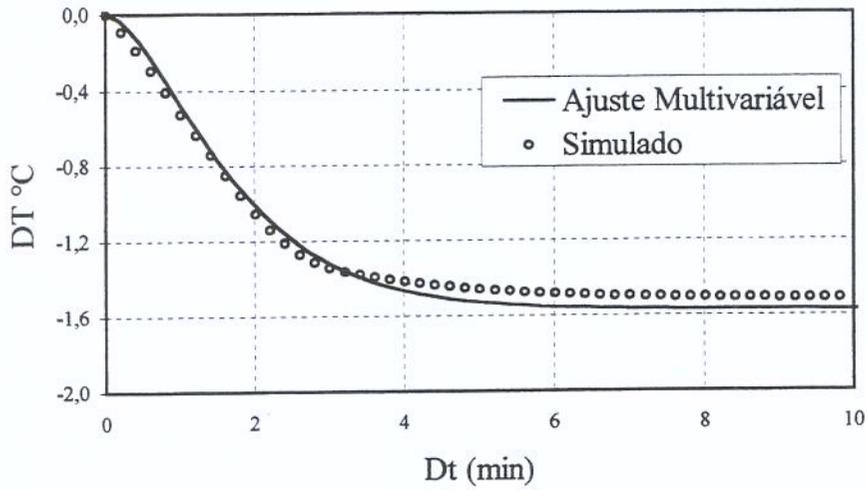


Figura 71 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X=2,59$  e  $\Delta Vp=+18,75\%$ ) do PFCC para Pectina, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis

Obteve-se boa concordância entre os dados observados pelas duas curvas de reação das Figuras 71 e 72, sendo que o desvio médio entre os dados simulados e obtidos pelo ajuste multivariável é aproximadamente 0,021% e o valor de  $R^2$  é aproximadamente 0,99.

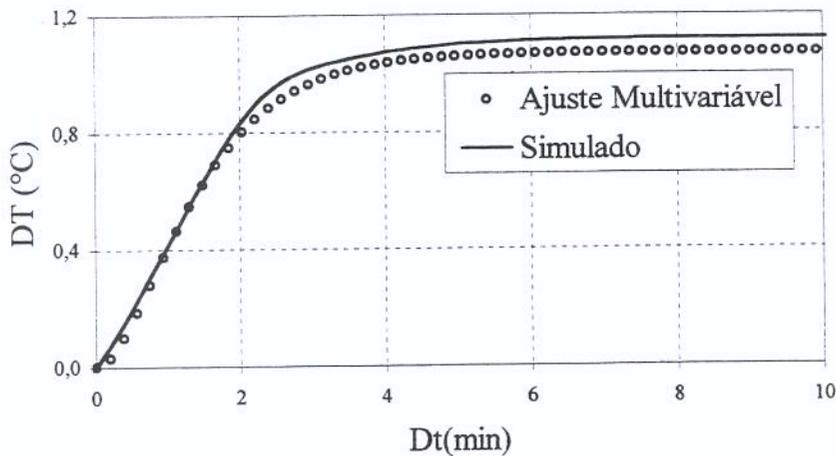


Figura 72 – Curvas de Reação da Temperatura de Saída do Produto, Para o Ensaio 01 ( $X= 2,59$  e  $\Delta Vp=-11,375\%$ ) do PFCC para Pectina, do Processo Simulado e do Modelo de 2ª ordem com Parâmetros não Lineares Multivariáveis

### 5.11 Comentários Gerais

A utilização da Metodologia de Planejamento Experimental na obtenção de equações empíricas, para a incorporação das não linearidades dos parâmetros do modelo de segunda ordem linear foi adequada e, pode-se confirmar, observando o pequeno desvio obtido em relação aos dados obtidos pelo simulador dinâmico.

Esta nova proposta de adequar os parâmetros não lineares na caracterização de processos de segunda ordem linear, se torna viável em processos reais não lineares.

Contudo, apesar de não ter sido escopo deste trabalho, observa-se que os parâmetros para sintonia de controladores também obtiveram ótimos ajustes não lineares e multivariáveis para uma melhor execução de controles não convencionais de processo não lineares, comuns na indústria de alimentos.

Sendo assim, a influência reológica dos produtos não Newtonianos é significativa na caracterização do processo de aquecimento, necessitando as adequações desenvolvidas neste trabalho.

## 6. CONCLUSÕES

Em processos de fluidos alimentícios é comum um comportamento não linear e devido à relativa complexidade das transformações químicas e físicas, um modelo empírico que descreve o comportamento dinâmico do processo é requerido. A metodologia proposta neste trabalho apresenta evidente facilidade para eliminar as variações do modelo através da normalização dos parâmetros.

Na caracterização do processo de aquecimento em trocadores de calor a placas, a não Newtonidade, também considerada através das variações nas concentrações dos fluidos goma-Xantana, Pectina e k-Carragena, apresentou considerável influência no comportamento dinâmico das respostas do sistema, quando submetido a perturbações degrau nas variáveis independentes.

O sistema avaliado, para os três fluidos não Newtonianos (goma-Xantana, k-Carragena e Pectina) apresentou comportamento característico de um sistema não linear e o comportamento dinâmico das curvas de reação foi bem representado através de funções de transferência de segunda ordem com fator de amortecimento  $\zeta=1$ .

Para estes tipos de sistemas não se recomenda a utilização de controladores convencionais, portanto a alternativa proposta para esses produtos foi à incorporação das não linearidades nos parâmetros gráficos para sintonia de controladores e da caracterização da ordem desse processo através do ajuste de modelos empíricos, utilizando a metodologia de Planejamento de Ensaio, e disponibilizando os coeficientes  $\tau$ ,  $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ , representados através de funções multivariáveis perfeitamente adequadas para o uso em controladores não convencionais.

O uso da metodologia de planejamento de experimentos apresentou-se como uma boa alternativa para o estudo de sistemas não lineares, como o processo de aquecimento de fluidos não Newtonianos em TCP, pela facilidade na obtenção dos modelos empíricos e pela validade estatística dos mesmos.

Considerando-se todas as análises do processo que foram realizadas neste trabalho, pôde-se concluir que as soluções aquosas (não Newtonianas), dos três hidrocolóides testados, apresentaram variações de comportamento entre si devido à influência reológica de cada produto, indicando a necessidade do uso adequado dos devidos parâmetros para sintonia de controladores e caracterização da ordem do processo que representem tais diferenças entre os produtos.

Através dos perfis internos de temperatura, pôde-se observar o comportamento dinâmico do sistema, verificando a forte não linearidade dos parâmetros  $K_p$  e  $\tau$  em relação aos canais e as subdivisões dos mesmos.

## 7. SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

- Avaliação multivariável dos parâmetros de caracterização de ordem do processo ( $K_p$  e  $\tau$ ), ou de sintonia de controladores ( $K$ ,  $T_D$  e  $Z$ ), com relação à perturbação na vazão do produto ( $\Delta V_p$ ), perturbação na vazão do fluido de aquecimento ( $\Delta V_f$ ) e para diferentes concentrações do produto ( $X$ ), aplicando perturbações simultâneas nas variáveis manipuláveis.
- Aplicação de controles não convencionais no processo de aquecimento de fluidos não Newtonianos, utilizando os parâmetros de sintonia de controladores não lineares e multivariáveis.
- Avaliação da influência dos produtos não Newtonianos no comportamento dinâmico do sistema para o processo de resfriamento.
- Avaliação da influência reológica nos perfis internos do TCP.
- Formulação da função de transferência multivariável não linear com as variáveis, perturbação na vazão do produto ( $\Delta V_p$ ), perturbação na vazão do fluido de aquecimento ( $\Delta V_f$ ) e diferentes concentrações do produto ( $X$ ).

---

## 8. REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F. e WALTERS, K. **Viscosity: An introduction to rheology.** New York: Elsevier Applied Science, 1989. 11–35p.

BARROS, B. N.; SCARMINIO, S. e EDWARD, I. R. **Planejamento e otimização de experimentos.** Campinas: Editora da Unicamp, 1995.

BERTO, M. I. **Modelagem Matemática e Simulação Dinâmica de Trocadores de Calor de Placas para o Resfriamento de Sucos de Laranja Natural e Concentrado.** Campinas, 2000. 110p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

BOX, G. E. P. H., W.G., HUNTER J.S. **Statistics for experimenters.** New York: Editora Wiley, 1978. 652p.

CHOI, Y. e OKOS, M. R. **Effect of temperature and composition on the thermal properties of foods: Food Engineering and Process Applications.** Canada: Elsevier Applied Science Publisher, 1986. v.I, 93-101p.

COUGHANOWR, D. R. e KOPPEL, L. B. **Análise e Controle de Processos.** Tradução de Evaristo Biscaia Jr. Carlos Augusto G. Perlingeiro. Rio de Janeiro: 1978. 474p.

CRISTIANSEN, E. B. e E., C. S. Heat transfer to pseudoplastic fluids in laminar flow. **AIChE Journal**, v.8, p.154-160, 1962.

DAS, S. K. e MURUGESAN, K. Transient response of multipass plate heat exchangers with axial thermal dispersion in Fluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.43, p.4327-4345, 2000.

DELPLACE, F.; LEULIET, J. C. e LEVIEUX, D. A Reaction Engineering approach to the Analysis of Fouling by Whey Proteins of a Six-Channels-per-Pass Plate Heat Exchanger. **Journal of Food Engineering**, v.34, p.91-108, 1997.

GHAN, A. G. A.; FARID, M. M.; CHEN, X. D. e RICHARDS, P. Numerical simulation of natural convection heating of canned food by computational Fluid dynamics. **Journal of Food Engineering**, v. 41, p. 55-64, 1999.

GRATÃO, A. C. A. **Avaliação experimental da curva de resposta da temperatura de saída de fluidos newtonianos no processo de resfriamento em trocador de calor de tubo duplo**. Campinas, 2002. 171p. Dissertação de Mestrado. Faculdade de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual de Campinas.

HALEY, T. A. e MULVANEY, S. J. Advanced process control techniques for the food industry. **Trends in Food Science & Technology**, v.6, p.103-110, 1995.

KIM, H. B.; TADINI, C. C. e SINGH, R. K. Heat transfer in a plate exchanger during pasteurization of orange juice. **Journal of Food Engineering**, v.42, p.79-84, 1999.

LEULIET, J. C.; MAINGONNAT, J. F. e M., L. Etude de la perte de charge dans des échangeurs de chaleur à plaques traitant des produits non-newtoniens. **Revue Générale Thermique**, n.308-309, p.445-450, 1987.

MARCOTTE, M. L.; HOSHAHILI, A. R. T. e RAMASWAMY, H. S. Rheological properties of selected hydrocolloids as a function of concentration and temperature. **Food Research International**, v.34, p.695-703, 2001.

MASUBUCHI, M. e ITO, A. Dynamic analysis of plate heat exchanger system. **Bulletin of the JSME**, n.142, p.20, 1977.

NEGIZ, A.; CINAR, A.; SCHELESSER, J. E.; RAMANAUSKAS, P.; ARMASTRONG, D. J. e STROUP, W. Automated control of high temperature short time pasteurization. **Food Control**, v.7, n.6, p.309-315, 1996.

OGATA, K. **Engenharia de Controle Moderno**. Universidade de Minnesota: Prentice-Hall do Brasil, 1998.

OGUNNAIKE, B. A. e RAY, W. H. **Process Dynamics, Modeling, and Control**. New York: Oxford University, 1994. 1260p.

RENE, F.; LEULIET, J. C. e LALANDE, M. Heat Transfer to Newtonian and non - Newtonian food fluids in Plate Heat Exchangers. **Transfer Chemical Engineering**, v.69 - C, p.115-126, 1991.

RHA, C. Rheology of Fluid foods. **Food Technology**, v.32, n.7, p.77-82., 1978.

SHARIFI, F.; NARANDKJI, G. e MEHRAVARAN, K. Dynamic Simulation of Plate Heat Exchangers. **International Journal of Heat and MassTransfer**, v.22, p.213-225, 1995.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control: An Introduction to Theory and Practice**. New Jersey: Prentice - Hall, 1984. 696p.

## 9. ANEXOS

### 9.1 Anexo I – Perturbações Individuais

Tabela 56 – Perturbações Simétricas Positivas e Negativas

Variáveis	Perturbações ( $\Delta$ )			
	++	+	-	--
$T_P(^{\circ}\text{C})$	5	3	3	5
$T_F(^{\circ}\text{C})$	5	3	3	5
$V_P(\text{kg/h})$	-25 %	-12,5%	+12,5%	+25%
$V_F(\text{kg/h})$	-25 %	-12,5%	+12,5%	+25%

As legendas destas figuras caracterizam as perturbações das variáveis temperaturas e vazões ( $T+$ ,  $T++$ ,  $T-$  e  $T--$ ) e ( $V+$ ,  $V++$ ,  $V-$  e  $V--$ ), respectivamente.

- **Perturbações individuais para  $X = 1\%$**

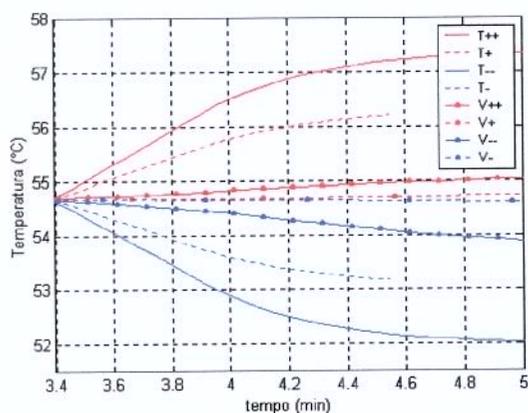


Figura 73 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 1% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

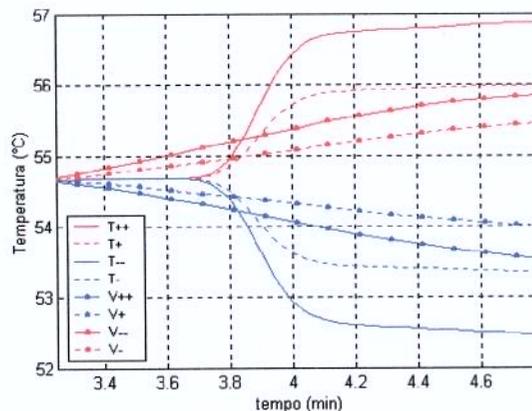


Figura 74 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 1% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto

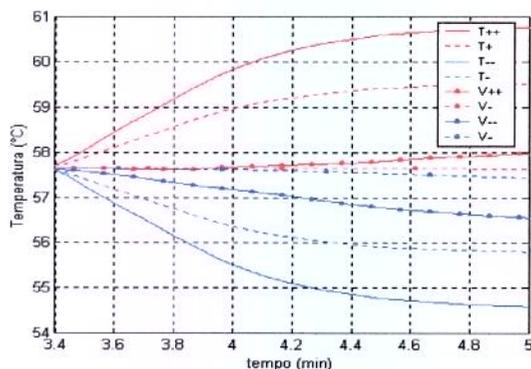


Figura 75 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 1% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

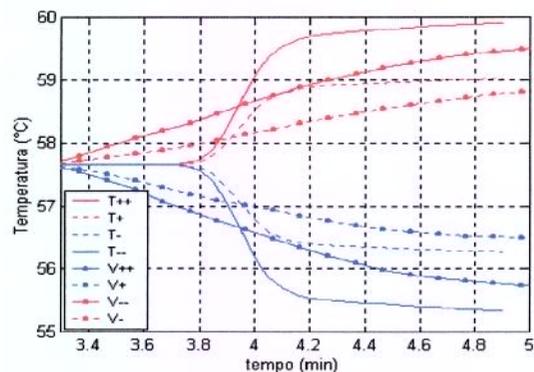


Figura 76 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 1% após perturbações na Vazão e temperatura do Produto

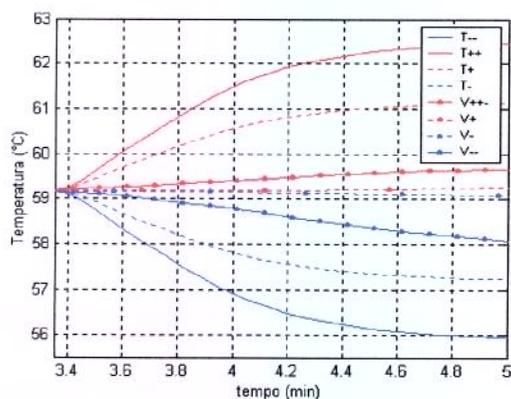


Figura 77 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 1% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

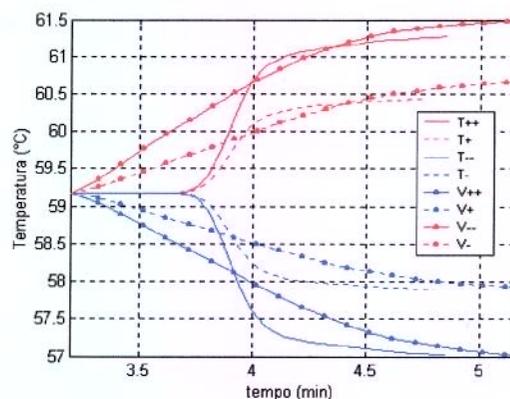


Figura 78 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 1% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto

• *Perturbações individuais para  $X = 2\%$*

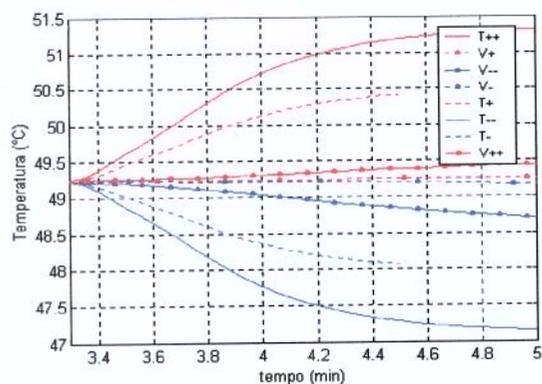


Figura 79 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 2% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

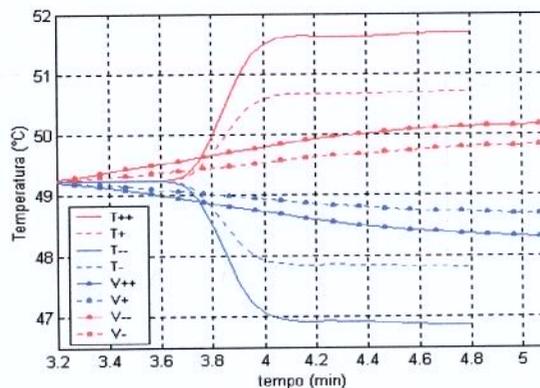


Figura 80 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 2% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto

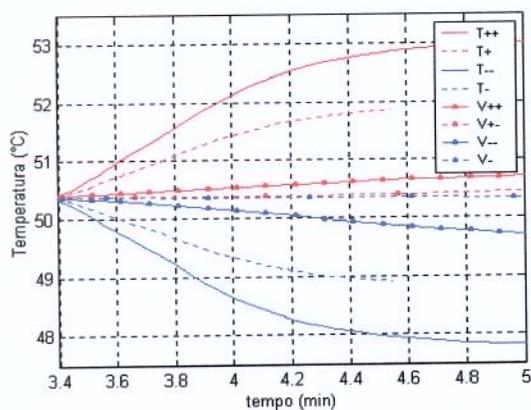


Figura 81 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 2% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

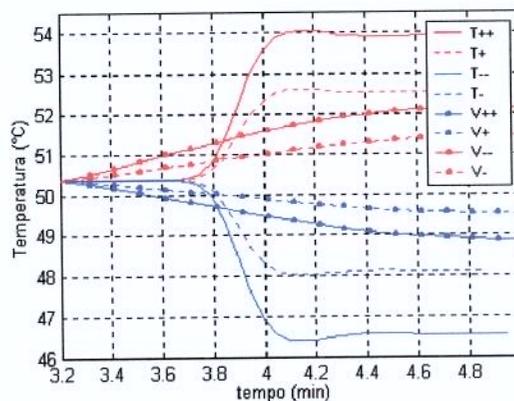


Figura 82 – Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 2% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto

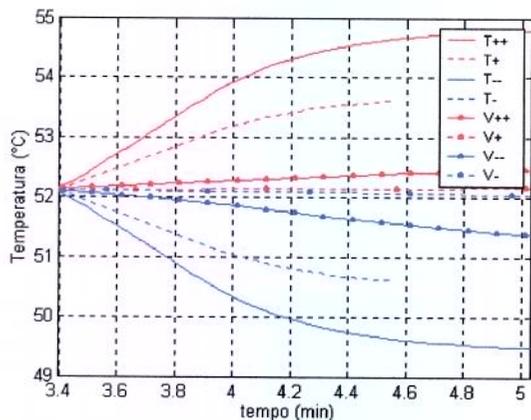


Figura 83– Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 2% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

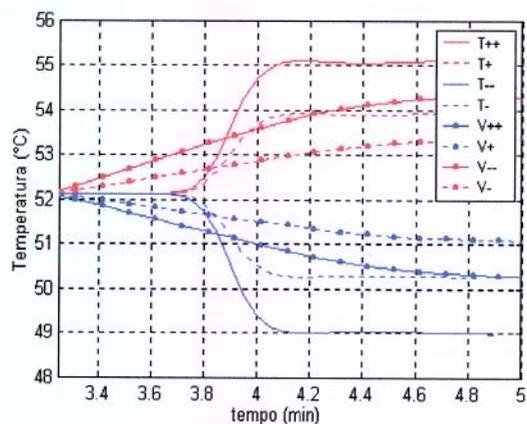


Figura 84 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 2% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto

- **Perturbações individuais para  $X = 3\%$**

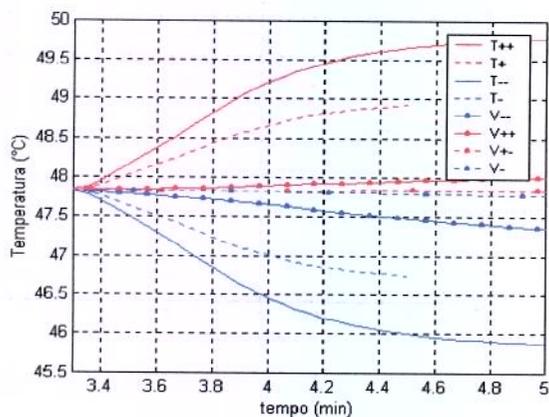


Figura 85– Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 3% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

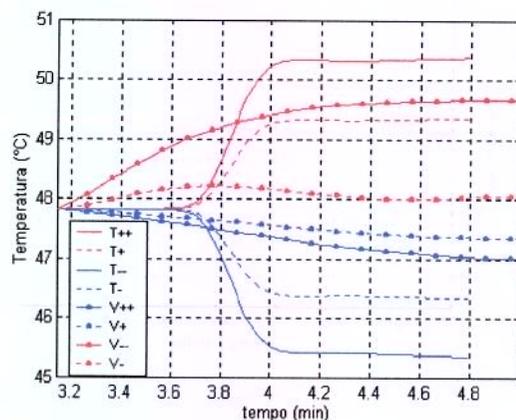


Figura 86 – Curvas de reação da temperatura de saída da goma-Xantana 3% após perturbação na Vazão e temperatura do Produto

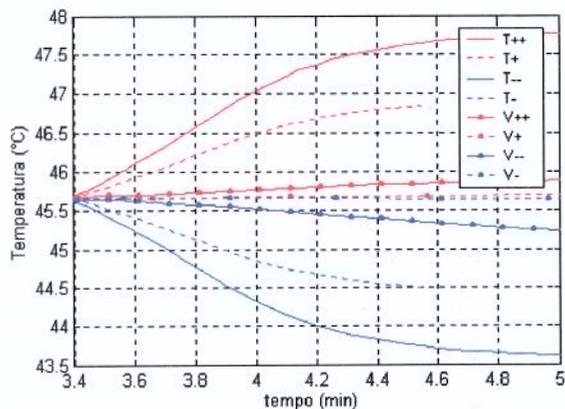


Figura 87– Curvas de reação da temperatura de saída da k-Carragena 3% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

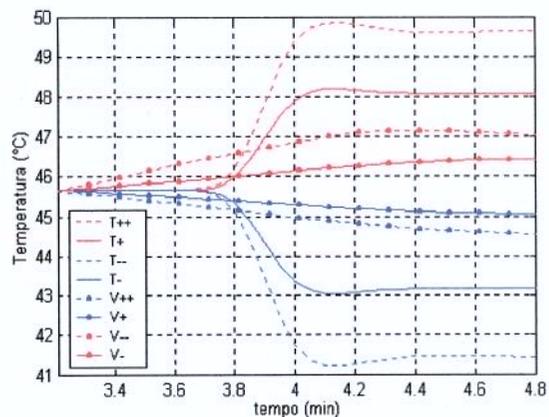


Figura 88– Curvas de reação da temperatura do produto da k-Carragena 3% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

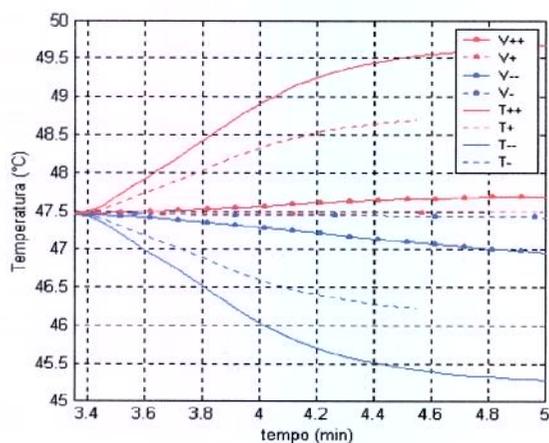


Figura 89 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 3% após perturbação na Vazão e temperatura do fluido de aquecimento

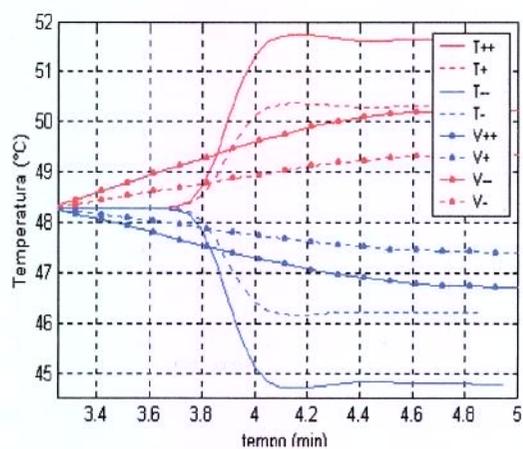


Figura 90 – Curvas de reação da temperatura de saída da Pectina 3% após perturbação na Vazão e temperatura do produto

## 9.2 Anexo II - Modelagem Utilizada por Berto (2000)

O cálculo das temperaturas dos fluidos e das placas em cada volume de controle do trocador foi feito a partir das resoluções das equações de balanço de energia. Admitiu-se que nesse processo não há acúmulo de massa. Estas equações foram discretizadas de forma que as derivadas temporal e espacial são apresentadas conforme as equações a seguir:

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{T_{j,k}^{i+1} - T_{j,k}^i}{\Delta t}; \quad (67)$$

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{j,k}^{i+1} - T_{j,k}^i}{\Delta x}; \quad (68)$$

onde: i = tempo;

j = canal;

k = posição no canal.

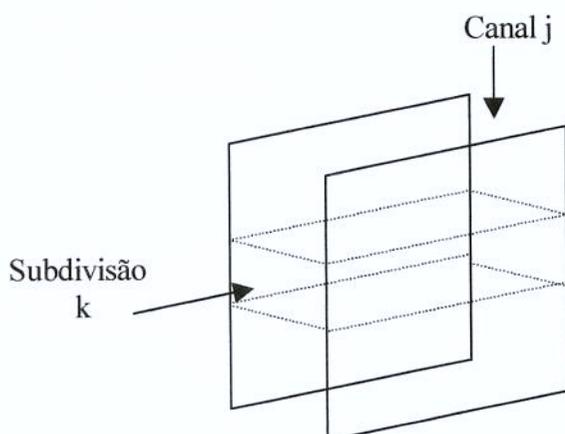


Figura 91 – Esquema de uma Subdivisão de canal do Trocador de Calor a Placas

Os métodos utilizados na resolução das equações diferenciais foram:

Explícito: as temperaturas no instante seguinte são calculadas baseado nos valores do instante presente (i), tanto na posição (k) como na posição vizinha (k+1), Conforme equação (68).

Implícito: as temperaturas são calculadas baseado nos valores do instante seguinte (i+1). A derivada em reação à posição é representada conforma e equação:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T_{k,j}^{i+1} - T_{k+1,j}^{i+1}}{\Delta x}; \quad (69)$$

Cranck Nicolson: Contempla simultaneamente o método implícito e explícito, com a ponderação entre ambos:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{1}{2} \left[ \frac{T_{k,j}^i - T_{k+1,j}^i}{\Delta x} + \frac{T_{k,j}^{i+1} - T_{k+1,j}^{i+1}}{\Delta x} \right]; \quad (70)$$

O simulador original desenvolvido por Berto (2000) foi montado conforme o fluxograma descrito na figura:

#### Resolução dos Balanços de Energia

Resolvendo os balanços de energia das equações (1) e (2) para os três métodos e considerando a área de troca de calor constante em qualquer canal, obtém-se as equações descritas a seguir:

Método explícito:

$$MC \frac{T_{k,j}^{i+1} - T_{k+1,j}^i}{\Delta t} = MC_v \left( \frac{T_{k-1,j}^i - T_{k,j}^i}{\Delta x} \right) - h_{k,j}^i A (T_{k,j}^i - T_{p_{k,j}}^i) - h_{k,j}^i A (T_{k,j+1}^i - T_{p_{k,j}}^i) \quad (71)$$

Método implícito:

$$MC \frac{T_{k,j}^{i+1} - T_{k+1,j}^i}{\Delta t} = MC_v \left( \frac{T_{k-1,j}^{i+1} - T_{k,j}^{i+1}}{\Delta x} \right) - h_{k,j}^{i+1} A (T_{k,j}^{i+1} - T_{p_{k,j}}^{i+1}) - h_{k,j}^{i+1} A (T_{k,j+1}^{i+1} - T_{p_{k,j}}^{i+1}) \quad (72)$$

Método Cranck – Nicolson:

$$\begin{aligned}
MC \frac{T_{k,j}^{i+1} - T_{k+1,j}^i}{\Delta t} &= MC_v \frac{1}{2} \left( \frac{T_{k-1,j}^i - T_{k,j}^i}{\Delta x} + \frac{T_{k-1,j}^{i+1} - T_{k,j}^{i+1}}{\Delta x} \right) + \frac{1}{2} A \left[ h_{k,j}^{i+1} (T_{pk,j}^{i+1} - T_{k,j}^{i+1}) + h_{k,j}^i (T_{pk,j}^i - T_{k,j}^i) \right] \\
&+ \frac{1}{2} A \left[ h_{k,j}^i (T_{pk,j+1}^i - T_{k,j}^i) + h_{k,j}^{i+1} (T_{pk,j+1}^{i+1} - T_{k,j}^{i+1}) \right]
\end{aligned}
\tag{73}$$

Combinando as três equações citadas anteriormente e aplicando o tempo MR, artifício que definirá o método de resolução, obtém-se as equações para os fluidos e para as placas.

O valor de MR, pode ser 0,1 ou ½, para a resolução pelos métodos implícito, explícito e Cranck-Nicolson, respectivamente.

Assim tem-se as equações discretizadas para o produto, fluido de aquecimento e para as placas:

Produto e fluido de aquecimento:

$$\begin{aligned}
MC \frac{T_{k,j}^{i+1} - T_{k+1,j}^i}{\Delta t} &= MR \left\{ MC_v \left( \frac{T_{k-1,j}^i - T_{k,j}^i}{\Delta x} \right) - h_{k,j}^i A (T_{k,j}^i - T_{pk,j}^i) - h_{k,j}^i A (T_{k,j+1}^i - T_{pk,j+1}^i) \right\} \\
&+ (1 - MR) \left\{ MC_v \left( \frac{T_{k-1,j}^{i+1} - T_{k,j}^{i+1}}{\Delta x} \right) - h_{k,j}^{i+1} A (T_{k,j}^{i+1} - T_{pk,j}^{i+1}) - h_{k,j}^{i+1} A (T_{k,j+1}^{i+1} - T_{pk,j+1}^{i+1}) \right\}
\end{aligned}
\tag{74}$$

Placas intermediárias:

$$\begin{aligned}
MC \frac{T_{k,j}^{i+1} - T_{k+1,j}^i}{\Delta t} &= MR \left\{ h_{k,j}^i A (T_{k,j}^i - T_{pk,j}^i) - h_{k,j}^i A (T_{k,j}^i - T_{pk,j}^i) \right\} \\
&+ (1 - MR) \left\{ h_{k,j}^{i+1} A (T_{k,j}^{i+1} - T_{pk,j}^{i+1}) - h_{k,j}^{i+1} A (T_{k,j}^{i+1} - T_{pk,j}^{i+1}) \right\}
\end{aligned}
\tag{75}$$

Para as 'k' discretizações, o sistema de equações dos balanços de energia do produto, fluido de aquecimento e das placas é representado pela equação matricial:

$$[a] [T_{k,j}^{i+1}] = [constante]
\tag{76}$$

onde  $[a]$  é a matriz dos coeficientes das equações,  $[T_{k,j}^{i+1}]$  é a matriz das temperaturas no instante seguinte e a  $[constante]$  é a matriz dos termos independentes de cada equação, calculados com as temperaturas no instante anterior.

Desta maneira tem-se as seguintes equações de resolução, para os produtos e para a placa:

Produtos e fluido de aquecimento:

$$T(\text{produto})_{k,j}^{i+1} F1 + T(\text{produto})_{k-1,j}^{i+1} F2 + T(\text{placa})_{k,j}^{i+1} F3 + T(\text{placa})_{k,j+1}^{i+1} F4 = CF \quad (77)$$

onde:

$$F1 = \left[ \frac{MC}{\Delta t} - (1 - MR) \left\{ -\frac{MCv}{\Delta x} - h_{k,j}^{i+1} A - h_{k,j}^{i+1} A \right\} \right]; \quad (78)$$

$$F2 = - \left[ (1 - MR) \left\{ -\frac{MCv}{\Delta x} \right\} \right]; \quad (79)$$

$$F3 = - \left[ (1 - MR) \left\{ h_{k,j}^{i+1} A \right\} \right];$$

$$CF = T_{k,j}^i \left\{ -\frac{MC}{\Delta t} + MR \left\{ \frac{MCv}{\Delta x} - h_{k,j}^i A - h_{k,j}^i A \right\} + T_{k-1,j}^i \left[ \frac{MCv}{\Delta x} MR \right] \right\}; \quad (80)$$

$$+ T_{k,1,j}^i [h_{k,j}^i AM] + T_{k,j+1}^i [h_{k,j}^i AM]$$

Para a placa:

$$T(\text{placa})_{k,j}^{i+1} P1 + T_{k-1,j}^{i+1} P2 + T_{k,j}^{i+1} P3 = CP; \quad (81)$$

$$P1 = \left[ \frac{MC}{\Delta t} - (1 - MR) \left\{ -h_{k,j}^{i+1} A - h_{k,j}^{i+1} A \right\} \right]; \quad (82)$$

$$P2 = - \left[ (1 - MR) \left\{ h_{j-1,k}^{i+1} A \right\} \right]; \quad (83)$$

$$P3 = - \left[ (1 - MR) \left\{ h_{k,j}^{i+1} A \right\} \right]; \quad (84)$$

$$CP = T_{k,j}^i \left\{ -\frac{MC}{\Delta t} + MR \left\{ -h_{ek,j-1}^i A - h_{dk,j}^i A \right\} + T_{k,1,j}^i \left[ h_{ek,j-1}^i AM \right] + T_{k,j+1}^i \left[ h_{dk,j}^i AM \right] \right\} \quad (85)$$

;

Considerações:

- Os termos 'h<sub>e</sub>' e 'h<sub>d</sub>' referem-se ao coeficiente de troca de calor num mesmo canal, da placa esquerda e direita. Considerando-se a mesma viscosidade em qualquer ponto da largura do canal, tem-se que  $\eta = \eta_p$ . Assim sendo, para o cálculo do valor de nusselt,  $\eta/\eta_p = 1$  e o coeficiente de troca de calor é o mesmo para qualquer ponto da largura da placa.
- Os coeficientes convectivos no instante ( $h^{i+1}$ ) são calculados com as temperaturas no instante anterior, para ser possível a resolução da matriz de temperaturas.
- Apesar da densidade ser corrigida em função da temperatura, foi considerado que não há acúmulo de massa nos volumes de controle para o fluido de aquecimento e para o produto.

### 9.3 Anexo III – Figuras Obtidas em Ajustes de Parâmetros

Figuras dos ajustes das temperaturas para solução de k-Carragena, realizados para obtenção dos parâmetros  $\tau$  e  $K_p$  do PECC, onde os ensaios respectivos às figuras a seguir podem ser visualizados na Tabela 36.

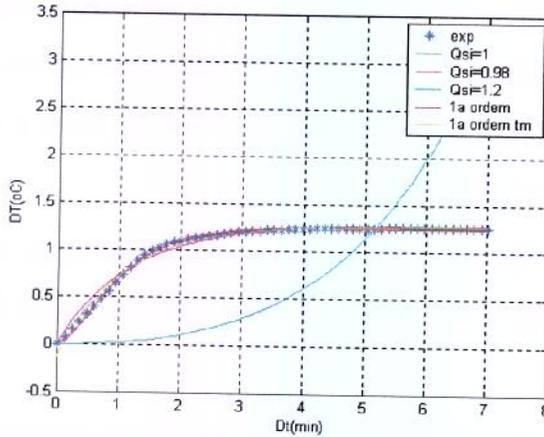


Figura 92 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 01 - Tabela 36

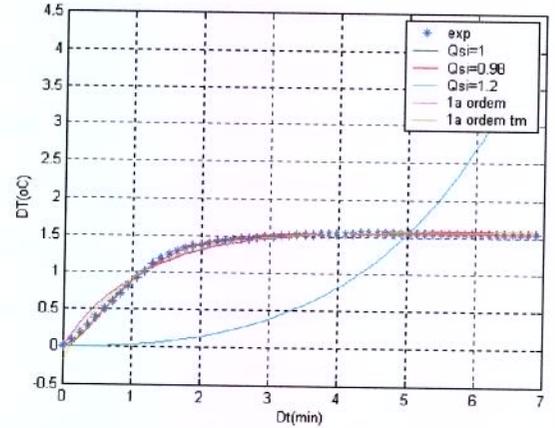


Figura 93 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 02 - Tabela 36

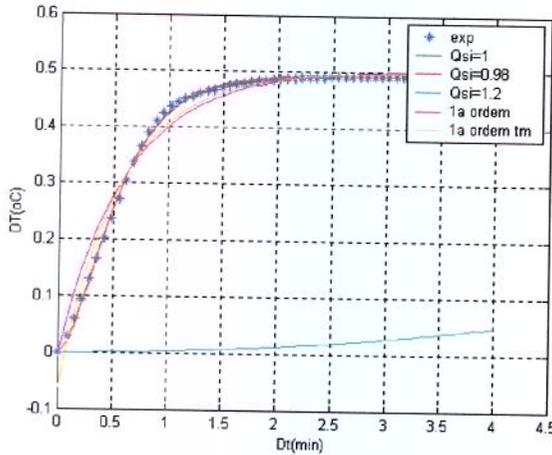


Figura 94 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 03 - Tabela 36

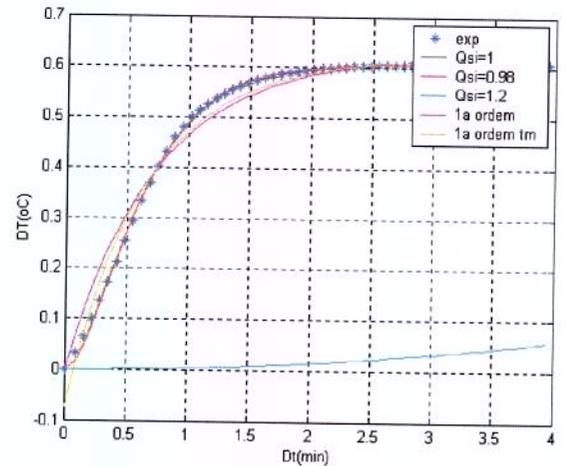


Figura 95 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 04 - Tabela 36

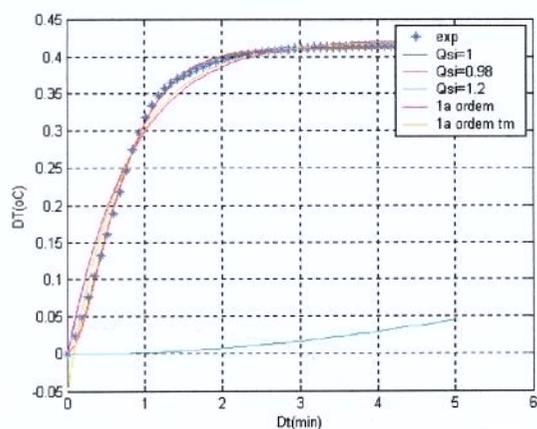


Figura 96 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 05 - Tabela 36

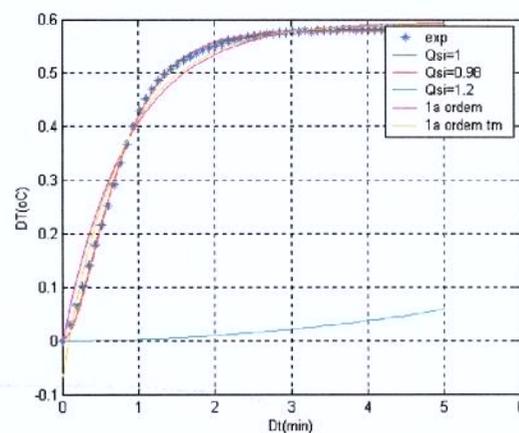


Figura 97 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 06 - Tabela 36

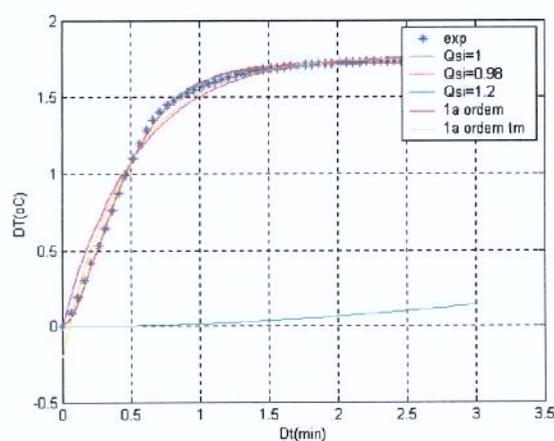


Figura 98 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 07 - Tabela 36

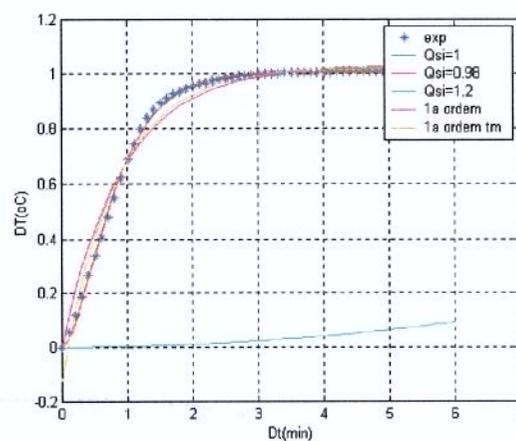


Figura 99 – Ajuste da  $\Delta T$  de saída do produto a diversos modelos matemáticos sob perturbação degrau, conforme FPCC – ensaio 08 - Tabela 36

#### 9.4 Anexo IV – Figuras Obtidas a Partir do Método da Curva de Reação

Figuras geradas na obtenção dos parâmetros  $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$  a partir do método da curva de reação para a goma-Xantana.

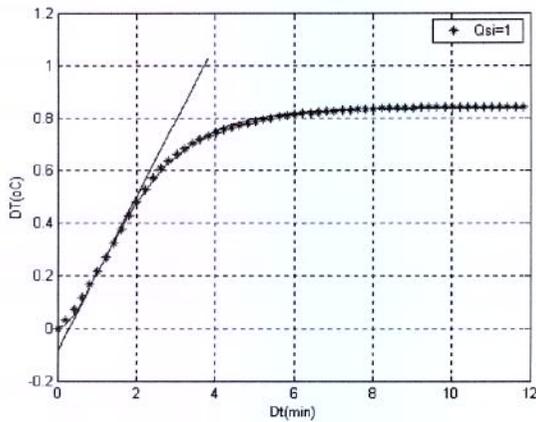


Figura 100 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 01 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

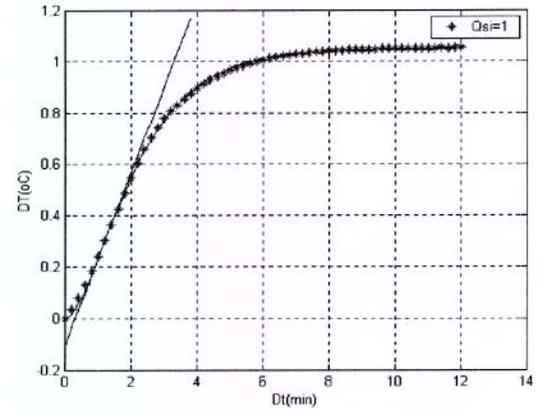


Figura 101 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 02 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

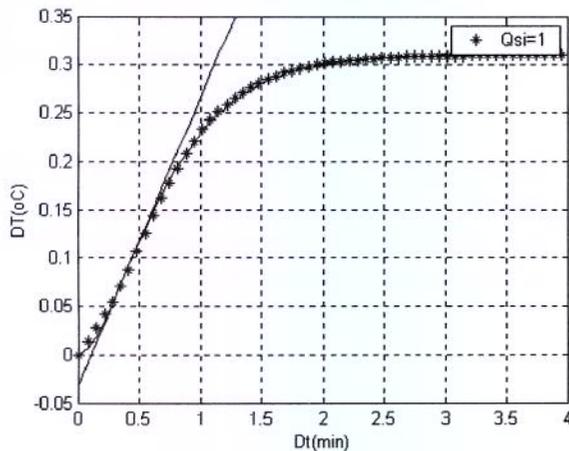


Figura 102 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 03 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

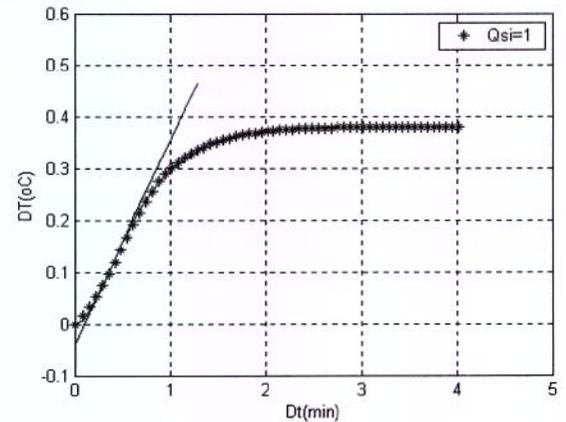


Figura 103 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 04 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

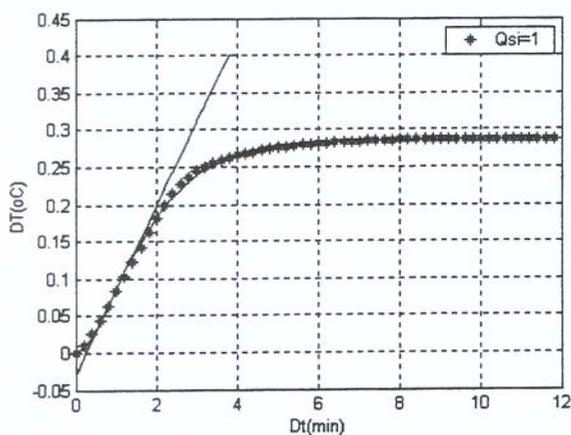


Figura 104 - Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 05 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

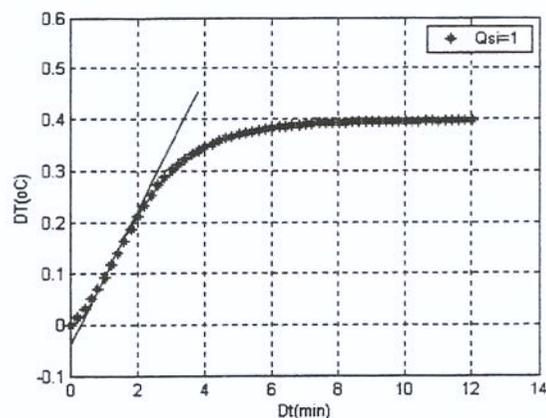


Figura 105 - Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 06 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

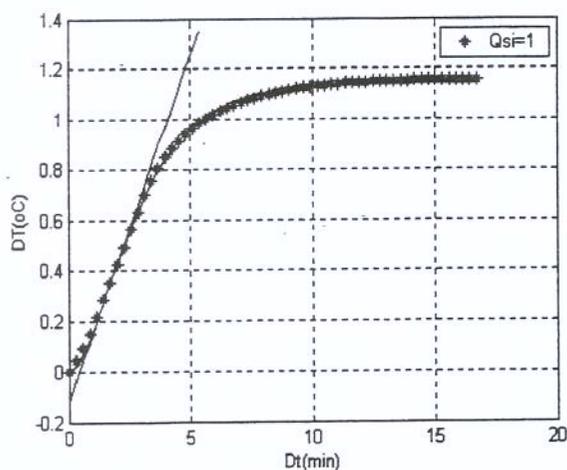


Figura 106 - Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 07 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

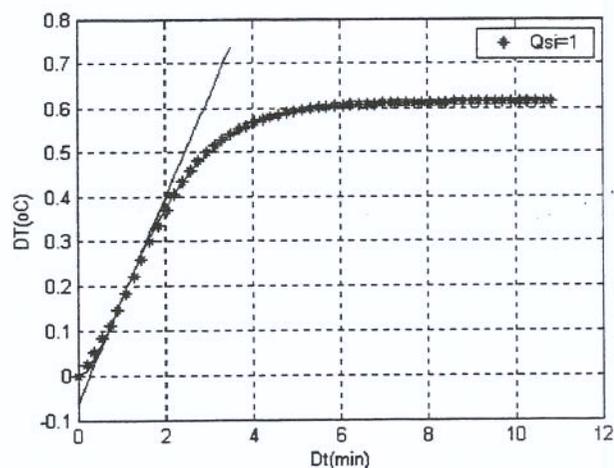


Figura 107 - Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 08 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

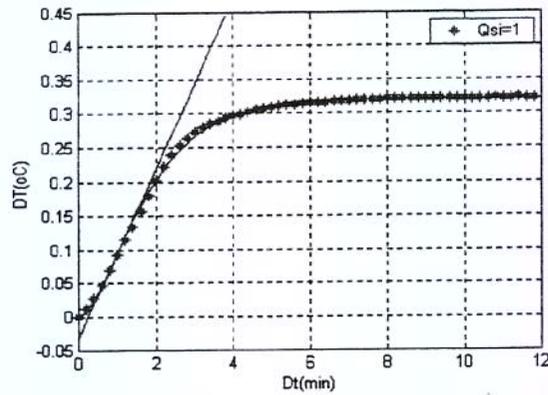


Figura 108 – Curva de reação da temperatura de saída do produto - Ensaio 09 do PFCC (Tabela 23) para obtenção dos parâmetros de sintonia ( $K_p$ ,  $T_D$  e  $Z$ ).

### 9.5 Anexo V – Perfis Internos Comparativos Entre Concentrações

Curvas de reação da temperatura dos produtos a 1, 2 e 3%, sob perturbação degrau na vazão do produto de  $-11,375\%$ , por canal e na posição de saída dos canais k6.

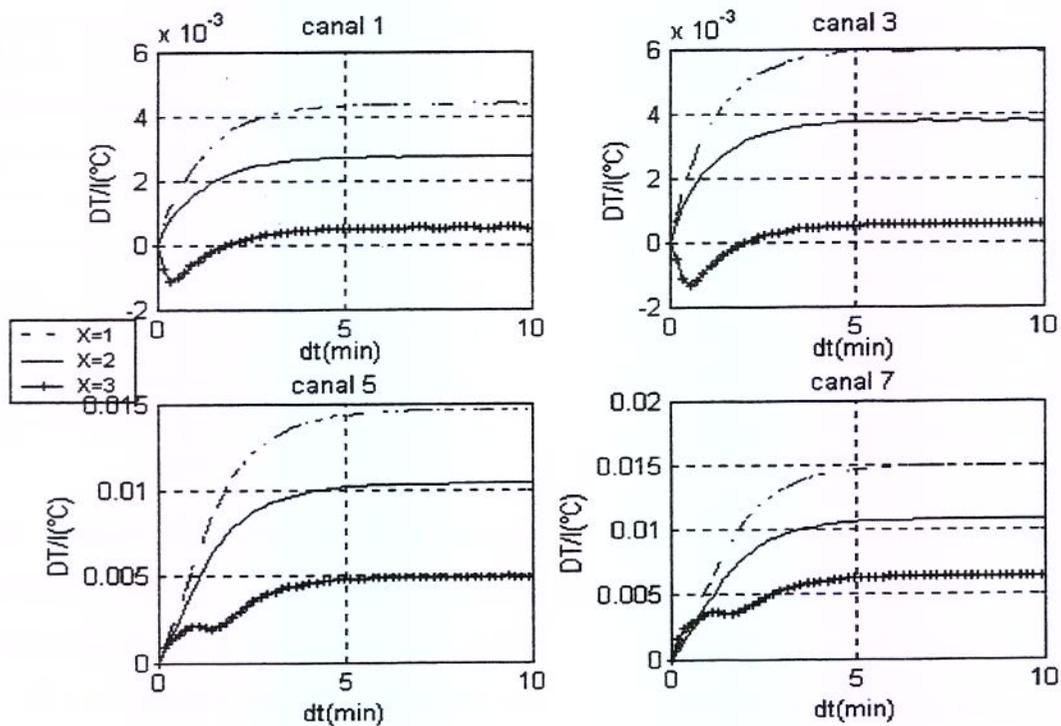


Figura 109 – Curvas de Reação para Perturbação na Vazão da goma-Xantana, por Canal e para a Subdivisão do Canal ( $k_6$ ), para Comparação entre Diferentes Concentrações.

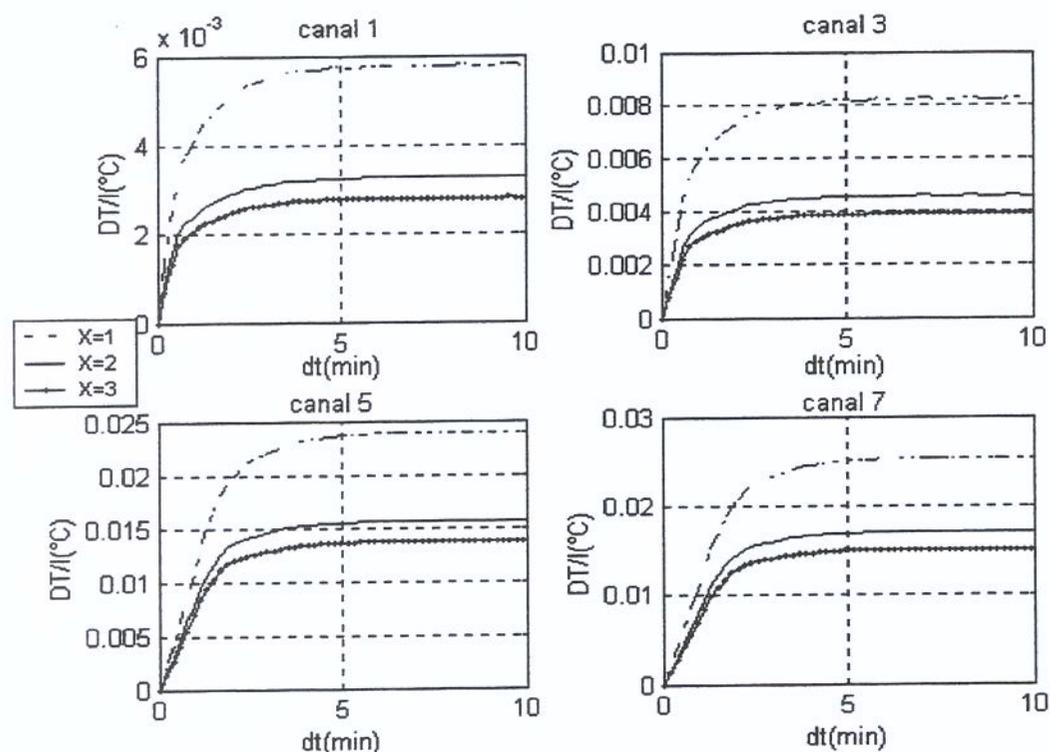


Figura 110 – Curvas de Reação para Perturbação na Vazão da *k*-Carragena, por Canal e para a Subdivisão do Canal ( $k_6$ ), para Comparação entre Diferentes Concentrações.

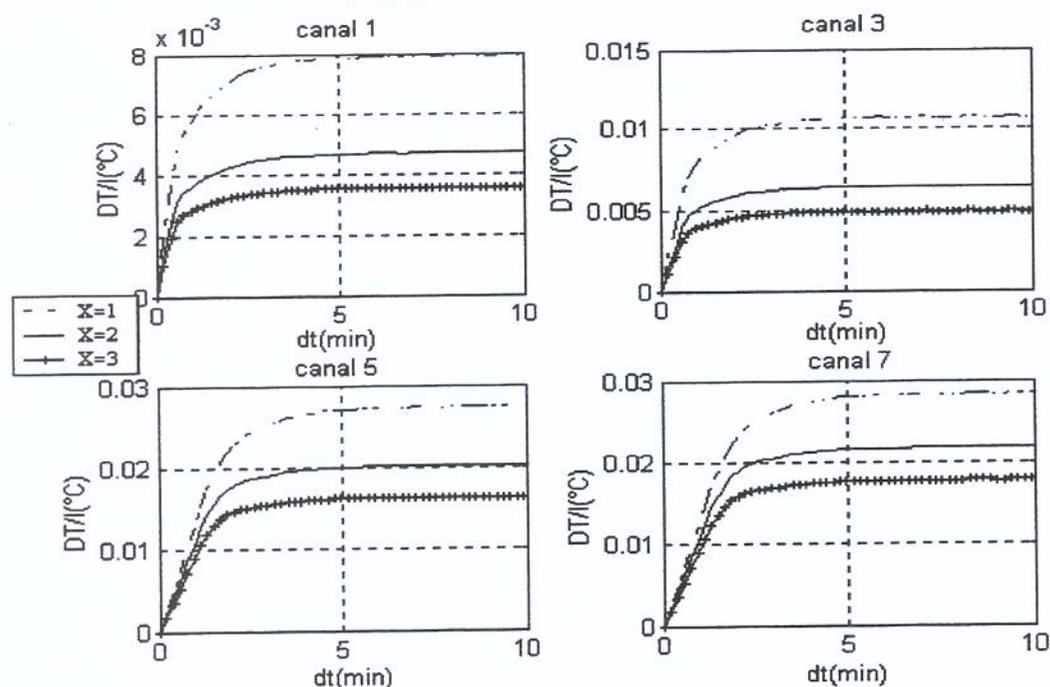


Figura 111 – Curvas de Reação para Perturbação na Vazão da Pectina, por Canal e para a Subdivisão do Canal ( $k_6$ ), para Comparação entre Diferentes Concentrações