

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

***AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DA CURVA DE RESPOSTA DA
TEMPERATURA DE SAÍDA DE FLUIDOS NEWTONIANOS NO
PROCESSO DE RESFRIAMENTO EM TROCADOR DE CALOR DE
TUBO DUPLO***

Ana Carolina Amaral Gratão

Engenheira de Alimentos

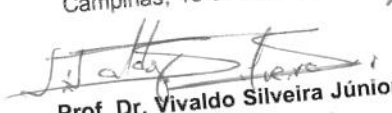
Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.

Orientador

PARECER

Este exemplar corresponde à
redação final da tese defendida por
Ana Carolina Amaral Gratão,
aprovado pela Comissão Julgadora
em 16 de abril de 2002.

Campinas, 16 de abril 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, março / 2002

UNIDADE 80
CHAMADA T/UNICAMP
G77a
EX
OMBO BC/ 49158
PROC 16-837/02
C DX
PREÇO R\$11,00
DATA
Nº CPD

CM00167674-1

18 ID 241033

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

Gratão, Ana Carolina Amaral

G77a Avaliação experimental da curva de resposta da temperatura de saída de fluidos newtonianos no processo de resfriamento em trocador de calor de tubo duplo / Ana Carolina Amaral Gratão. – Campinas, SP: [s.n.], 2002.

Orientador: Vivaldo Silveira Junior

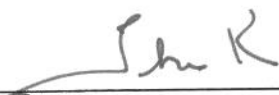
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos

1.Resfriamento. 2.Fluidos newtonianos. 3.Trocador de calor.
I.Silveira Junior, Vivaldo. II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.

BANCA EXAMINADORA

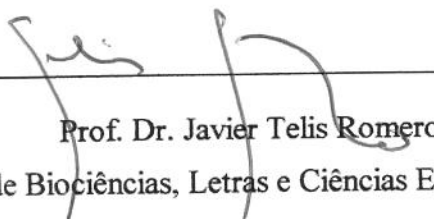


Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.
Departamento de Engenharia de Alimentos - UNICAMP



Prof. Dr. Theo Guenter Kieckbusch
Faculdade de Engenharia Química - UNICAMP

Dr. Alfredo de Almeida Vitali
Instituto de Tecnologia de Alimentos – Fruthotec



Prof. Dr. Javier Telis Romero
Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas - UNESP

AGRADECIMENTOS

À UNICAMP e ao Departamento de Engenharia de Alimentos desta Faculdade, por enriquecerem minha formação acadêmica.

À CAPES, pelo suporte financeiro que tornou possível a realização deste trabalho.

Ao Vivaldo, pela orientação, dedicação, paciência, amizade e pelo apoio dado nos momentos difíceis.

Ao Javier, que abriu meus olhos e me deu a oportunidade de estar aqui hoje.

Ao Izaías, pela “força”, pela amizade e companheirismo.

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

Ao meu pai, pela força espiritual!

À minha mãe, Dona Ana, e meus irmãos, Ana Claudia, Alexandre e Ana Paula pelo amor, amizade e acolhimento sempre!

Aos meus sobrinhos, Gigi e Léo, por me darem tantas alegrias.

À Maria Isabel, pela amizade, apoio e compreensão.

Ao Flavio, por tantos favores!

Aos meus colegas do laboratório, pelos bons e divertidos momentos juntos.

Ao meu gatinho lindo, Stefano, pela ajuda nas madrugadas e por me dar tanto amor e carinho!!!

*"Escale as montanhas
e delas receba as boas influências.
A paz da natureza fluirá para dentro de você,
como a luz do sol flui para o interior das árvores.
Os ventos lhe trarão o frescor;
as tempestades, sua energia;
enquanto as preocupações irão se soltando
como as folhas que se desprendem..."*

John Muir

ÍNDICES

ÍNDICE DE TABELAS.....	X
ÍNDICE DE FIGURAS.....	XIV
NOMENCLATURA	XXVI
RESUMO	XXX
ABSTRACT	XXXI
I. INTRODUÇÃO	1
II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
II. 1 – TROCADORES DE CALOR DE TUBO DUPLO	3
II. 2 – EQUAÇÕES BÁSICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR.....	4
II. 2. 1 – Considerações hidrodinâmicas	8
II. 3 – PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DOS FLUIDOS.....	8
II. 4 – PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS FLUIDOS	11
II. 5 – AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO	14
II. 6 – CONTROLE DE PROCESSOS.....	17
II. 6. 1 – Respostas Transientes.....	18
II. 6. 2 – Sistemas de Controle Automático.....	23
II. 6. 3 – Estratégias de Controle	24
II. 6. 4 – Rede Fieldbus.....	27
II. 7 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL	28
III - MATERIAIS E MÉTODOS	30
III. 1 – MATERIAIS.....	30
III. 1. 1 - Descrição da Planta de Tratamento Térmico com Trocador de Calor de Tubo Duplo.....	30
III. 1. 2 – O Trocador de Calor de Tubo Duplo.....	32
III. 1. 3 - Produtos Alimentícios.....	34

III. 1. 4 - Caracterização dos Sólidos Solúveis	35
III. 1. 5 – Caracterização das Propriedades Termo-Físicas dos Fluidos	35
III. 1. 6 – Caracterização das Propriedades Reológicas dos Fluidos	36
III. 1. 7 – Sistema Remoto de Monitoração e Automação	37
III. 1. 7. 1 - Sensores/Transdutores	38
III. 1. 7. 2 - Sistema de Aquisição de Dados	39
III. 1. 8 – Materiais para Análises dos Resultados	40
III. 2 – METODOLOGIA.....	40
III. 2. 1 - Planejamento de Ensaios	40
III. 2. 1. 1 – Ensaios de Perturbações Individuais.....	42
III. 2. 1. 2 – Ensaios de Perturbações Simultâneas: Planejamento Experimental ..	45
III. 2. 2 – Considerações quanto à Localização dos Sensores de Temperatura.....	48
III. 2. 3 – Métodos de Avaliação dos Resultados	49
III. 2. 3. 1 – Métodos de Análises dos Resultados das Perturbações Individuais...	49
III. 2. 3. 1. 1 – Históricos Adimensionais	50
III. 2. 3. 1. 2 - Fator de Sensibilidade	51
III. 2. 3. 2 – Métodos de Análises dos Resultados das Perturbações Simultâneas ..	52
III. 2. 3. 3 – Estimativa Experimental do Coeficiente Global de Transferência de	
Calor, U_{exp}	53
IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES	55
IV. 1 – ANÁLISES DE SÓLIDOS SOLÚVEIS DOS FLUIDOS	55
IV. 2 – ANÁLISES DA REOLOGIA DOS FLUIDOS	55
IV. 3 – ANÁLISES DAS PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS	57
IV. 3. 1 – Históricos Experimentais.....	58
IV. 3. 2 – Ajuste dos Dados Experimentais de Diferença de Temperatura dos	
Produtos sob Perturbações Individuais ao Modelo de Segunda Ordem.....	61
IV. 3. 3 – Comparações das Curvas de Resposta da Diferença de Temperatura de	
Saída de cada Produto sob Perturbações Individuais Positivas e Negativas em Amplitudes	
Diferentes.	67

IV. 3. 4 – <i>Comparações das Curvas de Resposta da Diferença de Temperatura de Saída entre os Diferentes Produtos Testados sob as mesmas Perturbações Individuais Positivas e Negativas.</i>	73
IV. 3. 5 – <i>Análises do Fator de Sensibilidade</i>	76
IV. 4 – ANÁLISES DAS PERTURBAÇÕES SIMULTÂNEAS	78
IV. 4. 1 - <i>Ajuste dos Dados Experimentais da Diferença de Temperatura de Saída da Solução de Sacarose 18% ao Modelo de Segunda Ordem</i>	79
IV. 4. 2 – <i>Resultados do PFCC para a Solução de Sacarose 18%.</i>	82
IV. 4. 2. 1 – <i>Análises dos Efeitos das Perturbações Simultâneas das Variáveis Independentes sobre a Diferença de Temperatura de Saída do Produto.</i>	84
IV. 4. 2. 2 – <i>Modelo Quadrático para Predição da Diferença de Temperatura de Saída da Solução de Sacarose 18% sob Perturbações Simultâneas das Variáveis de Entrada.</i>	90
IV. 4. 2. 3 – <i>Análises dos Efeitos das Perturbações Simultâneas nas Variáveis Independentes sobre os Parâmetros t_d e z da Curva de Resposta Transiente.</i>	92
IV. 4. 3. – <i>Ajuste dos Dados Experimentais da Diferença de Temperatura de Saída do Açúcar Invertido ao Modelo de Segunda Ordem.</i>	97
IV. 4. 4 – <i>Resultados do PFCC para o Açúcar Invertido</i>	98
IV. 4. 4. 1 – <i>Análise dos Efeitos das Perturbações nas Variáveis Independentes sobre a Diferença de Temperatura de Saída do Açúcar Invertido.</i>	99
IV. 4. 4. 2 – <i>Modelo Quadrático para Predição da Temperatura de Saída do Açúcar Invertido sob Perturbações nas Variáveis de Entrada.</i>	104
IV. 4. 4. 3 – <i>Análise dos Efeitos das Perturbações Simultâneas das Variáveis Independentes sobre os Parâmetros t_d e z da Curva de Resposta Transiente de Diferença de Temperatura de Saída do Açúcar Invertido.</i>	106
IV. 5 – ANÁLISES DOS VALORES EXPERIMENTAIS ESTIMADOS PARA O COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA, U_{EXP}	111
IV. 6 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELO FATOR DE SENSIBILIDADE, CURVAS DE RESPOSTA TRANSIENTE E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.	113
V – CONCLUSÕES	115

VI – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	117
VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	119
APÊNDICE A	124
A. 1 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DAS TEMPERATURAS DE SAÍDA DAS SOLUÇÕES DE SACAROSE 8% E 18% E DO AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO SOB AS PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS NAS VARIÁVEIS DE ENTRADA.....	124
APÊNDICE B	126
B. 1 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DA ÁGUA.....	126
B. 2 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM DAS PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DA SOLUÇÃO DE SACAROSE 8%.	132
B. 3 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DA SOLUÇÃO DE SACAROSE 18%.....	138
B. 4 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DO AÇÚCAR INVERTIDO.	144
APÊNDICE C	154
C. 1 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES SIMULTÂNEAS DA SOLUÇÃO DE SACAROSE 18%.	154
C. 2 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTE AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES SIMULTÂNEAS DO AÇÚCAR INVERTIDO.....	163

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Constantes recomendadas por Cohen & Coon para sintonia de controladores. .27	27
Tabela 2 – Especificações do trocador de calor tubo duplo testado.....33	33
Tabela 3 - Composição básica do açúcar fornecida pelo fabricante (Fonte: Usina da Barra S/A Açúcar e Álcool).....34	34
Tabela 4 - Especificações do açúcar invertido fornecidas pelo fabricante e resultados analíticos do lote utilizado nos ensaios (Fonte: Açúcar Guarani S/A).35	35
Tabela 5 - Condições iniciais e amplitude de perturbações individuais utilizadas nos ensaios da água e das soluções de sacarose 8 e 18%.....43	43
Tabela 6 - Ensaios de perturbações individuais realizados para a água e para as soluções de sacarose a 8 e 18% a partir das condições iniciais C I-1 (Tep=25°C, mp=217 kg/h, Vpp=1400 L/h).43	43
Tabela 7 - Condições iniciais e amplitude de perturbações individuais utilizadas nos ensaios do açúcar invertido.44	44
Tabela 8 - Ensaios de perturbações individuais realizados para o açúcar invertido a partir das condições iniciais C I-1 (Tep=25°C, mp=217 kg/h, Vpp=1400 L/h), C I-2 (Tep=19°C, mp=217 kg/h, Vpp=1400 L/h) e C I-3 (Tep=33°C, mp=217 kg/h, Vpp=1400 L/h).44	44
Tabela 9 - Condições iniciais do processo nos ensaios de perturbações simultâneas para a solução de sacarose 18% e para o açúcar invertido.....46	46
Tabela 10 - Níveis de Perturbações do Planejamento 2 ³ para a solução de sacarose 18%. .46	46
Tabela 11 - Níveis de Perturbações do Planejamento 2 ³ para o açúcar invertido.....46	46
Tabela 12 - Planejamento fatorial composto central para a solução de sacarose 18% e para o açúcar invertido para realização das perturbações simultâneas.47	47

Tabela 13 – Concentração das soluções de sacarose a 8 e 18% e do açúcar invertido em °Brix.	55
Tabela 14 - Reologia do açúcar invertido de -2 a 37°C.....	56
Tabela 15 - Ajuste dos parâmetros para o cálculo da viscosidade do açúcar invertido.....	56
Tabela 16 - Tempos médios calculados para desconto ao longo dos quatro ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada para cada produto testado.	58
Tabela 17 - Parâmetros das funções ajustadas aos pontos experimentais da diferença de temperatura de saída da água e das soluções de sacarose 8% e 18%, após perturbações individuais, e coeficientes de correlação.....	61
Tabela 18 - Parâmetros das funções ajustadas aos pontos experimentais de diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, após perturbações individuais, e coeficiente de correlação.	66
Tabela 19 - Resumo das respostas transientes simétricas sob perturbações individuais das mesmas grandezas, para cada produto testado.	72
Tabela 20 - Fatores de sensibilidade das variáveis perturbadas nos ensaios E01 a E12 para a água e para as soluções de sacarose 8 e 18%, e nos ensaios E01 a E20 para o açúcar líquido invertido.	76
Tabela 21 - Tempos descontados para realização das perturbações simultâneas de vazões de produto e de propileno glicol, após perturbação da temperatura de entrada do produto.	79
Tabela 22 - Parâmetros das funções ajustadas aos pontos experimentais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações simultâneas das variáveis de entrada e coeficientes de correlação.....	81

Tabela 32 - Efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis independentes sobre o parâmetro z da curva de resposta transiente da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido. 107

Tabela 33 - Valores de $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$ e R^2 obtidos pelo ajuste do modelo probabilístico quadrático para predição das respostas t_d e z 109

Tabela 34— Resultados de U_{exp} nos ensaios de perturbações individuais. 112

Tabela 35 – Resultados de U_{exp} nos ensaios de perturbações simultâneas. 112

Tabela 36 - Ordem de importância das perturbações individuais e simultâneas das variáveis de entrada e interações sobre a temperatura de saída dos produtos, obtidos pelos diferentes métodos de análise dos resultados. 113

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Trocador de calor com tubo duplo (Fonte: KERN, 1987).....	4
Figura 2 - Formação do açúcar líquido invertido (Fonte: www.klickeducacao.com.br).....	15
Figura 3 - Resposta adimensional de um sistema de primeira ordem a uma perturbação degrau (Fonte: STEPHANOPOULOS, 1984).....	19
Figura 4 - Respostas adimensionais de um sistema de segunda ordem a uma perturbação degrau (Fonte: STEPHANOPOULOS, 1984).....	21
Figura 5: Respostas adimensionais ao degrau de sistemas de primeira ordem associados em série.	22
Figura 6 – Sistemas de primeira ordem capacitivos em série.	22
Figura 7 - Resposta por retardo de transporte a diversos estímulos (Fonte: COUGHANOWR & KOPPEL, 1978).....	23
Figura 8 – Diagrama de blocos para um sistema de controle simples em malha fechada. ...	24
Figura 9 - Exemplo de curva de resposta de um processo do tipo “S”.....	26
Figura 10 - Esquema da planta de tratamento térmico com trocador de calor de tubo duplo para aquisição de dados <i>on-line</i>	30
Figura 11 – Esquema simplificado do sistema de resfriamento de refrigerante secundário.	32
Figura 12 – Trocador de calor de tubo duplo utilizado nos ensaios.	33
Figura 13 - Esquema da arquitetura para aquisição de dados <i>on-line</i>	38
Figura 14 – Medidor magnético de vazão mássica, volumétrica, densidade e temperatura.	39
Figura 15 - Fluxograma das etapas a serem seguidas para realização dos ensaios.	41

Figura 16 - Distâncias dos sensores de temperatura para a entrada e a saída do trocador e volume de controle para análises.....	48
Figura 17 - Reogramas do açúcar invertido a diferentes temperaturas.	57
Figura 18 - Curvas de resposta experimental das temperaturas de saída da água após perturbações individuais nas variáveis de entrada.....	59
Figura 19 – Ensaio E03 de perturbação individual de vazão da água nas C I-1 ($m_p=217$ kg/h) e perturbação de $\Delta m_p=-50$ kg/h.	62
Figura 20 – Ensaio E05 da água de perturbação individual de vazão de propileno glicol: C I-1, $V_{pp}=1364,71$ L/h e perturbação $\Delta V_{pp}=-398,48$ L/h.	64
Figura 21 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da água após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.	68
Figura 22 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 8% após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.	69
Figura 23 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18% após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.	70
Figura 24 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.....	71
Figura 25 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída dos diferentes produtos testados, após as perturbações individuais negativas e positivas da variável temperatura de entrada dos produtos.....	73
Figura 26 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída dos diferentes produtos testados, após as perturbações individuais negativas e positivas da variável vazão dos produtos.	74

Figura 27 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída dos diferentes produtos testados, após as perturbações individuais negativas e positivas da variável vazão de propileno glicol.....	75
Figura 28 – Gráficos de barras para análise visual dos efeitos das perturbações individuais nas variáveis de entrada para cada produto: (a) Água; (b) Sacarose 8%; (c) Sacarose 18%; d) Açúcar Invertido.....	78
Figura 29 – Curva de resposta do processo para obtenção dos valores de t_d e z , exemplificada pelo E02 de perturbações simultâneas nos níveis [(+1) T_{ep} , (-1) m_p , (-1) V_{pp}].	83
Figura 30 - Gráfico de Pareto para análises visuais dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre a diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%.	85
Figura 31 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva.	86
Figura 32 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa.	87
Figura 33 - Curvas de resposta ajustadas da temperatura de saída da solução de sacarose 18% nos ensaios de E09 a E14 (Tabela 23) de perturbações simultâneas das variáveis de entrada nos níveis axiais.	88

Figura 34 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva. ...	89
Figura 35 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa. ...	90
Figura 36 - Superfícies de resposta da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18% (DTsp) em função das seguintes perturbações: (a) vazão de produto e temperatura de entrada de produto, (b) vazão de produto e vazão de propileno glicol, (c) vazão de propileno glicol e temperatura de entrada do produto.....	91
Figura 37 - Gráfico de Pareto para análise dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro t_d da curva de resposta da temperatura de saída solução de sacarose 18%.....	93
Figura 38 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro z da curva de resposta da temperatura de saída solução de sacarose 18%.....	94
Figura 39 - Superfícies de resposta de t_d [(a), (b) (c)] e z [(d), (e), (f)], em função das seguintes perturbações: (a), (d) temperatura de entrada e vazão da solução de sacarose 18%, (b), (e) vazões de propileno glicol e da solução de sacarose 18%, (c), (f) temperatura de entrada do produto e vazão de propileno glicol.	96
Figura 40 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre a diferença de temperatura de saída do açúcar invertido.	100

Figura 41 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa.....	101
Figura 42 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva.....	102
Figura 43 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa.	103
Figura 44 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva.	103
Figura 45 – Superfícies de resposta da DTsp do açúcar invertido em função das seguintes perturbações: (a) temperatura de entrada e na vazão de produto, (b) vazão de propileno glicol e temperatura de entrada de produto, (c) vazões de propileno glicol e de produto. .	105
Figura 46 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro de controle td para o açúcar invertido.	107
Figura 47 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro de controle z para o açúcar invertido.	108
Figura 48 - Superfícies da resposta de td e z em função das seguintes perturbações: (a), (d) temperatura de entrada e vazão do açúcar invertido, (b), (e) vazões de propileno glicol e do açúcar invertido, (c), (f) temperatura de entrada do produto e vazão de propileno glicol..	110

Figura A. 1. 1 - - Curvas de resposta experimental da temperatura de saída da solução de sacarose 8%, sob perturbações individuais nas variáveis de entrada	124
Figura A. 1. 1 - Curvas de resposta experimental da temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações individuais nas variáveis de entrada.	124
Figura A. 1. 2 - Curvas de resposta experimental da temperatura de saída do açúcar invertido, obtidas após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.....	125
Figura B. 1. 1 - Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada da água: (a) E01 - perturbação $\Delta T_{ep} = -4^{\circ}\text{C}$; (b) E02 - perturbação $\Delta T_{ep} = +4^{\circ}\text{C}$	126
Figura B. 1. 1 - Ensaios de perturbações individuais de vazão da água: (a) E03 - perturbação $\Delta m_p = -50 \text{ kg/h}$; (b) E04 - perturbação $\Delta m_p = +50 \text{ kg/h}$	127
Figura B. 1. 2 - Ensaios da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol: (a) E05 - perturbação $\Delta V_{pp} = -467 \text{ L/h}$; (b) E06 - perturbação $\Delta V_{pp} = +467 \text{ L/h}$	128
Figura B. 1. 3 - Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada da água: (a) E07 - perturbação $\Delta T_{ep} = -8^{\circ}\text{C}$; (b) E08 - perturbação $\Delta T_{ep} = +8^{\circ}\text{C}$	129
Figura B. 1. 4 - Ensaios de perturbações individuais de vazão da água: (a) E09 - perturbação $\Delta m_p = -100 \text{ kg/h}$; (b) E10 - perturbação $\Delta m_p = +100 \text{ kg/h}$	130
Figura B. 1.5 - Ensaios da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol: (a) E11 - perturbação $\Delta V_{pp} = -934 \text{ L/h}$; (b) E12 - perturbação $\Delta V_{pp} = +934 \text{ L/h}$	131
Figura B. 2. 1 - Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada a solução de sacarose 8%: (a) E01 - perturbação $\Delta T_{ep} = -4^{\circ}\text{C}$; (b); E02 - perturbação $\Delta T_{ep} = +4^{\circ}\text{C}$. 132	
Figura B. 2. 2 - Ensaios de perturbações individuais de vazão solução de sacarose 8%: (a) E03 - perturbação $\Delta m_p = -50 \text{ kg/h}$; (b) E04 - perturbação $\Delta m_p = +50 \text{ kg/h}$	133

Figura B. 2. 3 – Ensaios de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 8%: (a) E05 – perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h; (b) E06 - perturbação $\Delta m_{pp}=+467$ L/h.	134
Figura B. 2. 4 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada da solução de sacarose 8%: (a) E07 – perturbação $\Delta T_{ep}=-8^{\circ}\text{C}$; (b); E08 - perturbação $\Delta T_{ep}=+8^{\circ}\text{C}$..	135
Figura B. 2. 5 – Ensaios de perturbações individuais de vazão da solução de sacarose 8%: (a) E09 – perturbação $\Delta m_{pp}=-100$ kg/h; (b) E10 - perturbação $\Delta m_{pp}=+100$ kg/h.	136
Figura B. 2. 6 – Ensaios da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 8%: (a) E11- perturbação $\Delta V_{pp}=-934$ L/h; (b) E12 - perturbação $\Delta V_{pp}=+934$ L/h.....	137
Figura B. 3. 1 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada a solução de sacarose 18%: (a) E01 – perturbação $\Delta T_{ep}=-4^{\circ}\text{C}$; (b); E02 - perturbação $\Delta T_{ep}=+4^{\circ}\text{C}$	138
Figura B. 3. 2 – Ensaios de perturbações individuais de vazão solução de sacarose 18%: (a) E03 – perturbação $\Delta m_{pp}=-50$ kg/h; (b) E04 - perturbação $\Delta m_{pp}=+50$ kg/h.	139
Figura B. 3. 3 – Ensaios de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 18%: (a) E05 – perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h; (b) E06 - perturbação $\Delta V_{pp}=+467$ L/h.	140
Figura B. 3. 4 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada da solução de sacarose 18%: (a) E07 – perturbação $\Delta T_{ep}=-8^{\circ}\text{C}$; (b); E08 - perturbação $\Delta T_{ep}=+8^{\circ}\text{C}$	141
Figura B. 3. 5 – Ensaios de perturbações individuais de vazão da solução de sacarose 18%: (a) E09 - perturbação $\Delta m_{pp}=-100$ kg/h; (b) E10 - perturbação $\Delta m_{pp}=+100$ kg/h..	142

Figura B. 3. 6 – Ensaios da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 18%: (a) E11 – perturbação $\Delta V_{pp}=-934$ L/h; (b) E12 – perturbação $\Delta V_{pp}=+934$ L/h.....	143
Figura B. 4. 1 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada do açúcar invertido na C I-1: (a) E01 – perturbação $\Delta T_{ep}=-3$ °C, (b) E02 - perturbação $\Delta T_{ep}=+3$ °C.	144
Figura B. 4. 2 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-1: (a) E03 - perturbação $\Delta m_p=-50$ kg/h, (b) E04 - perturbação $\Delta m_p=+50$ kg/h.	145
Figura B. 4. 3 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-1: (a) E05 - perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h, (b) E06 - perturbação $\Delta V_{pp}=+467$ L/h.	146
Figura B. 4. 4 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada do açúcar invertido na C I-1: (a) E07 - perturbação $\Delta T_{ep}=-6$ °C, (b) E08 - perturbação $\Delta T_{ep}=+6$ °C.	147
Figura B. 4. 5 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-1: (a) E09 - perturbação $\Delta m_p=-83$ kg/h, (b) E10 - perturbação $\Delta m_p=+83$ kg/h.	148
Figura B. 4. 6 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-1: (a) E11 - perturbação $\Delta V_{pp}=-934$ L/h, (b) E12 - perturbação $\Delta V_{pp}=+934$ L/h.	149
Figura B. 4. 7 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-2: (a) E13 - perturbação $\Delta m_p=-50$ kg/h, (b) E14 - perturbação $\Delta m_p=+50$ kg/h.	150

Figura B. 4. 8 – Ensaio de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-2: (a) E15 - perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h, (b) E16 - perturbação $\Delta V_{pp}=+467$ L/h.....	151
Figura B. 4. 9 – Ensaio de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-3: (a) E17 - perturbação $\Delta m_p=-83$ kg/h, (b) E18 - perturbação $\Delta m_p=+83$ kg/h.....	152
Figura B. 4. 10 – Ensaio de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-3: (a) E19 - perturbação $\Delta V_{pp}=-934$ L/h, (b) E20 - perturbação $\Delta V_{pp}=+934$ L/h.....	153
Figura C. 1. 1 - Ensaio 01 de perturbação simultânea da sacarose 18%: pert. [$(-3\text{ }^{\circ}\text{C})$ Tep, (-50 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].....	154
Figura C. 1. 2 - Ensaio 02 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [$(+9^{\circ}\text{C})$ Tep, (-50 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].....	154
Figura C. 1. 3 - Ensaio 03 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(-3°C) Tep, $(+150\text{ kg/h})$ mp, (-385 L/h) Vpp].	155
Figura C. 1. 4 - Ensaio 04 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [$(+9^{\circ}\text{C})$ Tep, $(+150\text{ kg/h})$ mp, (-385 L/h) Vpp].....	155
Figura C. 1. 5 - Ensaio 05 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(-3°C) Tep, (-50 kg/h) mp, $(+1155\text{ L/h})$ Vpp].	156
Figura C. 1. 6 - Ensaio 06 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [$(+9\text{ }^{\circ}\text{C})$ Tep, (-50 kg/h) mp, $(+1155\text{ L/h})$ Vpp].	156
Figura C. 1. 7 - Ensaio 07 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(-3°C) Tep, $(+150\text{ kg/h})$ mp, $(+1155\text{ L/h})$ Vpp].....	157

Figura C. 1. 8 - Ensaio 08 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+9°C) Tep, (+150 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].....	157
Figura C. 1. 9 - Ensaio 09 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+13,1 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].	158
Figura C. 1. 10 - Ensaio 10 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(-7,1 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].	158
Figura C. 1. 11 - Ensaio 11 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+218,2 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].....	159
Figura C. 1. 12 - Ensaio 12 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (-118,2 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].	159
Figura C. 1. 13 - Ensaio 13 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+1689,9 L/h) Vpp].....	160
Figura C. 1. 14 - Ensaio 14 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (-909,8 L/h) Vpp].	160
Figura C. 1. 15 - Ensaio 15 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].	161
Figura C. 1. 16 - Ensaio 16 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].	161
Figura C. 1. 17 - Ensaio 17 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].	162
Figura C. 2. 1 - Ensaio 01 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-3 °C) Tep, (-35 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].	163

Figura C. 2. 2 - Ensaio 02 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9°C) Tep, (-35 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].....	163
Figura C. 2. 3 - Ensaio 03 de perturbação simultânea do açúcar invertido: [(-3°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (-385L/h) Vpp].	164
Figura C. 2. 4 - Ensaio 04 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (-385L/h) Vpp].....	164
Figura C. 2. 5 - Ensaio 05 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-3°C) Tep, (-35 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].	165
Figura C. 2. 6 - Ensaio 06 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9 °C) Tep, (-35 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].	165
Figura C. 2. 7 - Ensaio 07 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-3°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].....	166
Figura C. 2. 8 - Ensaio 08 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].....	166
Figura C. 2. 9 - Ensaio 09 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+13,1 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].....	167
Figura C. 2. 10 - Ensaio 10 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-7,1 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].....	167
Figura C. 2. 11 - Ensaio 11 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+152,7 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].....	168
Figura C. 2. 12 - Ensaio 12 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (-82,7 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].....	168

Figura C. 2. 13 - Ensaio 13 de perturbação simultânea do açúcar invertido: [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+1689,9 L/h) Vpp].	169
Figura C. 2. 14 - Ensaio 14 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (-909,8 L/h) Vpp].....	169
Figura C. 2. 15 - Ensaio 15 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].....	170
Figura C. 2. 16 - Ensaio 16 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].....	170
Figura C. 2. 17 - Ensaio 17 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].....	171

NOMENCLATURA

a	Constante empírica para determinação de viscosidade dos fluidos	
A	Área	m ²
B	Valor de estabilização da variável a ser controlada, após perturbação, na curva de resposta	
c	Calor específico	J/(kg)(°C)
cs	Concentração de sólidos solúveis	°Brix
C	Porcentagem de propileno glicol na solução	%kg/kg
C I	Condição inicial do processo de resfriamento	
dPres/dx	Gradiente de Pressão na direção axial de escoamento	Pa/m
D	Diâmetro	m
DT	Diferencial de temperatura	°C
MLDT	Média logarítmica das diferenças de temperatura	°C
E	Ensaio experimental	
Ea	Energia de ativação de escoamento	kJ/mol
F	Fator de correção para leitura de sólidos solúveis do açúcar invertido	
g	Aceleração da gravidade	m/s ²
G(s)	Função de transferência no domínio Laplace	
h	Coefficiente convectivo de transmissão de calor	W/(m ²)(°C)
k	Condutividade térmica do aço inox	W/(m ²)(°C/m)
K	Índice de consistência	Pas ⁿ
Kc	Parâmetro controlador	
Kpr	Ganho proporcional	
L	Comprimento total da trajetória de transmissão de calor	m
m	Vazão mássica	kg/h
M	Fluxo de massa	kg/(m ²)(h)
n	Índice de comportamento	Adimensional
Nu	Número de Nusselt	Adimensional

P	Pólos ou raízes de um sistema de segunda ordem no plano complexo	
P	Perturbação	
Per.m.	Perímetro molhado	m
Pr	Número de Prandtl	Adimensional
Pr _g	Número de Prandtl generalizado	Adimensional
q	Taxa de calor	J/s
Q	Fluxo de calor	J/m ² s
r	Raio	m
R	Constante universal dos gases	8,314 kJ/molK
Re	Número de Reynolds para troca de calor	Adimensional
Re _g	Número de Reynolds	Adimensional
ΣR	Resistência global para o fluxo de calor	(m ²)(°C)/W
Forma “S”	Forma sigmoidal da resposta transiente	
S	Inclinação da resposta transiente sigmoidal no ponto de inflexão	
t	Tempo	min
t*	Tempo adimensional	
td	Tempo de atraso/Tempo morto	min
t(f)	Teste estatístico de <i>Student</i> com f graus de liberdade	
T	Temperatura	°C
T*	Temperatura adimensional	
u(t)	Função perturbação/Estímulo	
U	Coeficiente global de transmissão de calor	W/(m ²)(°C)
v	Velocidade	m/s
v(r)	Componente radial da velocidade no interior de um tubo	
V	Vazão volumétrica	L/h
x	Fração de açúcar invertido na solução	kg/kg
X	Fração de água na solução	kg/kg
Xs	Fração de sólidos solúveis na solução	kg/kg

$y(s)$	Função resposta transiente a uma perturbação no domínio Laplace	
$y(t)$	Função resposta transiente a uma perturbação no domínio do tempo	
z	Constante de tempo - B/S	min

Símbolos gregos

α	Amplitude do ponto axial no planejamento fatorial composto central	
Δ	Amplitude de uma perturbação degrau	
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	1/s
η	Constante empírica da relação de Arrhenius	
λ	Condutividade térmica	W/(m)(°C)
μ	Viscosidade	Pas
θ	Temperatura	K
ρ	Densidade	kg/m ³
σ	Tensão de cisalhamento	Pa
τ	Período natural de oscilação de um sistema de segunda ordem	min
τ_d	Tempo derivativo/Parâmetro controlador	min
τ_i	Tempo integral/Parâmetro controlador	min
τ_p	Constante de tempo proporcional	min
ξ	Coefficiente de amortecimento de um sistema de segunda ordem	Adimensional

Subscritos

ap	Aparente
b	Relativo à temperatura no seio do fluido (mistura)
c	Leitura corrigida
e	Entrada
eq	Equivalente
ex	Relativo à parte externa de um tubo

exp	Relativo ao valor obtido a partir das condições experimentais
f	Fluido quente (Produto)
h	Relativo ao diâmetro hidráulico
i	Início
in	Relativo à parte interna de um tubo
inv	Relativo à solução de açúcar invertido
lida	Leitura efetuada diretamente no aparelho de medida
m	Média
p	Produto
pp	Propileno glicol
r	Fluido refrigerante
s	Saída
tt	Troca térmica
w	Parede
1°RP	Primeiro regime permanente
2°RP	Segundo regime permanente
1	Relativo ao tubo interno do trocador de tubo duplo
2	Relativo ao tubo externo do trocador de tubo duplo

RESUMO

Os trocadores de calor de tubo duplo são utilizados nas indústrias de alimentos nos processos de tratamento térmico. Um efetivo controle de temperatura destes sistemas complexos é fundamental à qualidade final dos produtos alimentícios, que normalmente apresentam características distintas quanto ao escoamento e à transferência de calor. O presente trabalho consiste na avaliação experimental do comportamento dinâmico da temperatura de saída de fluidos alimentícios newtonianos, com características reológicas e térmicas distintas, durante o processo de resfriamento em um trocador de calor de tubo duplo. Água, soluções de sacarose a 8 e 18% e açúcar líquido invertido a 75% foram utilizados como fluidos de teste. Os experimentos visaram a caracterização do comportamento transiente através das curvas de resposta da temperatura de saída dos produtos, obtidas sob perturbações das condições de operação da entrada do trocador. As variáveis de entrada, vazão mássica e temperatura dos produtos e vazão volumétrica do fluido térmico, foram perturbadas a partir das condições iniciais do processo, individual e simultaneamente, positiva e negativamente e em diferentes intensidades. Constatou-se as não linearidades das curvas de resposta entre as diferentes perturbações impostas ao processo. As múltiplas perturbações das variáveis de entrada, conduzidas de acordo com a metodologia do planejamento experimental, permitiram a análise dos efeitos individuais e de interações sobre a temperatura de saída dos produtos, “B”, e sobre os parâmetros, “td” e “z”, fornecendo assim, informações fundamentais para implementação de sintonia de controladores convencionais e não convencionais.

ABSTRACT

Double pipe heat exchangers are used in food industries for thermal treatment processes, such as pasteurization of juices and fruit pulps. An effective control of temperature of these processes is extremely important for the final quality of the food products, which usually present different characteristics of flow and heat transfer. The present work consists in evaluating the dynamic behavior of the final temperature of newtonians fluids, with different values of rheological and thermal properties, during cooling process in a double pipe heat exchanger. Water, sucrose solutions at 8 and 18% and inverted liquid sugar at 75% were used as test fluids. The experiments considered the transient behavior under disturbances of the operation conditions in the heat exchanger entrance, through the response curves, represented by the final temperature of the products with time. The entrance variables, mass flow rates of the products, temperature of the products and volumetric flow rates of the thermal fluid were disturbed from the initial conditions, individual and simultaneously, positive and negatively, with different intensities. The response curves showed the non-linearity among the different disturbances imposed to the process. The multiple disturbances in the entrance variables, driven according to the methodology of the experimental design, allowed the analysis of the effects of each disturbance, as well as the effects of the interactions among them on the final temperature of the products, "B", and on the parameters, "td" and "z", providing fundamental subsidies for conventional and non-conventional controllers' implementation.

I. INTRODUÇÃO

Os trocadores de calor de tubo duplo são utilizados nas indústrias de alimentos nos processos de tratamento térmico, onde os fluidos envolvidos apresentam características específicas de escoamento, podendo ser newtonianos ou não-newtonianos, como é o caso de sucos de frutas naturais e concentrados, respectivamente.

Os sistemas de trocadores são empregados, muitas vezes, sem um controle rigoroso de suas temperaturas, o que pode gerar um produto final com características indesejáveis, além de perda de nutrientes e redução do tempo de prateleira.

O resfriamento em trocadores de calor constitui uma das etapas do processamento de alimentos, sendo seu controle essencial para a padronização do produto final, bem como para redução do consumo de energia. Os processos controlados fornecem níveis ótimos de custo operacional mínimo e máximo lucro, economizando na utilização de matérias-primas, energia, capital e mão-de-obra (STEPHANOPOULOS, 1984).

O conhecimento das respostas térmicas dos sistemas durante os períodos de operação transiente é fundamental para obtenção do controle efetivo de temperatura.

As análises do regime transiente podem ser realizadas através de simulação em computador ou testes experimentais. Os experimentos despendem maiores custos financeiros e períodos de tempo, ao mesmo tempo em que permitem a validação empírica de eventuais modelos matemáticos aplicados em simulações.

O objetivo principal deste trabalho consiste na avaliação experimental das respostas transientes da temperatura de saída de fluidos alimentícios newtonianos durante o processo de resfriamento em um trocador de calor de tubo duplo. As curvas de resposta transiente são obtidas mediante perturbações individuais e simultâneas das condições de operação na entrada do trocador (vazão mássica e temperatura do produto e vazão volumétrica do fluido térmico).

O trabalho não buscou a otimização do processo, mas sim um melhor conhecimento sobre as respostas do sistema sob as diferentes combinações de perturbações que podem ocorrer naturalmente dentro das faixas de operação estabelecidas.

As curvas de resposta transiente têm aplicação direta em futuros trabalhos para implementação de controladores não convencionais neste sistema de trocador de calor de tubo duplo.

II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

II. 1 – TROCADORES DE CALOR DE TUBO DUPLO

Na indústria de alimentos os processos térmicos são muito comuns. A maioria deles consiste em técnicas de preservação de alimentos, como a pasteurização, que devem impedir toda alteração devida à ação de enzimas, as reações químicas não-enzimáticas e a atividade de microrganismos (SINGH & HELDMAN, 1993).

As operações de resfriamento e aquecimento geralmente constituem uma das etapas do processamento de alimentos, sendo o controle de temperatura destes processos fundamental para a preservação das características organolépticas dos produtos, assegurando sua qualidade final. A temperatura é um dos fatores que mais influenciam os efeitos negativos de incrustação e de desnaturação térmica dos produtos (RENE *et al.*, 1991).

Os equipamentos mais utilizados para estes processos são os trocadores de calor de placas e os tubulares, dentre os quais estão os trocadores de casco e tubos e os trocadores de calor de tubo duplo. As considerações sobre a economia de energia e de materiais têm realçado a importância em se produzir equipamentos mais eficientes de troca de calor, mediante a intensificação da transferência de calor no escoamento (OZISIK, 1990).

Os trocadores de calor de tubo duplo ou tubos concêntricos são utilizados nas indústrias alimentícias principalmente em processos térmicos que envolvem alimentos pseudoplásticos, como as polpas de frutas, pois minimizam os efeitos de incrustação em sua superfície lisa. Além disso, são amplamente empregados em testes laboratoriais, devido à simplicidade de sua construção e manutenção, à sua pequena área de troca térmica e à sua capacidade de manter os sistemas líquidos pressurizados (SHAH, 1981).

Este tipo de trocador pode ser projetado para operar a altas pressões (acima de 300 atm no espaço anular e 1400 atm nos tubos internos) e também a altas temperaturas

(aproximadamente 600 °C). Além disso, a construção do mesmo é relativamente barata (HEWITT *et al.*, 1994) e são freqüentemente utilizados em aplicações industriais que requerem área de troca térmica de 20 m² ou menos (PRASAD, 1987).

As partes principais de um trocador de tubo duplo são dois conjuntos de tubos concêntricos, dois têes conectores, um cabeçote de retorno e uma curva de retorno. O tubo interno é mantido dentro do tubo externo por meio de buchas de apoio ou solda e o fluido principal entra no tubo interno através de uma conexão do tipo rosca ou TriClamp localizada fora da seção própria do trocador (KERN, 1987).

Os têes possuem conexões roscadas ou soldadas que são ligados aos tubos a fim de permitir a entrada e a saída do fluido térmico na parte anular, que cruza de um ramo até o outro através do cabeçote de retorno. Os dois comprimentos do tubo interno estão conectados por uma curva de retorno, que é usualmente exposta e não fornece uma superfície de transmissão de calor efetiva. Quando disposta segundo dois ramos, conforme a Figura 1 a unidade denomina-se módulo (KERN, 1987).

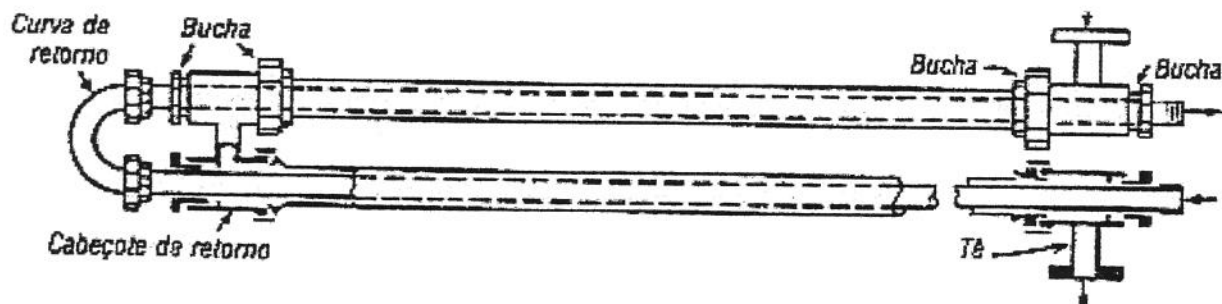


Figura 1 - Trocador de calor com tubo duplo (Fonte: KERN, 1987).

II. 2 – EQUAÇÕES BÁSICAS DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Conforme a equação modificada de Fourier, a taxa de calor total transferida pelos mecanismos combinados de convecção e condução, para um escoamento permanente, pode ser escrita em função do coeficiente global de transferência de calor (U) e da média logarítmica das diferenças de temperatura (DMLT), conforme a Equação (1):

$$q = U.A.MLDT \quad (1)$$

O coeficiente global (U) é o inverso da somatória de todas as resistências à transmissão de calor, conforme a Equação (2), sendo elas: $1/h_f$ e $1/h_r$, as resistências peliculares dos fluidos do tubo interno e da parte anular, respectivamente, e L/k , a resistência da parede do tubo, considerando que o fluido quente escoar através do tubo interno, enquanto que o fluido refrigerante escoar pelo espaço anular de um trocador de calor de tubo duplo:

$$U = \frac{1}{\sum R} = \frac{1}{1/h_f + 1/h_r + L/k} \quad (2)$$

A média logarítmica das diferenças de temperatura pode ser escrita de acordo com a Equação (3) para escoamento em contracorrente (SISSOM & PITTS, 1979):

$$MLDT = \frac{DT_f - DT_r}{\ln \frac{Dt_f}{Dt_r}} \quad (3)$$

Aplicando o princípio de conservação de energia e desconsiderando fluxo por condução na direção axial, a equação do balanço de energia pode ser integrada, para um escoamento permanente, da entrada de um tubo até a saída, conforme Equação (4), definida para o fluido quente, o produto:

$$q_f = m_f c_f DT_f = m_f c_f (T_{2^{\circ}RP} - T_{1^{\circ}RP})_f \quad (4)$$

Os números adimensionais, Reynolds, Nusselt e Prandtl correlacionam a performance térmica do trocador através das propriedades físicas e reológicas dos fluidos - densidade (ρ), calor específico (c), condutividade térmica (λ) e viscosidade (μ). As relações (Re), (Nu) e (Pr), para os fluidos newtonianos são apresentadas nas equações (5), (6) e (7), respectivamente.

$$Re = \frac{\rho v D}{\mu} \quad (5)$$

$$Nu = \frac{hD}{\lambda} \quad (6)$$

$$Pr = \frac{c\mu}{\lambda} \quad (7)$$

No caso dos fluidos não-newtonianos existem outras relações para os números adimensionais em termos dos parâmetros reológicos, índice de comportamento (n) e índice de consistência (K), ou da viscosidade aparente (μ_{ap}), como o Reynolds generalizado (Re_g) e o número de Prandtl generalizado (Pr_g), definido para os fluidos pseudoplásticos.

Para o escoamento laminar do fluido que escoar no tubo interno de um trocador de calor de tubo duplo, existe uma série de correlações para predição do coeficiente de troca térmica, h_{in} , cujos valores estimados decrescem intensamente com relação ao início da transferência de calor. Este efeito surge a partir da diminuição do gradiente de temperatura do fluido próximo à parede do tubo, conforme se dá a evolução do processo de condução-convecção (ABDELMESSIH & BELL, 1999).

A transferência de calor em regime laminar é extremamente complexa devido à interação entre as convecções natural e forçada que ocorrem no interior dos dutos circulares horizontais. Esta complexidade está relacionada com o desenvolvimento da sobreposição do fluxo natural-convectivo (terciário) sobre o fluxo primário (devido apenas à convecção forçada). Algumas correlações para os coeficientes de troca térmica dos fluidos em escoamento laminar foram resumidas por ABDELMESSIH & BELL (1999).

A equação de Sieder-Tate (Equação 8) é amplamente utilizada para o cálculo dos coeficientes peliculares de fluidos newtonianos, sendo válida para o escoamento laminar com $(DM/\mu) < 2100$, temperatura de parede constante, $0,48 < (c\mu/\lambda) < 16700$ e $0,0044 < (\mu/\mu_w) < 9,75$, sendo as propriedades termo-físicas e reológicas baseadas na média aritmética das temperaturas interna e externa dos fluidos:

$$\frac{hD}{\lambda} = 1,86 \left[\left(\frac{DM}{\mu} \right) \left(\frac{c\mu}{\lambda} \right) \left(\frac{D}{L} \right) \right]^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (8)$$

No caso do escoamento turbulento, o cálculo do coeficiente de troca térmica pode ser efetuado segundo a Equação (9), válida para escoamento plenamente desenvolvido, $0,7 \leq (c\mu/\lambda) \leq 16700$, $(DM/\mu) \geq 10000$ e $(L/D) \geq 10$, sendo as propriedades do fluido baseadas na temperatura média:

$$\frac{hD}{\lambda} = 0,027 \left(\frac{DM}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{c\mu}{\lambda} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{\mu}{\mu_w} \right)^{0,14} \quad (9)$$

A equação de Dittus-Boelter é uma simplificação da Equação (9), onde o valor de x é 0,4 para o fluido que está sendo aquecido e 0,3 para o fluido que está resfriando, conforme Equação (10):

$$\frac{hD}{\lambda} = 0,023 \left(\frac{DM}{\mu} \right)^{0,8} \left(\frac{c\mu}{\lambda} \right)^x \quad (10)$$

A Equação (10) é válida para escoamento turbulento plenamente desenvolvido, $0,7 \leq (c\mu/\lambda) \leq 160$, $(DM/\mu) \geq 10000$ e $(L/D) \geq 10$.

Quando o fluxo se dá no espaço anular, deve-se levar em consideração para estimar o coeficiente de troca térmica, o diâmetro hidráulico ou diâmetro equivalente, dado na forma da Equação (11). O diâmetro equivalente é igual a quatro vezes o raio hidráulico, que por sua vez, é o raio do tubo equivalente da seção reta anular. Para a transmissão de calor, o perímetro molhado é dado pela circunferência externa do tubo interno, com diâmetro $D_{1,ex}$ (KERN, 1987), sendo o diâmetro interno do tubo externo dado por $D_{2,in}$:

$$D_h = 4r_h = \frac{4 \times \text{ÁreaEscoamento}}{\text{PerímetroMolhado}} = \frac{4\pi(D_{2,in}^2 - D_{1,ex}^2)}{4\pi D_{1,ex}} = \frac{D_{2,in}^2 - D_{1,ex}^2}{D_{2,ext}^2} \quad (11)$$

Para escoamento turbulento plenamente desenvolvido no espaço anular, pode-se assumir uma aproximação de coeficientes de convecção dos tubos interno e externo

constantes e calculá-los através da Equação (10), levando-se em conta o diâmetro hidráulico, dado pela Equação (11) (INCROPERA & DEWITT, 1985).

II. 2. 1 – Considerações hidrodinâmicas

A velocidade média no interior de um tubo circular, sobre a seção reta do tubo, é definida pela Equação (12), segundo OZISIK (1990), considerando escoamento laminar permanente, plenamente desenvolvido e gradiente de pressão (dP_{res}/dx) constante, sendo r_{in} o raio interno de um tubo:

$$v_m = \frac{1}{\pi r_{in}^2} \int_0^{r_{in}} 2\pi r_{in} u(r) dr = -\frac{r_{in}^2}{8\mu} \frac{dP_{res}}{dx} \quad (12)$$

O significado físico da velocidade média é determinado pela Equação (13), válida para as mesmas condições da Equação (12):

$$v_m = \frac{m}{\rho A} \quad (13)$$

O perfil de velocidades para escoamento laminar, incompressível, plenamente desenvolvido e propriedades do fluido constantes, em um tubo circular, é dado pela Equação (14), sendo $v(r)$ a componente radial da velocidade:

$$\frac{v(r)}{v_m} = 2 \left[1 - \left(\frac{r}{r_{in}} \right)^2 \right] \quad (14)$$

Esta relação mostra que o perfil de velocidades na região hidrodinamicamente desenvolvida é parabólico.

II. 3 – PROPRIEDADES TERMO-FÍSICAS DOS FLUIDOS

Para prever a eficiência térmica dos trocadores é necessário o conhecimento das propriedades térmicas e físicas dos fluidos de processo, que na maioria das vezes são

calculadas na temperatura média de entrada e saída do fluido no trocador ou na temperatura de 25°C.

No entanto, existem vários estudos sobre a dependência destas propriedades em função da temperatura e da composição dos produtos alimentícios (TELIS-ROMERO, 1998 e CEPEDA & VILLARÁN, 1999). A aplicação destas relações pode gerar resultados mais precisos nos cálculos de engenharia de projetos.

CHOI & OKOS (1986) apresentaram correlações para o cálculo das propriedades termo-físicas da água com um erro de 2,2%. As equações são válidas para a faixa de temperatura de 0°C a 150°C e são apresentadas nas Equações (15), (16) e (17) para o cálculo da condutividade térmica, densidade e calor específico, respectivamente:

$$\lambda = 5,7109 \times 10^{-1} + 1,7625 \times 10^{-3} T - 6,7036 \times 10^{-6} T^2 \quad (15)$$

$$\rho = 9,9718 \times 10^{-2} + 3,1439 \times 10^{-3} T - 3,7574 \times 10^{-3} T^2 \quad (16)$$

$$c = (4,1762 - 9,0864 \times 10^{-5} T + 5,4731 \times 10^{-6} T^2) \times 10^3 \quad (17)$$

Para o cálculo das propriedades termo-físicas de alimentos com predominância no componente carboidrato, CHOI & OKOS (1986) propuseram relações dependentes da temperatura, aplicáveis para a faixa de temperatura de -40°C a 150°C, cujo erro foi estimado em torno de 6%, conforme as Equações (18), (19) e (20):

$$\lambda = 2,014 \times 10^{-1} + 1,3874 \times 10^{-3} T - 14,3312 \times 10^{-6} T^2 \quad (18)$$

$$\rho = 1,5991 \times 10^{-3} - 3,1046 \times 10^{-1} T \quad (19)$$

$$c = 1,5488 + 1,9625 \times 10^{-3} - 5,9399 \times 10^{-6} T^2 \quad (20)$$

Siebel (1982) (citado por RAO & RIZVI, 1986) apresentou duas equações para o cálculo do calor específico em função da fração de água do produto, podendo ser utilizadas para as soluções de sacarose. A Equação (21) é empregada para produtos em temperaturas

acima do ponto de congelamento, enquanto a Equação (22), para temperaturas abaixo do ponto de congelamento do produto.

$$c = 0,837 + 3,349X \quad (21)$$

$$c = 0,837 + 1,256X \quad (22)$$

Reidel (1949) (citado por HELDMAN & LUND, 1992) apresentou uma relação para o cálculo da condutividade térmica de sucos de frutas, soluções de sacarose e leite em função da fração de água e temperatura dos produtos com erro estimado em 1%, conforme a Equação (23):

$$\lambda = (326,58 + 1,0412T - 0,00337T^2)(0,46 + 0,54X)1,73 \times 10^{-3} \quad (23)$$

JUNK & PANCOAST (1973) sintetizaram uma quantidade considerável de informações sobre os açúcares em um manual, que contem algumas propriedades termofísicas das soluções de sacarose a várias temperaturas e concentrações, como solubilidade, ponto de congelamento e calor específico. Através destes valores é possível propor correlações destas propriedades dependentes da temperatura e da concentração de sacarose na solução.

BERTO (2000) apresentou duas relações para o cálculo da densidade e do calor específico do propileno glicol em função da concentração e da temperatura, com um erro estimado em $\pm 2\%$, conforme as Equações (24) e (25), respectivamente:

$$\rho_{pp} = 928,6 - 0,57T + 31,1 \ln(C_{pp}) \quad (24)$$

$$c_{pp} = 4148,43 + 3,1445T - 3,1712C_{pp} \ln(C_{pp}) \quad (25)$$

A condutividade térmica do propileno glicol pode ser considerada constante e igual a $0,609 \text{ W/m}^\circ\text{C}$, segundo BERTO (2000).

II. 4 – PROPRIEDADES REOLÓGICAS DOS FLUIDOS

Os fluidos alimentícios são soluções complexas que apresentam comportamentos reológicos distintos, os quais dependem da temperatura e da concentração de sólidos solúveis e insolúveis, podendo afetar o tratamento térmico.

O conhecimento das propriedades reológicas dos alimentos é essencial para o projeto de equipamentos, para um efetivo controle dos processos e da qualidade final dos produtos, visando a aceitabilidade do consumidor (HOLDSWORTH, 1971).

Os líquidos newtonianos apresentam comportamento simples, conforme mostra a Equação (26), obedecendo à relação linear entre a tensão de cisalhamento (σ) e a taxa de deformação ($\dot{\gamma}$), segundo BIRD *et al.* (1960):

$$\sigma = \mu \dot{\gamma} \quad (26)$$

A viscosidade (μ) independe da tensão de cisalhamento e do histórico de deformação, sendo influenciada apenas pela temperatura e pela concentração do alimento (RAO, 1977).

Água, sucos de frutas clarificados isentos de sólidos em suspensão, sucos sem pectina, sucos naturais, soluções de baixa massa molecular com conteúdo de sólidos solúveis inferior a 20°Brix e soluções aquosas de sacarose apresentam comportamento newtoniano (CEPEDA & VILLARÁN, 1999).

A viscosidade nestes casos aumenta exponencialmente com a concentração e decresce consideravelmente com a temperatura (SARAVACOS & KOSTAROPOULOS, 1995).

Os fluidos não-newtonianos são os materiais cuja relação proporcional entre a tensão e a taxa de deformação não é constante, podendo variar de acordo com a tensão e com o tempo, como os fluidos tixotrópicos e reopéticos.

Para a descrição do comportamento não-newtoniano têm-se proposto vários modelos empíricos que correlacionam a tensão cisalhante com a taxa de deformação. À medida que

o comportamento de um material desvia-se do newtoniano são necessários modelos com mais parâmetros para descrevê-lo.

Os sucos de frutas não clarificados e/ou concentrados podem apresentar comportamento reológico pseudoplástico, normalmente descrito pelo modelo de Ostwald-De Waele ou lei da potência, conforme a Equação (27):

$$\sigma = K\dot{\gamma}^n \quad (27)$$

A Equação (27) é simplificada para o caso dos fluidos newtonianos (Equação 26), sendo o valor do índice de comportamento do fluido (n) igual a “1” o índice de consistência (K) a própria viscosidade do fluido (μ).

Os fluidos não-newtonianos podem também ser descritos por outros modelos empíricos, nos quais uma resistência adicional surge ao escoamento, representada pela tensão inicial, como no modelo de Bingham e no de Herschel-Bulkley (SARAVACOS & KOSTAROPOULOS, 1995). Este comportamento pode ser atribuído à presença de substâncias de elevada massa molecular e/ou aos sólidos dispersos em solução (RAO, 1977).

A relação entre temperatura e viscosidade de líquidos puros é expressa de acordo com a relação de Arrhenius, conforme a Equação (28), onde E_a é a energia de ativação de escoamento determinada empiricamente, R é a constante universal dos gases, θ é a temperatura absoluta e η uma constante determinada experimentalmente (BARNES *et al.*, 1989).

$$\mu = \eta \exp\left(\frac{E_a}{R\theta}\right) \quad (28)$$

A relação entre a concentração e a viscosidade pode ser expressa por um modelo potencial, segundo a Equação (29), ou por um modelo exponencial, conforme a Equação (30), segundo VITALI *et al.* (1984):

$$\mu = \eta_1 C^{a_1} \quad (29)$$

$$\mu = \eta_2 \exp(a_2 cs) \quad (30)$$

Nas Equações (29) e (30), η_1 , η_2 , a_1 e a_2 são constantes determinadas experimentalmente e cs é a concentração do produto, dada em °Brix ou porcentagem de sólidos solúveis.

Combinando os efeitos de temperatura e da concentração nos parâmetros reológicos, dados pelas Equações (28) e (30), obtém-se a seguinte relação dada na Equação (31):

$$\mu = \eta_3 \exp\left(\frac{Ea}{R\theta}\right) \exp(a_3 cs) \quad (31)$$

Para o cálculo da viscosidade da água dependente da temperatura, SHARIFI *et al.* (1995) apresentaram a relação mostrada na Equação (32):

$$\log \mu = \frac{274,2}{\theta - 140} - 4,618 \quad (32)$$

BATES & ASSOCIATES (1942) apresentaram dados de viscosidade de soluções de sacarose nas temperaturas de 0 a 80°C para concentração de sólidos solúveis de 0 a 70%. Dados tabelados podem também ser obtidos diretamente no manual de açúcares de JUNK & PANCOAST (1973) para soluções de 20 a 75% nas temperaturas de 0 a 100°C. Através destes valores é possível propor correlações de viscosidade dependentes da temperatura e da concentração de sacarose na solução.

O conhecimento da viscosidade de soluções de açúcar invertido é um fator de fundamental importância para a seleção dos equipamentos utilizados nas plantas industriais, principalmente no caso de dimensionamento das bombas. A viscosidade destas soluções depende das porcentagens de inversão da mesma e da temperatura de trabalho. JUNK & PANCOAST (1973) mostram o efeito do acréscimo da temperatura de 10 a 80°C na viscosidade de uma solução de açúcar invertido com 90% de inversão e em outra análise, o

comportamento da viscosidade de soluções sacarose e de açúcar invertido com 50, 90 e 100% de inversão na temperatura de 20°C.

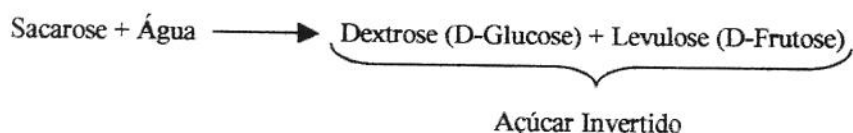
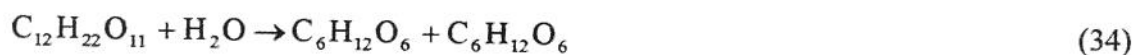
Apesar do açúcar invertido ser proveniente da hidrólise ácida da sacarose, não há dados na literatura que comprovem que a viscosidade desta solução em função da temperatura se comporta como uma solução de sacarose na mesma concentração de sólidos solúveis.

Para o cálculo da viscosidade do propileno glicol, BERTO (2000) propôs uma relação, cujo erro foi estimado em torno de $\pm 7\%$, apresentada pela Equação (33):

$$\mu_{pp} = \exp\left(-10,7 + \frac{670643,5}{\theta^2}\right) \quad (33)$$

II. 5 – AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO

O açúcar líquido invertido é o produto final da hidrólise da sacarose (BOBBIO & BOBBIO, 1992). A reação de inversão pode ser expressa conforme a Equação (34):



A sacarose é um dissacarídeo não redutor obtido do açúcar de cana ou de beterraba, sendo facilmente hidrolisada por soluções diluídas de ácidos minerais, por enzimas (invertase) ou por tratamento térmico, com formação de glicose e frutose, conforme representado no esquema da Figura 2.

Neste processo ocorre a inversão da rotação ótica da solução inicial, motivo pelo qual o processo de hidrólise da sacarose é também conhecido como inversão da sacarose (BOBBIO & BOBBIO, 1992).

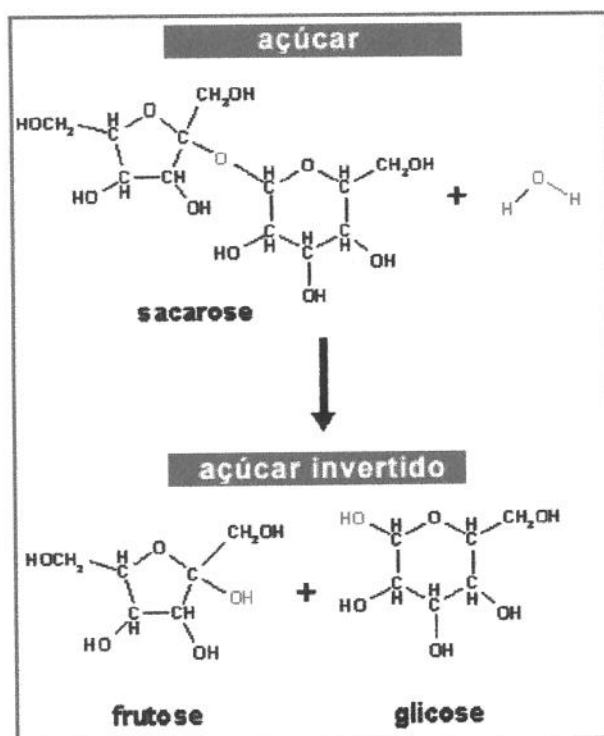


Figura 2 - Formação do açúcar líquido invertido (Fonte: www.klickeducacao.com.br).

Soluções de açúcares invertidos podem apresentar de 10 a 90% de inversão. Estas soluções são mais densas, comparadas com soluções de sacarose e por este motivo apresentam vantagens em relação à minimização da possibilidade de cristalização e do crescimento de bolores e leveduras (JUNK & PANCOAST, 1973).

Devido às propriedades do açúcar invertido, a determinação da concentração de sólidos solúveis realizada em refratômetros, através da leitura em Brix, sofre uma redução, e por este motivo deve ser corrigida. JUNK & PANCOAST (1973) apresentam os fatores de conversão da leitura em Brix para soluções açúcar invertido. A leitura em Brix corrigida (cs_c) para estas soluções é determinada pela Equação (35), onde F é o fator de correção tabelado em função dos sólidos solúveis, x_{inv} , a fração de açúcar invertido na solução (0,10 a 0,9) e cs_{lido} , a concentração de sólidos solúveis medida no refratômetro. Nas indústrias açucareiras o fator de correção de *Whalley*, no valor de 0,022 é usualmente empregado.

$$cs_c = cs_{lido} + x_{inv} cs_{lido} F \quad (35)$$

O açúcar líquido invertido é vastamente empregado em indústrias alimentícias onde a coloração não interfere na qualidade do produto final, como panificação, geléias, sorvetes, laticínios, frutas cristalizadas, bebidas carbonatadas, sucos, recheios, licores, biscoitos, balas, caramelos, etc. Um de seus principais benefícios é a capacidade de redução da atividade da água, sendo este um dos principais fatores determinantes do prazo de validade de produtos (AÇÚCAR-GUARANI, 2001).

Além disso, outras vantagens podem ser citadas com relação ao seu uso (AÇÚCAR-GUARANI, 2001):

- Evita processos dispendiosos de diluição, armazenagem e transporte de açúcares sólidos, garantindo a isenção total de cristais no produto final e facilitando as condições de estocagem, o que reduz custos de energia e minimiza a produção de dejetos industriais provenientes dos processos de filtragem e desodorização do xarope ou calda.
- Possui cerca de 20% a mais de poder adoçante em comparação a sacarose pura e alta afinidade com a água (higroscopicidade), sendo utilizado para manter alguns produtos úmidos, aumentando consideravelmente seus prazos de validade. Em produtos com baixo teor de gordura, sua utilização evita que os mesmos comecem a secar e quebrar. Pode ser utilizado para substituir o glicerol, geralmente usado como umectante em bolos, podendo-se perceber melhora no poder adoçante, no sabor para produtos de frutas e no acréscimo de cor e sabor durante o cozimento.
- Possui uma viscosidade baixa, conferindo plasticidade a sorvetes, cremes e *fondants*, podendo também ser utilizado como inibidor de cristalização para estes produtos, garantindo que os mesmos continuem macios e suaves durante o prazo de validade.
- Diminui o ponto de congelamento, propriedade útil em produtos que são conservados em *freezers*. Quando aquecido em misturas, acelera a reação de Maillard proporcionando aumento de coloração e de sabor, efeito desejável na fabricação de balas e caramelos.

Um estudo realizado sobre o efeito da adição de sacarose, açúcar invertido e xarope de glicose na atividade de água de soluções aquosas contendo seis diferentes componentes aromáticos concluiu que a adição de açúcar invertido às soluções proporcionaram maior redução na atividade de água e em consequência maior liberação dos compostos aromáticos comparada com as adições de sacarose e xarope de sacarose (HANSSON *et al.*, 2001).

II. 6 – CONTROLE DE PROCESSOS

Durante as condições normais de operação, os complexos sistemas industriais podem estar submetidos a pequenos distúrbios externos repentinos, os quais provocam variações nas temperaturas e vazões dos fluidos envolvidos, alterando assim as condições de operação em regime permanente.

O sistema fica então submetido a um comportamento transiente, no qual as variáveis envolvidas no processo sofrem alterações de comportamento com o tempo (LACHI *et al.*, 1997).

Os estudos do comportamento transiente em trocador de calor são imensamente úteis para aplicações em estratégias de controle de processos (DAS & DAN, 1996).

Para implementação de um sistema de controle é necessário o conhecimento das características dinâmicas de todos os componentes da malha de controle, que podem ser analisadas através de repostas de frequência ou de dados de resposta transiente (COHEN & JOHNSON, 1956).

A maioria dos estudos das características dinâmicas de temperatura de saída de trocadores de calor de tubo duplo é realizada mediante perturbações arbitrárias das variáveis de entrada do trocador, principalmente as vazões e temperaturas dos fluidos de trabalho, os quais são geralmente água e vapor de água (LACHI *et al.*, 1997, WANG & LIAO, 1989, COHEN & JOHNSON, 1956, NETO & COTTA, 1993 e ELGENK & HUANG, 1993).

Além disso, a metodologia convencional de sintonia de controladores utiliza apenas um único ensaio experimental de perturbação, não sendo encontrado em literatura nenhum trabalho utilizando uma sistemática de condução de experimentos como o planejamento fatorial, descrito no Item II. 7.

II. 6. 1 – Respostas Transientes

A resposta transiente de um processo a qualquer função perturbação, tais como as funções degrau, impulso e senoidal, pode ser expressa matematicamente pela Equação (36):

$$y(t) = \Delta P.u(t) \quad (36)$$

Na Equação (36), “ ΔP ” é a amplitude do degrau e $u(t)$ é a função perturbação. Uma função degrau pode ser aproximada com precisão na prática, como a abertura brusca de uma válvula (COUGHANOWR & KOPPEL, 1978).

Os sistemas podem responder de maneiras diferentes a estas perturbações, sendo então caracterizados como sistemas de primeira ordem, segunda ordem e sistemas complexos ou de ordem superior.

Um sistema de primeira ordem é aquele no qual a saída é modelada por uma Equação diferencial de primeira ordem. A função de transferência (domínio Laplace) de um sistema de primeira ordem é caracterizada pelos parâmetros “ τ_p ” e “ K_{pr} ”, conhecidos como constante de tempo e ganho estático proporcional, respectivamente.

A função de transferência é uma expressão matemática dada em termos da variável complexa “ s ”, que relaciona a saída e a entrada de um sistema linear e invariante no tempo, em termos dos parâmetros do sistema. A função de transferência é uma propriedade inerente ao próprio sistema, porém, não fornece informações quanto à sua estrutura física, sendo definida como a relação da transformada de Laplace da saída (função resposta) e a transformada de Laplace da entrada (função estímulo), segundo OGATA (1990).

A resposta de um sistema de primeira ordem a uma entrada degrau de magnitude “ ΔP ” é dada pela Equação (37) no domínio do tempo:

$$y(t) = PK_{pr}(1 - e^{-t/\tau_p}) \quad (37)$$

A constante de tempo (τ_p) é uma medida do tempo necessário para um processo ajustar-se a uma mudança nas suas entradas. Portanto, quanto menor for a constante de tempo de um sistema, mais rápida será a sua resposta a um estímulo qualquer. Na Figura 3 é apresentado como $y(t)$ varia em função do tempo para um sistema de primeira ordem, sendo dada em coordenadas adimensionais, $y(t)/PK_{pr}$ versus t/τ_p .

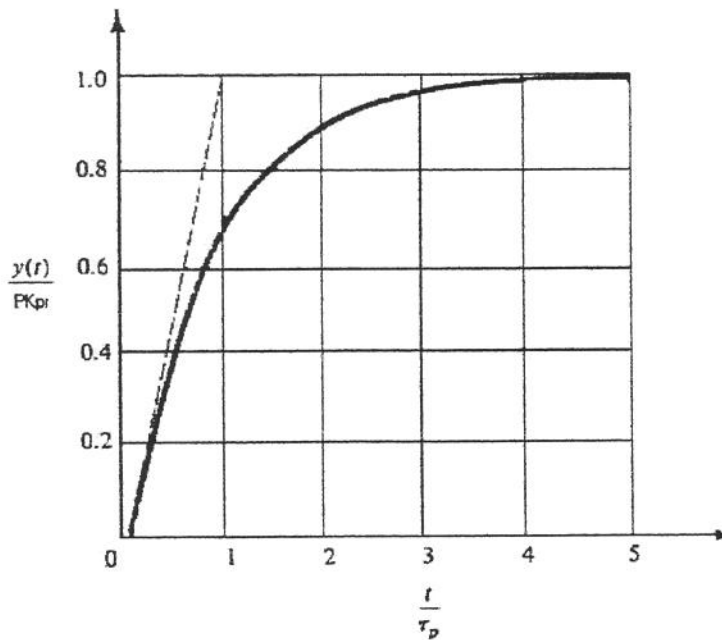


Figura 3 - Resposta adimensional de um sistema de primeira ordem a uma perturbação degrau (Fonte: STEPHANOPOULOS, 1984).

Os sistemas de segunda ordem são aqueles nos quais a saída $y(t)$ é descrita pela solução de uma Equação diferencial de segunda ordem, onde se define um novo parâmetro adimensional, ξ , conhecido como coeficiente de amortecimento do sistema. Os parâmetros τ , período natural de oscilação do sistema, e ξ devem ser sempre positivos.

A resposta de um sistema de segunda ordem a uma perturbação degrau no domínio Laplace é dada pela Equação (38):

$$y(s) = \frac{Kpr}{s(\tau^2 s^2 + 2\xi\tau s + 1)} \quad (38)$$

Os dois pólos da função de transferência de segunda ordem são dados pelas raízes de característica polinomial, p' e p'' , sendo elas:

$$p' = -\frac{\xi}{\tau} + \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau} \quad p'' = -\frac{\xi}{\tau} - \frac{\sqrt{\xi^2 - 1}}{\tau} \quad (39)$$

Dessa forma, a Equação (38) pode ser escrita na forma da Equação (40):

$$y(s) = \frac{Kpr/\tau^2}{s(s - p')(s - p'')} \quad (40)$$

A resposta $y(t)$ é obtida pela inversão da Equação (40) e depende do local dos pólos ou raízes, p' e p'' , no plano complexo. As raízes podem ser reais ou complexas, dependendo do parâmetro ξ , podendo-se distinguir três casos:

- $\xi < 1$: duas raízes complexas conjugadas, resposta subamortecida ou oscilatória;
- $\xi = 1$: duas raízes reais e iguais, resposta criticamente amortecida;
- $\xi > 1$: duas raízes reais e distintas, resposta superamortecida ou não-oscilatória.

Quando $\xi = 1$ o sistema é dito criticamente amortecido e neste caso, a resposta transiente a uma perturbação degrau no domínio do tempo é dada pela Equação (41), também semelhante a uma resposta em formato “S”:

$$y(t) = Kpr \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-t/\tau} \right] \quad (41)$$

Na Figura 4 são mostradas as diferentes respostas transientes de sistemas de segunda ordem para valores de ξ entre 0,1 e 10.

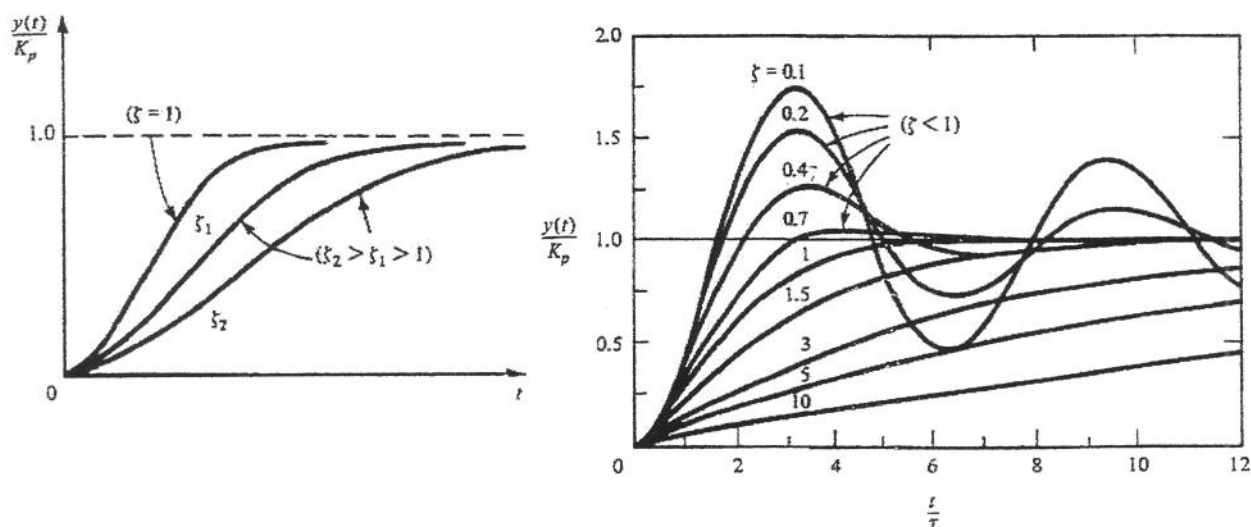


Figura 4 - Respostas adimensionais de um sistema de segunda ordem a uma perturbação degrau (Fonte: STEPHANOPOULOS, 1984).

Freqüentemente um sistema físico pode ser representado por vários sistemas de primeira ordem associados em série. Estes sistemas constituem a maioria dos processos reais, sendo chamados de multicapacitivos. A resposta ao degrau de dois sistemas de primeira ordem em série é em forma de “S” e a resposta varia muito lentamente imediatamente após a aplicação da perturbação. Os sistemas multicapacitivos podem ser aproximados para sistemas de segunda ordem (COUGHANOWR & KOPPEL, 1978).

Esta lentidão ou atraso é muitas vezes chamado de retardo de transferência e sempre ocorre quando dois ou mais sistemas de primeira ordem associam-se em série. O retardo na resposta aumenta à medida que o número de sistemas associados cresce.

Para mostrar que o retardo de transferência aumenta à medida que o número de estágios cresce, a Figura 5 representa as curvas de resposta ao impulso degrau unitário para sistemas constituídos de um ou mais sistemas de primeira ordem em série.

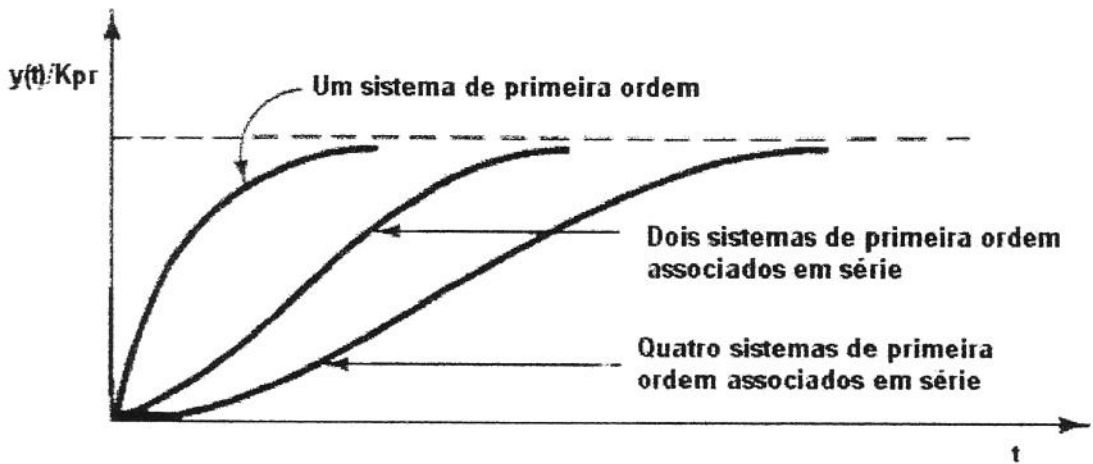


Figura 5: Respostas adimensionais ao degrau de sistemas de primeira ordem associados em série.

Para sistemas multicapacitvos, cada sistema é caracterizado por uma função de transferência, $G(s)$, e a resposta do primeiro sistema, $y_1(s)$, afeta o segundo sistema, o segundo sistema afeta o terceiro e assim por diante (Figura 6). A função de transferência global ou função resultante, $G_{resultante}(s)$, é simplesmente o produto das funções de transferência individuais.

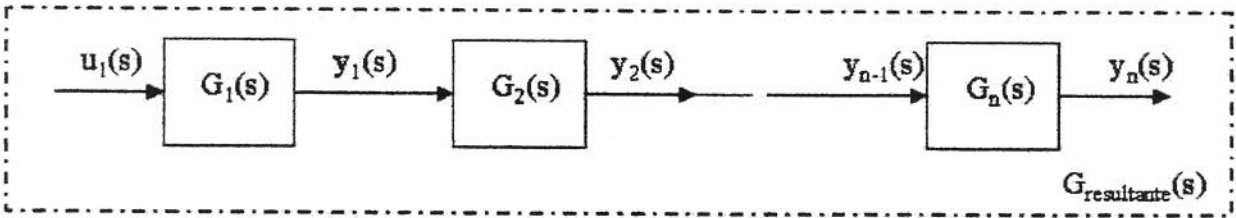
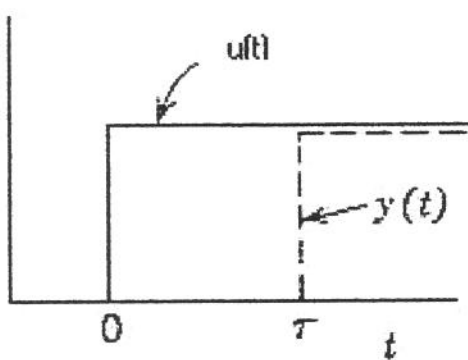


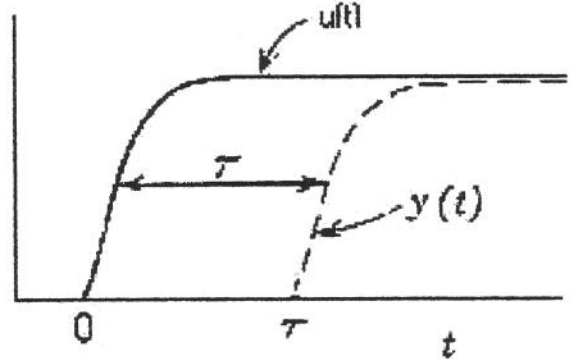
Figura 6 – Sistemas de primeira ordem capacitivos em série.

Um fenômeno muito freqüente em sistemas de escoamento é o retardo por transporte ou tempo morto. Ao provocar uma perturbação degrau no instante $t=0$ em um trocador de tubo-duplo, por exemplo, a perturbação não é imediatamente percebida na extremidade final do trocador de calor. O tempo necessário para o fluido de entrada atravessar todo o trocador é o tempo morto. A presença deste retardo por transporte pode tornar o processo muito mais difícil de controlar. Raramente tais retardos podem ser eliminados por completo, mas podem ser minimizados colocando-se os equipamentos próximos uns aos outros (COUGHANOWR & KOPPEL, 1978).

A Figura 7 mostra a resposta de um sistema com retardo de transporte, $y(t)$, a partir de um estímulo $u(t)$, que pode ser aproximado a um sistema de segunda ordem. Na Figura 7.a é apresentada a resposta ao degrau unitário, enquanto que na Figura 7.b, a resposta do sistema é dada a um estímulo qualquer. Para o primeiro caso, se fosse provocada uma perturbação degrau $u(t)$ no instante $t=0$ em um sistema de trocador de tubo duplo, a perturbação não seria percebida na extremidade final do tubo antes de τ , sendo τ o tempo necessário para o fluido que entra atravessar todo o tubo.



(a)



(b)

Figura 7 - Resposta por retardo de transporte a diversos estímulos (Fonte: COUGHANOWR & KOPPEL, 1978).

II. 6. 2 – Sistemas de Controle Automático

Os sistemas de controle automático assumem importância crescente em diversos setores das indústrias, representando papel vital no avanço tecnológico dos processos de fabricação. Seus objetivos primordiais são a manutenção da eficiência dos processos e a obtenção de um produto de melhor qualidade a um custo mais baixo, com menor tempo de manufatura e mínimo consumo de energia (STEPHANOPOULOS, 1984).

Os sistemas de controle são compostos basicamente pelos objetivos de controle ou entradas, componentes físicos do sistema de controle e os resultados ou saídas. Geralmente, o objetivo do sistema de controle é controlar a saída de alguma maneira prescrita pelas entradas, através dos elementos do sistema de controle (OGATA, 1990).

Os Controladores Lógicos Programáveis (CLPs) consistem em um sistema de automação flexível. Sendo auto-ajustáveis possuem a capacidade de reconhecer um processo e suas variações no tempo. É possível ajustar ou alterar os parâmetros do CLP segundo determinada estratégia, buscando atender às especificações do processo.

A Figura 8 ilustra o diagrama de blocos de um sistema de controle em malha fechada com o processo a ser controlado.

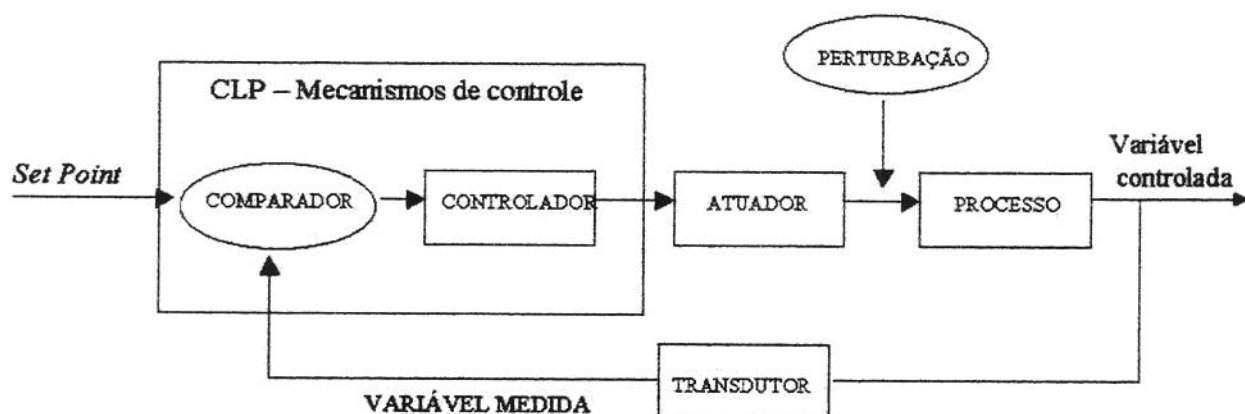


Figura 8 – Diagrama de blocos para um sistema de controle simples em malha fechada.

O modo de controle estabelece correções em resposta aos desvios das variáveis de processo, relacionando o erro de entrada da variável de processo e o valor da variável monitorada na saída do controlador.

Os modos de controle podem ser: *on-off*, flutuante, proporcional (P), proporcional com ação de correção integral (PI), proporcional com taxa de ação derivativa (PD), proporcional com correção integral e taxa derivativa (PID), *Fuzzy*, Adaptativo e outros.

II. 6. 3 – Estratégias de Controle

As estratégias de controle podem ser divididas em duas categorias principais: *feedback* e *feedforward* (COUGHANOWR & KOPPEL, 1978). Na primeira categoria, a variável de processo a ser controlada é medida e as ações corretivas são feitas depois de

detectado seu desvio ao *set point*. Na segunda categoria, a perturbação do processo é medida e usada para ajustar a variável manipulada antes de ocorrerem variações.

Para aplicação de uma estratégia controle *feedforward* é necessário o conhecimento de todas as perturbações possíveis no processo, por isso, em aplicações industriais, as duas categorias de controle são geralmente combinadas.

As estratégias de controle são usadas com controladores convencionais (PID) ou não convencionais (*Fuzzy*).

Os controladores convencionais possuem parâmetros que devem ser ajustados conforme o modo de controle a ser aplicado e o tipo de comportamento do sistema (primeira ou segunda ordem, por exemplo). O ajuste dos parâmetros do controlador, ganho proporcional (K_c), tempos integral (τ_i) e derivativo (τ_d), pode ser realizado baseando-se nos resultados dinâmicos experimentais de um determinado processo, segundo Cohen & Coon (citado por 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 de processo citado por STEPHANOPOULOS (1984). A partir desta metodologia, determina-se a resposta dinâmica experimentalmente, 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.

A curva de reposta a um degrau geralmente assemelha-se a uma curva em formato “S”, que pode ser adequadamente aproximada a um sistema de primeira ordem com tempo morto ou a sistemas multicapacitivos, ou ainda a um sistema de segunda ordem com $\xi=1$.

A curva tipo “S” é caracterizada por duas constantes, tempo de atraso “ t_d ” e constante de tempo “ τ ”, conforme é mostrado na Figura 9. Estas constantes são determinadas a partir da intersecção de uma linha tangente no ponto de inflexão da curva com o eixo do tempo t e a linha $y(t)=B$.

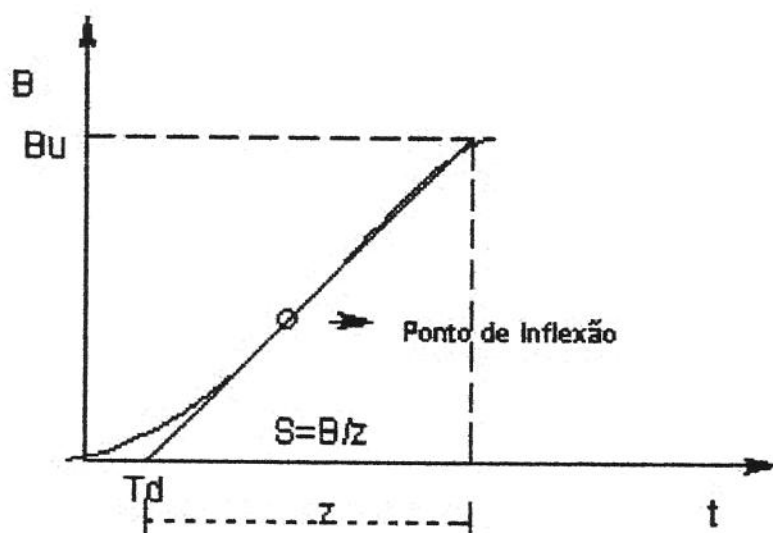


Figura 9 - Exemplo de curva de resposta de um processo do tipo “S”.

O valor de “B” é o de estabilização do sistema após perturbação nas variáveis de entrada. O valor de “td” corresponde ao tempo morto. A inclinação da tangente (S), é proporcional a $1/z$, sendo assim, tem-se a relação expressa pela Equação (42):

$$z = \frac{B}{S} \quad (42)$$

O ganho proporcional em regime permanente entre a perturbação de amplitude “P” e a resposta “B” é dado pela Equação (43):

$$K_{pr} = \frac{B}{P} \quad (43)$$

Com os valores de “B”, “td” e “z”, determinados diretamente da curva de resposta do processo a uma entrada do tipo degrau unitário, por exemplo, calculam-se as constantes do controlador (K_c , τ_i e τ_d) que podem ser aplicadas neste processo.

Existem vários métodos de cálculo destas constantes dependendo do modo de controle a ser aplicado.

As constantes recomendadas por Cohen & Coon para sintonia de controladores convencionais são mostradas na Tabela 1.

Tabela 1 - Constantes recomendadas por Cohen & Coon para sintonia de controladores.

Modos de controle	Parâmetros do controlador		
	Kc	τ_i	τ_d
Proporcional	$\frac{1}{K_{pr}} \frac{z}{td} \left(1 + \frac{td}{3z} \right)$	---	---
Proporcional-Integral	$\frac{1}{K_{pr}} \frac{z}{td} \left(\frac{9}{10} + \frac{td}{12z} \right)$	$td \frac{30 + 3td/z}{9 + 20td/z}$	---
Proporcional-Derivativo	$\frac{1}{K_{pr}} \frac{z}{td} \left(\frac{5}{4} + \frac{td}{6z} \right)$	---	$td \frac{6 - 22td/z}{22 + 3td/z}$
Proporcional-Integral-Derivativo	$\frac{1}{K_{pr}} \frac{z}{td} \left(\frac{4}{3} + \frac{td}{4z} \right)$	$td \frac{32 + 6td/z}{13 + 8td/z}$	$td \frac{4}{11 + 2td/z}$

II. 6. 4 – Rede Fieldbus

Fieldbus é um sistema de comunicação digital bidirecional que permite a interligação em rede de múltiplos instrumentos diretamente no campo, como sensores e atuadores, realizando funções de controle e monitoração de processo e estações de operação (SMAR, 1998).

Os instrumentos digitais *Fieldbus* são conectados via rede digital com as estações de operação por apenas um par de fios, diferentemente dos protocolos de comunicação tradicionais, sinal analógico de 4-20mA, que necessitam de um par de fios para ligar cada transmissor ou cada válvula ao CLP.

O sistema de comunicação da rede *Fieldbus* conecta até 32 transmissores inteligentes de campo entre si e à sala de controle. Outras vantagens dessa tecnologia são: redução de custos de cabeamento, instalação, operação e manutenção da instrumentação; maior precisão na medição, em função da eliminação dos conversores de sinal analógico para digital e vice-versa; aumento da robustez da instrumentação, visto que a transmissão digital é mais confiável do que a analógica (SMAR, 1998).

Os instrumentos de campo são divididos em quatro canais *Fieldbus*, conectados a uma placa inteligente PCI (*Process Control Interface*), que utiliza uma CPU de 32 bits e é responsável pela comunicação *Fieldbus*. A placa PCI é conectada diretamente ao barramento interno de 16 bits do computador, com possibilidade de comunicação em rede Ethernet (SMAR, 1998).

II. 7 – PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL

A metodologia do planejamento experimental associada à análise de superfície de resposta é uma ferramenta fundamentada na teoria estatística e fornece informações seguras do processo, sendo, portanto, este o motivo pelo qual o presente trabalho a utiliza (BRUNS *et al.*, 1995).

Os ensaios são previstos através de um Planejamento Fatorial, que consiste na seleção de um número fixo de níveis para cada uma das variáveis de entrada ou variáveis independentes e na execução dos experimentos estatisticamente suficientes, com todas as combinações possíveis entre os níveis. Esta é uma técnica sistemática de condução de experimentos que possibilita avaliar os efeitos principais das variáveis independentes sobre as respostas desejadas ou variáveis dependentes, bem como os efeitos de interações entre elas.

A quantidade de ensaios realizada é estimada em $(2^n + 2n)$ ensaios, onde 2 representa o número de níveis a serem estudados, nível inferior (-1) e nível superior (+1) e n é o número de variáveis independentes, podendo-se gerar um modelo probabilístico de segunda ordem.

A quantidade de ensaios (2^n) é aplicada para análise das interações de primeira ordem, nos quais as variáveis valem (-1) ou (+1), enquanto que $2n$ é a quantidade de ensaios referentes aos pontos axiais, com uma amplitude de $(-\alpha)$ ou $(+\alpha)$, sendo $\alpha = (\pm 2^n)^{1/4}$. Devem ser acrescentados pelo menos mais n ensaios, onde todas as variáveis têm seus valores no nível intermediário (0), o ponto central. Os ensaios neste ponto são feitos

geralmente em triplicata, o que permite estimar o erro experimental. A realização das repetições reflete a variabilidade do processo.

A partir da análise de variância propõe-se um modelo probabilístico correlacionando as respostas em função das variáveis estudadas e as superfícies de resposta são construídas para determinar as tendências dos comportamentos dos parâmetros.

A partir desta metodologia todas as possíveis combinações de perturbações nas variáveis independentes (variáveis de entrada) são realizadas, podendo-se avaliar o grau de influência destas perturbações simultaneamente na temperatura de saída do produto do trocador e nos parâmetros gráficos para controle.

III - MATERIAIS E MÉTODOS

III. 1 – MATERIAIS

III. 1. 1 - Descrição da Planta de Tratamento Térmico com Trocador de Calor de Tubo Duplo

Um esquema da planta piloto de tratamento térmico com trocador de calor de tubo duplo utilizada nos ensaios de perturbações dos produtos alimentícios durante processo de resfriamento está representado na Figura 10.

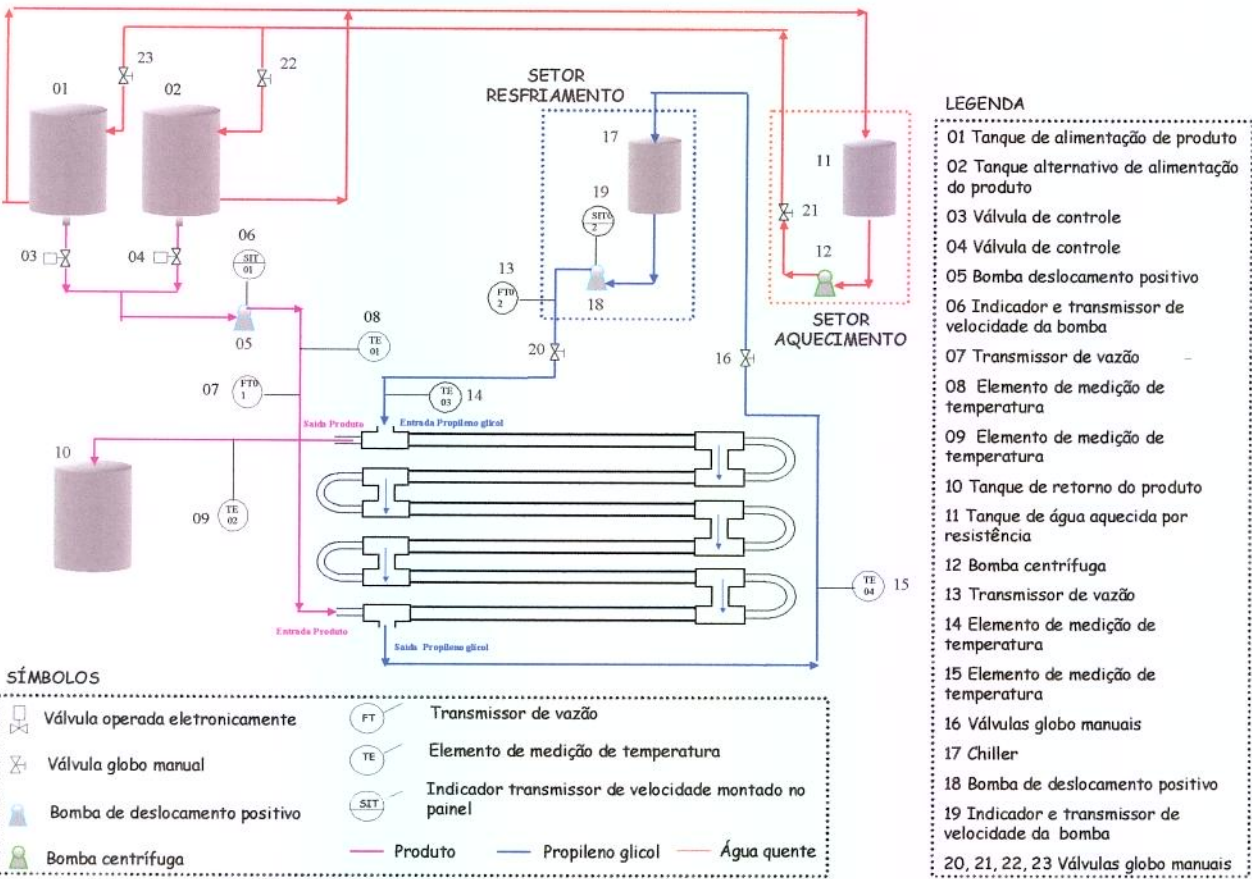


Figura 10 - Esquema da planta de tratamento térmico com trocador de calor de tubo duplo para aquisição de dados on-line.

O trocador de calor de tubo duplo testado foi adaptado à planta-piloto automatizada de resfriamento de produtos alimentícios do Laboratório de Controle e Automação de Processos Alimentícios (LACPA), no Departamento de Engenharia de Alimentos, DEAFEA, UNICAMP, onde é possível configurar, monitorar e gerenciar *on-line* os testes experimentais através dos *softwares* SYSCON e AIMAX.

O protótipo é composto por um sistema de trocadores de calor, tanques de homogeneização e de retorno encamisados, sistemas de circulação externa de fluido refrigerante, propileno glicol, e de fluido de aquecimento (água quente), além de um conjunto de válvulas manuais e pneumáticas, bombas, variadores de frequência, sensores de temperatura, pressão, vazões mássica e volumétrica, dispositivos de campo conectados em rede *Fieldbus* e sala de controle para manipulação dos processos e aquisição de dados.

Para a realização dos ensaios, o produto é alimentado nos tanques de homogeneização de aço inox, cuja capacidade é de 500 L cada, sendo a sua temperatura mantida constante através de circulação externa de fluido nas camisas, podendo ser este fluido quente ou frio. A vazão do produto é manipulada através do variador de frequência acoplado à bomba de deslocamento positivo do produto, que opera entre 0 e 60 Hz, equivalente a uma vazão mássica de água de 0 a 650 kg/h.

O sistema de refrigeração de simples estágio convencional, com condensador, válvula de expansão, evaporador e compressor, resfria o refrigerante secundário, propileno glicol, e pode operar sob diferentes condições de temperatura, de rotação do compressor e de vazão de propileno glicol.

A vazão de propileno glicol para o trocador de calor pode ser manipulada eletronicamente através de um variador de frequência acoplado à bomba de deslocamento positivo, a qual opera entre 0 e 60 Hz, correspondendo a uma vazão de propileno glicol entre 0 e 2800 L/h. A temperatura de entrada do propileno glicol no trocador de calor é mantida constante através de um controlador PID, que atua no sistema por meio de acionamento de uma resistência elétrica modulada de até 2500 W, e outras duas resistências de 2500 W cada uma, para acionamento *on-off*, instaladas no tanque pulmão de propileno

glicol, cuja capacidade é de 80 L. Na Figura 11 é apresentado um esquema simplificado do sistema de resfriamento de fluido secundário utilizado para alimentação do protótipo.

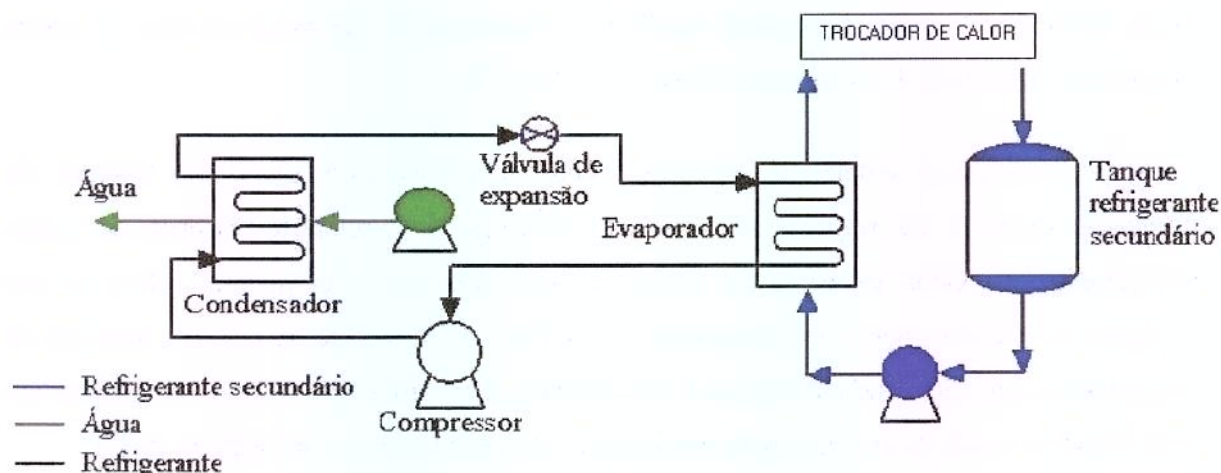


Figura 11 – Esquema simplificado do sistema de resfriamento de refrigerante secundário.

O sistema de aquecimento de água consiste em um tanque de aço inox com agitação mecânica e quatro resistências elétricas de 7500 W cada. A água é o fluido secundário de aquecimento e o sistema pode operar com condições variáveis de temperatura e de vazão. A temperatura de entrada de água quente nas camisas dos tanques é manipulada através de um controlador *on-off*, cuja atuação se dá por meio de acionamento das resistências elétricas no tanque de água quente.

III. 1. 2 – O Trocador de Calor de Tubo Duplo

O trocador de calor de tubo duplo de aço inox (Aço Inox 304) foi construído no LACPA, DEA-FEA, UNICAMP, sendo composto por três módulos de 2 m cada um. O trocador foi planejado para escoamento em contra-corrente, onde o produto escoar pelo tubo interno, enquanto o fluido térmico escoar através do espaço anular.

O tubo interno foi fixado dentro do tubo externo por meio de solda TIG e o fluido entra no tubo interno através de uma conexão do tipo TriClamp, localizada fora da seção própria do trocador. A entrada e a saída do fluido térmico se dá por meio de três conectores

que foram soldados aos tubos para permitir a vazão de propileno glicol de um ramo até o outro do trocador. Os dois comprimentos do tubo interno são conectados por uma curva de retorno soldada aos tubos.

O trocador de calor, bem como toda a tubulação de entrada e de saída, desde os tanques de alimentação de produto e o *chiller* até o trocador, foram isolados termicamente, para evitar dissipação de calor através do ar circundante. A espessura da camada de isolamento (elastômero) foi 2 cm. Na Figura 12 está apresentado um esquema do trocador de calor de tubo duplo utilizado nos ensaios.

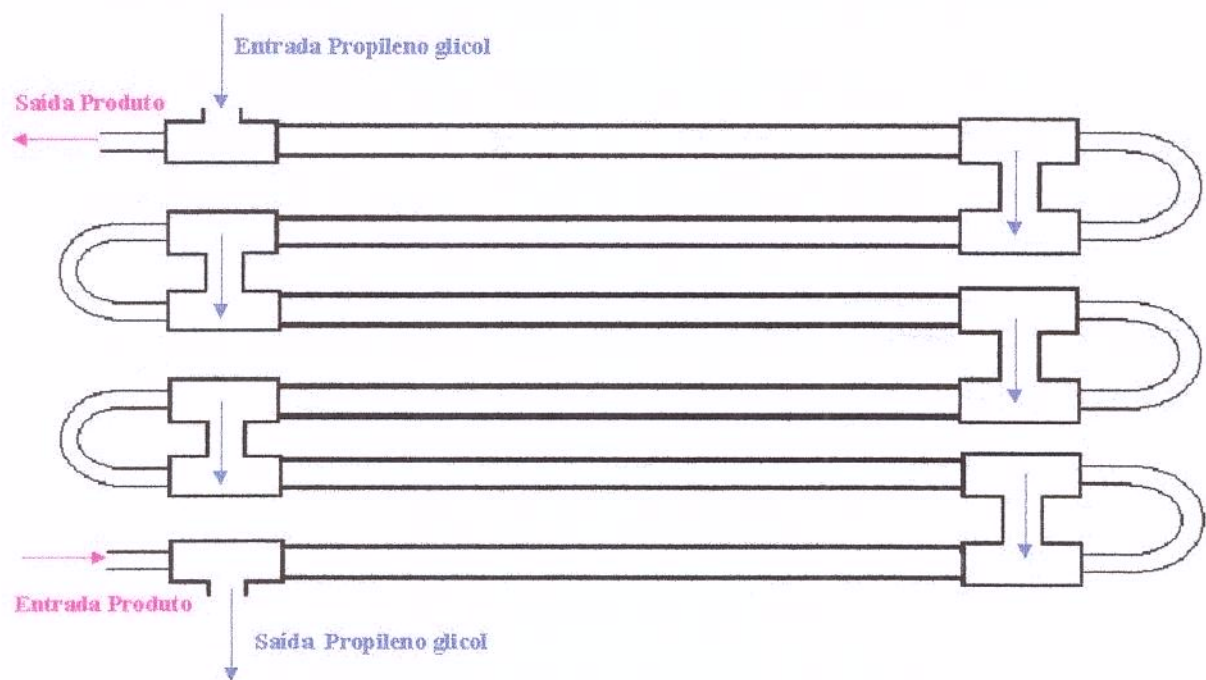


Figura 12 – Trocador de calor de tubo duplo utilizado nos ensaios.

Os diâmetros interno, externo e equivalente, bem como a área de escoamento (A) e de troca térmica (A_{tt}), o comprimento útil total para a troca térmica, o perímetro molhado ($Per.m.$) e o raio hidráulico são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Especificações do trocador de calor tubo duplo testado.

Tubos	$D_{in} (m)$	$D_{ex} (m)$	$D_{eq} (m)$	$A (m^2)$	$A_{tt} (m^2)$	$L (m)$	$Per.m (m)$	$r_h (m)$
Interno	0,0225	0,0254	-----	0,0004	0,4787	6	-----	-----
Externo	0,0480	0,0520	0,0652	0,0013	-----	6	0,0798	0,0163

III. 1. 3 - Produtos Alimentícios

Os produtos utilizados no estudo transiente do trocador de calor de tubo duplo durante o processo de resfriamento foram: água, soluções aquosas de sacarose a 8% e a 18% e açúcar líquido invertido.

Os experimentos foram realizados com uma única batelada de cada produto. A cada troca de produto fez-se uma limpeza em sistema fechado, circulando água em abundância para retirada do excesso de produto, posteriormente uma solução aquosa de soda cáustica a 2% na temperatura de 80°C e por fim, água em abundância para normalização do pH.

Para o preparo das soluções de sacarose a 8% e 18% foram utilizados oito sacos de 25 kg de açúcar refinado granulado, doado pela Usina da Barra S/A Açúcar e Álcool, Barra Bonita-SP, safra 2000/01. A composição básica do açúcar fornecida pela empresa é mostrada na Tabela 3.

Tabela 3 - Composição básica do açúcar fornecida pelo fabricante (Fonte: Usina da Barra S/A Açúcar e Álcool).

Componentes	%
Sacarose	99 a 99,50
Glucose e frutose	0,08 a 0,40
Umidade	0,10 a 0,20
Sais minerais	0,06 a 0,20

O açúcar líquido invertido foi doado pela empresa Açúcar Guarani S/A proveniente da Usina Cruz Alta, Olímpia-SP, acondicionado em tambores de 200 L com *liner* interno de polietileno, em temperatura ambiente. O açúcar líquido invertido INVEX Guarani® é um adoçante natural constituído pela mistura de glicose, frutose e sacarose, apresentado na forma líquida em uma solução límpida e ligeiramente amarelada, com odor e sabor característicos e com alto poder adoçante. Obtido pela hidrólise ácida de parte das moléculas de sacarose de uma solução de açúcar em água, este produto é fornecido na concentração de 76 a 78 % de açúcar sólido diluído.

As especificações fornecidas pela empresa do açúcar líquido invertido estão descritas na Tabela 4, juntamente com os resultados analíticos obtidos de uma amostra do lote utilizado nos ensaios (Produção de 26/11/2001).

Tabela 4 - Especificações do açúcar invertido fornecidas pelo fabricante e resultados analíticos do lote utilizado nos ensaios (Fonte: Açúcar Guarani S/A).

Ensaio	Método	Especificações	Resultado Analítico
Aparência	Visual	Líquido, límpido, livre de turbidez, carvão e materiais estranhos.	-----
Sabor e odor	Organoléptico	Livre de sabor e odor estranhos	-----
Brix (%)	ICUMSA	76 - 78	76,8
Cor (UI) máx.	ICUMSA	150	58
PH	Método interno	4,5 a 5,5	4,96
Inversão (%) min	Método interno	60	64,42
Mesófilas Totais (UFC/10ml) máx	Método interno	300	120
Bolores e Leveduras (UFC/10ml) max.	Método interno	300	50
Cinzas Max. (%)	Método interno	0,3	0,10

III. 1. 4 - Caracterização dos Sólidos Solúveis

As leituras de sólidos solúveis das soluções de sacarose e do açúcar líquido invertido foram realizadas em triplicata num refratômetro de bancada *Abbe Refractometer* (ATAGO).

Para a correção da leitura dos sólidos solúveis do açúcar invertido foi utilizada a Equação (35), sendo empregado o fator de correção F correspondente à porcentagem de sólidos para uma solução de 60% de inversão, conforme descrito no Item II.5.

III. 1. 5 – Caracterização das Propriedades Termo-Físicas dos Fluidos

As densidades dos produtos são obtidas pela leitura direta no medidor magnético de vazões e de densidade, apresentado a seguir no Item III. 1. 7. 1 (Figura 14).

O calor específico da água foi estimado pela Equação (17), descrita no Item II. 3.

Para as soluções de sacarose, o calor específico foi definido de acordo com dados tabelados de JUNK & PANCOAST (1973). Obteve-se uma correlação dependente da concentração de sólidos solúveis e da temperatura, válida nas faixas de 0 a 80°Brix e de 0 a 100°C. A correlação foi obtida por método de estimação não-linear no *software* STATISTICA 5.0. A expressão para o calor específico é dada na Equação (44) e apresentou coeficiente de correlação $R^2=0,9943$.

$$c = 0,965 - 0,0513.cs + 0,741 \times 10^{-3} T \quad (44)$$

Para estimativa da densidade e do calor específico da solução de propileno glicol, utilizou-se as equações (24) e (25), respectivamente.

III. 1. 6 – Caracterização das Propriedades Reológicas dos Fluidos

a) Água:

Os parâmetros reológicos da água foram estimados a partir da correlação dada na Equação (32), descrita no Item II. 4.

b) Soluções de Sacarose:

Os parâmetros reológicos das soluções de sacarose foram estimados a partir de dados tabelados de JUNK & PANCOAST (1973), conforme descrito no Item II. 4. Considerando as viscosidades dadas no manual de açúcares nas temperaturas de 0° a 80° C para soluções de sacarose com concentrações de 20 a 75% e os valores de viscosidade da água, calculados nas mesmas temperaturas pela Equação (13), obteve-se uma correlação da viscosidade das soluções de sacarose dependente da temperatura e da concentração. O ajuste dos dados tabelados para a viscosidade das soluções de sacarose e dos dados calculados para a água foi feito no *software* STATISTICA 5.0.

c) Açúcar Líquido Invertido:

Devido à inexistência da caracterização reológica do açúcar invertido a 60% de inversão, na literatura, houve a necessidade da estimativa dos parâmetros reológicos deste produto.

As medidas reológicas foram realizadas com amostras preparadas do mesmo lote. O comportamento reológico do açúcar invertido foi determinado em um reômetro rotacional Rheotest 2.1 (MLW) do tipo Searle, equipado com um sistema de sensor de cilindros concêntricos (relação de raios $Re/Ri=1,02$). Um banho termostático UCB12 (Van Den Científica LTDA) foi utilizado para controle da temperatura de trabalho de -2 a 37°C . A velocidade de rotação dos cilindros variou de 0,0667 a 291,60 rpm, sendo imposta através do seletor mecânico do aparelho. As tensões de cisalhamento foram obtidas pela multiplicação das leituras do torque pela constante do reômetro, enquanto as taxas de deformação foram determinadas pelo método de Krieger e Elrod até quarta ordem (KRIEGER & ELROD, 1953).

d) Propileno glicol:

A viscosidade do propileno glicol foi estimada de acordo com a Equação (33), descrita no Item II. 4.

III. 1. 7 – Sistema Remoto de Monitoração e Automação

As informações a serem obtidas através de medições com sensores nos ensaios de resfriamento são: vazão mássica e temperaturas do produto na entrada e na saída do trocador de calor, vazão volumétrica e temperaturas do fluido térmico na entrada e na saída do trocador de calor.

Para obtenção destes dados foi necessária a instrumentação eletrônica para aquisição de dados *on-line*, sendo utilizados transmissores sanitários de temperaturas e vazões. Os transmissores de temperatura utilizados estão conectados diretamente aos módulos do CLP, enquanto que os medidores de vazão do produto e do propileno glicol estão ligados em rede *Fieldbus* ao CLP. O acionamento dos motores das bombas e do compressor é feito digitalmente pelos variadores de frequência.

Na sala de controle, o microcomputador está conectado pela rede Ethernet à ponte DFI (*Bridge*), que por sua vez está conectada ao CLP e à rede *Fieldbus*, onde estão ligados os instrumentos de campo (*devices*), conforme apresentado no esquema da Figura 13.

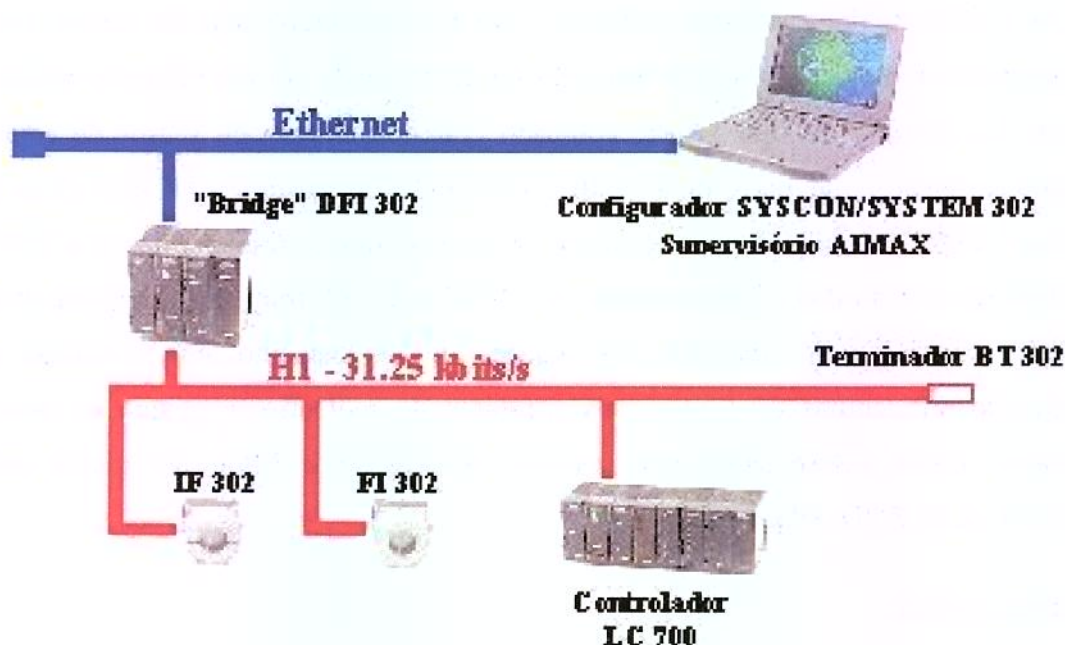


Figura 13 - Esquema da arquitetura para aquisição de dados *on-line*.

III. 1. 7. 1 - Sensores/Transdutores

- Quatro sensores sanitários de temperatura do tipo Pt100, Série 7610 (Pyrotec Automação, Campinas-SP);
- Medidor magnético de vazão volumétrica MAGFLO Flowmeter, Tipo MAG 5000 (Danfoss do Brasil Ind. e Comércio Ltda, São Paulo-SP);
- Dois variadores digitais de frequência - VLT 2800 (Danfoss do Brasil Ind. e Comércio Ltda, São Paulo-SP).
- Medidor magnético de vazão mássica, volumétrica, densidade e temperatura pelo princípio *coriollis*, Micro Motion Série R, mostrado na Figura 14 (Emerson Process Management do Brasil, Sorocaba-SP);



Figura 14 – Medidor magnético de vazão mássica, volumétrica, densidade e temperatura.

III. 1. 7. 2 - Sistema de Aquisição de Dados

- Protocolo de comunicação *Fieldbus Foundation* (Smar Equipamentos Industriais Ltda.);
- Instrumentos da linha *System302* (Smar Equipamentos Industriais Ltda., Sertãozinho-SP);
- Conversor de corrente para *Fieldbus* – IF302: para interligação de instrumentos com saída 4-20 mA à rede *Fieldbus*;
- Conversor de *Fieldbus* para corrente - FI302: para conversão de um sinal *Fieldbus* em um sinal 4 a 20 mA.;
- Controlador Lógico Programável compatível com instrumentos da rede *Fieldbus* – LC700: controlador digital de 16 bits;
- Interface *Fieldbus* de campo distribuída – DFI302;
- Interface *Fieldbus* para controle de processo - Placa PCI;
- Microcomputador Pentium III, 64 MB de memória RAM;

- Sistema WINDOWS NT 4.0;
- *Software* configurador de sistema - SYSCON: configuração, manutenção e operação dos instrumentos da rede *Fieldbus*;
- *Software* configurador do LC700 – CONF700: configuração do hardware do microcomputador para o sistema LC700 e criação de lógicas através de diagramas *Ladder*;
- *Software* supervisor – AIMAX 4.2.2: monitoramento dos processos, operações lógicas, controle e registros de tendência em tempo real e histórico.

III. 1. 8 – Materiais para Análises dos Resultados

- Microcomputador AMD-K6, 333 MHz, 64 MB de RAM;
- *Softwares* para tratamento dos resultados – EXCEL 2000 e STATISTICA 5.0.

III. 2 – METODOLOGIA

III. 2. 1 - Planejamento de Ensaios

Os ensaios experimentais consistiram na realização de perturbações das variáveis de entrada no trocador de calor após o sistema ter atingido o primeiro regime permanente nas condições iniciais de processo, as quais foram definidas de acordo com testes preliminares, respeitando os limites físicos do protótipo.

As perturbações no processo simularam uma função do tipo degrau, conforme descrito no Item II. 6. 1, sendo realizadas individualmente, alterando apenas uma variável de entrada, positiva ou negativamente, e simultaneamente, alterando três variáveis, de acordo com o planejamento experimental fatorial.

Observa-se que as perturbações simultâneas eram realizadas ao mesmo tempo, considerando que a frente de produto com a nova temperatura estivesse na entrada do trocador de calor, estimando-se o tempo de percurso através da velocidade calculada pela Equação (13).

As variáveis de entrada no trocador de calor foram: temperatura de entrada do produto (T_{ep}), vazão mássica do produto (m_p) e vazão volumétrica do propileno glicol (V_{pp}). A temperatura do propileno glicol na entrada do trocador não pôde ser perturbada devido à ausência de um tanque pulmão em condições de temperatura diferentes da condição inicial, o que possibilitaria a perturbação de temperatura de entrada de refrigerante.

A presença dos dois tanques de homogeneização e de válvulas com atuadores pneumáticos nas saídas dos tanques possibilitaram a perturbação da temperatura de entrada do produto no trocador de calor, enquanto que as vazões do produto e do propileno glicol foram perturbadas eletronicamente através dos variadores de frequência das bombas.

Na Figura 15 está mostrado um fluxograma das etapas a serem seguidas para realização dos ensaios.

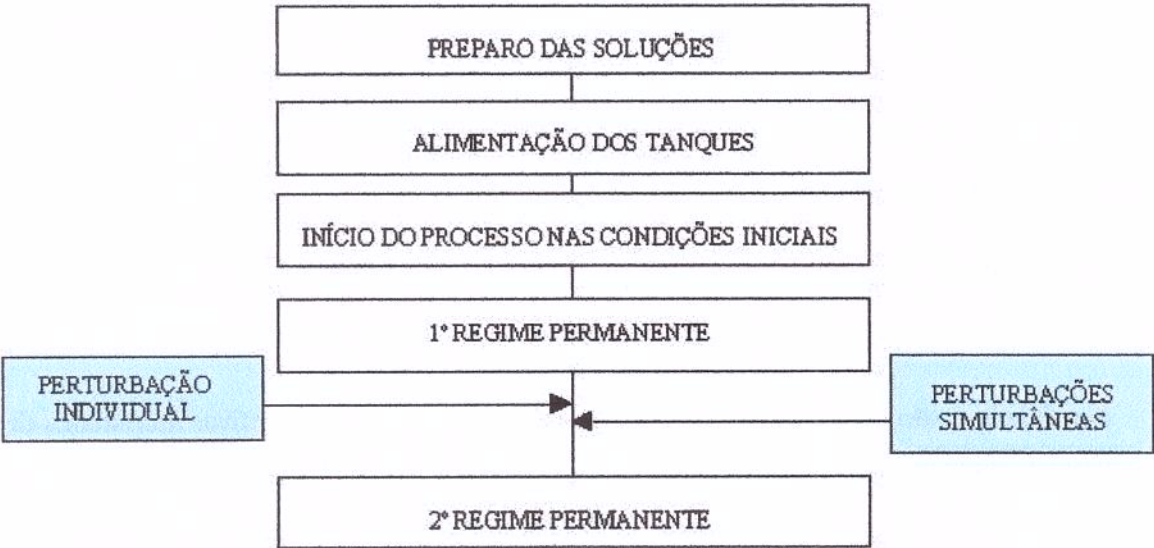


Figura 15 - Fluxograma das etapas a serem seguidas para realização dos ensaios.

III. 2. 1. 1 – Ensaios de Perturbações Individuais

Para o estudo do comportamento transiente da temperatura de saída de produtos alimentícios newtonianos, sob as perturbações individuais nas variáveis de entrada do trocador de calor, os seguintes fluidos foram resfriados: água, soluções de sacarose a 8% e a 18 % e açúcar líquido invertido.

As condições iniciais de processo (C I), bem como as amplitudes de perturbações aplicadas (ΔP), foram definidas em testes preliminares.

Os ensaios contemplaram perturbações negativas $[(-) \text{ e } (--)]$ e positivas $[(+) \text{ e } (++)]$. As amplitudes das perturbações simbolizadas por $(--)$ e $(++)$ foram de 1,66 a 2 vezes maiores do que as amplitudes das perturbações $(-)$ e $(+)$, respectivamente.

As perturbações com a mesma amplitude, porém em sentidos contrários, permitem a análise da simetria do processo, através de comparações entre os ensaios com perturbações $[(-) \text{ e } (+)]$ e $[(--) \text{ e } (++)]$. Enquanto que as perturbações de mesmo sentido, porém com amplitudes diferentes, permitem as análises relacionadas com a linearidade dos processos, através de comparações entre os ensaios com perturbações $[(-) \text{ e } (--)]$ e $[(+) \text{ e } (++)]$.

Para a água e para as soluções de sacarose, o mesmo número de ensaios foi realizado, doze para cada produto, totalizando 36 ensaios. Além do início do processo de resfriamento ocorrer nas mesmas condições para estes três fluidos (C I-1), as amplitudes de perturbações utilizadas também foram iguais.

As condições iniciais (C I-1) e as amplitudes de perturbações utilizados nos ensaios da água e das soluções de sacarose a 8 e 18% estão mostrados na Tabela 5.

Na Tabela 6 são apresentados os ensaios realizados com as respectivas amplitudes de perturbações empregadas em cada um deles, para a água e para as soluções de sacarose. No ensaio E01, por exemplo, perturbou-se individualmente a temperatura de entrada do produto para 21°C, após o sistema ter atingido o primeiro regime permanente nas condições iniciais descritas na Tabela 5.

Tabela 5 - Condições iniciais e amplitude de perturbações individuais utilizadas nos ensaios da água e das soluções de sacarose 8 e 18%.

ÁGUA, SACAROSE 8%, SACAROSE 18%			
Variáveis de entrada	CONDIÇÕES INICIAIS (C I)	AMPLITUDE DE PERTURBAÇÕES (ΔP)	
	C I-1	(+) e (-)	(++) e (--)
Temperatura Entrada Propileno ($^{\circ}\text{C}$)	-2	-----	-----
Temperatura Entrada Produto ($^{\circ}\text{C}$)	25	4	8
Vazão Produto (kg/h)	217	50	100
Vazão Propileno (L/h)	1400	467	934

Tabela 6- Ensaios de perturbações individuais realizados para a água e para as soluções de sacarose a 8 e 18% a partir das condições iniciais C I-1 ($T_{ep}=25^{\circ}\text{C}$, $mp=217$ kg/h, $V_{pp}=1400$ L/h).

Condições Iniciais	Ensaios	AMPLITUDE DE PERTURBAÇÕES (ΔP)		
		ΔT_{ep} ($^{\circ}\text{C}$)	Δmp (kg/h)	ΔV_{pp} (L/h)
C I-1	E 01	-4 (-)	---	---
	E 02	+4 (+)	---	---
	E 03	---	-50 (-)	---
	E 04	---	+50 (+)	---
	E 05	---	---	-467 (-)
	E 06	---	---	+467 (+)
	E 07	-8 (--)	---	---
	E 08	+8 (++)	---	---
	E 09	---	-100 (--)	---
	E 10	---	+100 (++)	---
	E 11	---	---	-934 (--)
	E 12	---	---	+934 (++)

No caso do açúcar invertido, além dos ensaios realizados nas C I-1, oito ensaios foram realizados a mais em relação à água e às soluções de sacarose, nos quais duas novas condições iniciais foram definidas (C I-2 e C I-3). Nas condições C I-2 e C I-3, a temperatura de entrada do produto foi alterada para 19°C e para 33°C , respectivamente. Nestes oito ensaios, perturbou-se as vazões de produto e de propileno glicol, no entanto, a variável temperatura de entrada de produto não foi perturbada.

Na Tabela 7 são apresentadas as condições iniciais (C I-1, C I-2 e C I-3) e as amplitudes de perturbações realizadas em cada variável de entrada nos ensaios com o açúcar invertido.

Tabela 7 - Condições iniciais e amplitude de perturbações individuais utilizadas nos ensaios do açúcar invertido.

AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO					
Variáveis de entrada	CONDIÇÕES INICIAIS (C I)			AMPLITUDE DE PERTURBAÇÕES (ΔP)	
	C I-1	C I-2	C I-3	(+) e (-)	(++) e (--)
Temperatura Entrada Propileno (°C)	-2	-2	-2	---	---
Temperatura Entrada Produto (°C)	25	19	33	3	6
Vazão Produto (kg/h)	217	217	217	50	83
Vazão Propileno (L/h)	1400	1400	1400	467	934

Na Tabela 8 estão descritos os vinte ensaios realizados para o açúcar invertido e as respectivas amplitudes de perturbações aplicadas em cada um deles a partir das diferentes condições iniciais estudadas, descritas na Tabela 7.

Tabela 8 - Ensaios de perturbações individuais realizados para o açúcar invertido a partir das condições iniciais C I-1 (Tep=25°C, mp=217 kg/h, Vpp=1400 L/h), C I-2 (Tep=19°C, mp=217 kg/h, Vpp=1400 L/h) e C I-3 (Tep=33°C, mp=217 kg/h, Vpp=1400 L/h).

Condições Iniciais	Ensaios	AMPLITUDE DE PERTURBAÇÕES (ΔP)		
		ΔTep (°C)	Δmp (kg/h)	ΔVpp (L/h)
C I-1	E 01	-3 (-)	---	---
	E 02	+3 (+)	---	---
	E 03	---	-50 (-)	---
	E 04	---	+50 (+)	---
	E 05	---	---	-467 (-)
	E 06	---	---	+467 (+)
	E 07	-6 (--)	---	---
	E 08	+6 (++)	---	---
	E 09	---	-83 (--)	---
	E 10	---	+83 (++)	---
	E 11	---	---	-934 (--)
	E 12	---	---	+934 (++)
C I-2	E 13	---	-50 (-)	---
	E 14	---	+50 (+)	---
	E 15	---	---	-467 (-)
	E 16	---	---	+467 (+)
C I-3	E 17	---	-83 (--)	---
	E 18	---	+83 (++)	---
	E 19	---	---	-934 (--)
	E 20	---	---	+934 (++)

Observa-se pelas Tabelas 5 e 7 que as faixas de perturbações de temperatura de entrada e de vazão de produto aplicadas para o açúcar invertido foram menores, comparadas com as da água e as das soluções de sacarose. Constatou-se que a pressão na

linha de produto aumentava consideravelmente quando se utilizava o açúcar invertido, variando 4 bar acima da pressão atingida na linha com escoamento de água e de soluções de sacarose (aproximadamente 4 bar).

Como a densidade e viscosidade do açúcar invertido, a baixas temperaturas, são maiores do que as da água e a das soluções de sacarose, a pressão na linha de recalque também era maior devido ao maior atrito na tubulação promovido por este produto. Portanto, para evitar problemas de alta pressão nas tubulações e no trocador de calor, decidiu-se por trabalhar com vazões reduzidas e amplitudes de perturbações de temperatura de entrada menores, evitando temperaturas mais baixas.

III. 2. 1. 2 – Ensaios de Perturbações Simultâneas: Planejamento Experimental

Para o estudo do comportamento da temperatura de saída de produtos do trocador de calor de tubo duplo sob as perturbações simultâneas, os seguintes fluidos foram resfriados: solução de sacarose 18% e açúcar invertido.

Portanto, realizaram-se dois planejamentos fatoriais compostos centrais (PFCC) 2^3 com três pontos centrais cada um e valor de α igual a 1,6812, contemplando todas as combinações possíveis entre as perturbações, totalizando 17 ensaios para cada fluido testado.

As variáveis independentes do planejamento experimental foram as variáveis de entrada no trocador: vazão mássica e temperatura de entrada do produto e vazão volumétrica do fluido térmico.

As variáveis dependentes ou variáveis-resposta avaliadas foram: temperatura de saída do produto depois de atingido o segundo regime permanente (T_{sp}), equivalente ao parâmetro “B”, e os parâmetros gráficos da curva de resposta transiente do processo (t_d e z), conforme Figura 9.

Os níveis do planejamento experimental foram perturbações nas condições iniciais das variáveis de entrada, sendo designados pelos códigos (-1), (0) e (+1), de acordo com a terminologia do PFCC descrita no Item II. 7.

As condições iniciais do processo estão descritas na Tabela 9, sendo próximas às condições iniciais C I-1 utilizadas nos ensaios de perturbações individuais, descritas nas Tabelas 5 e 7. Para a solução de sacarose 18%, as condições iniciais dos ensaios de perturbações simultâneas foram mantidas em relação às perturbações individuais. Para o açúcar invertido, a vazão inicial de produto foi diminuída nos ensaios de perturbações simultâneas, comparadas com os ensaios de perturbações individuais, devido a problemas operacionais de pressão na linha, apresentados no Item III. 2. 1. 1.

Tabela 9 - Condições iniciais do processo nos ensaios de perturbações simultâneas para a solução de sacarose 18% e para o açúcar invertido.

Variáveis de entrada	CONDIÇÕES INICIAIS (C I)	
	Sacarose 18%	Acúcar Invertido.
Temperatura Entrada Produto (°C)	25	25
Temperatura Entrada Propileno (°C)	-2	-2
Vazão Produto (kg/h)	217	150
Vazão Propileno (L/h)	1400	1400

Valores para os níveis de perturbações aplicados nas variáveis independentes estão nas Tabelas 10 e 11 para a solução de sacarose 18% e para o açúcar invertido, respectivamente.

Tabela 10 - Níveis de Perturbações do Planejamento 2^3 para a solução de sacarose 18%.

Variáveis Independentes	NÍVEIS DE PERTURBAÇÕES				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Temperatura Entrada Produto (°C)	-7,1	-3,0	3,0	9,0	13,1
Vazão Produto (kg/h)	-118,2	-50,0	50,0	150,0	218,2
Vazão Propileno (L/h)	-909,8	-385,0	385,0	1155,0	1679,9

Tabela 11 - Níveis de Perturbações do Planejamento 2^3 para o açúcar invertido.

Variáveis Independentes	NÍVEIS DE PERTURBAÇÕES				
	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
Temperatura Entrada Produto (°C)	-7,1	-3,0	3,0	9,0	13,1
Vazão Produto (kg/h)	-82,7	-35,0	35,0	105,0	152,7
Vazão Propileno (L/h)	-909,8	-385,0	385,0	1155,0	1679,9

A faixa de perturbação de vazão de produto para o açúcar invertido também foi diminuída com relação à solução de sacarose, evitando assim, pressões altas na tubulação e no trocador de calor.

A matriz de ensaios do PFCC para cada produto é mostrada na Tabela 12, conforme terminologia convencional utilizada para esta metodologia, descrita no Item II 7.

Tabela 12 - Planejamento fatorial composto central para a solução de sacarose 18% e para o açúcar invertido para realização das perturbações simultâneas.

Ensaios	Variáveis de entrada		
	ΔT_p (°C)	Δm_p (kg/h)	ΔV_{pp} (L/h)
E 01	-1	-1	-1
E 02	+1	-1	-1
E 03	-1	+1	-1
E 04	+1	+1	-1
E 05	-1	-1	+1
E 06	+1	-1	+1
E 07	-1	+1	+1
E 08	+1	+1	+1
E 09	$+\alpha$	0	0
E 10	$-\alpha$	0	0
E 11	0	$+\alpha$	0
E 12	0	$-\alpha$	0
E 13	0	0	$+\alpha$
E 14	0	0	$-\alpha$
E 15	0	0	0
E 16	0	0	0
E 17	0	0	0

Vale ressaltar que o PFCC realizado neste trabalho foi intencionalmente adequado pelas variáveis independentes escolhidas para atribuições dos níveis, pois tradicionalmente utiliza-se esta metodologia para avaliação em condições estacionárias e não em estado transiente. Os níveis escolhidos foram perturbações das variáveis independentes, ou variáveis de entrada do trocador, sendo respeitadas as simetrias entre eles, de acordo com a metodologia do PFCC convencional. Sendo assim, utilizou-se esta metodologia padrão para aplicação em curvas de reposta transiente, inédito na literatura.

III. 2. 2 – Considerações quanto à Localização dos Sensores de Temperatura

Os sensores de temperatura utilizados para aquisição dos valores de temperatura de entrada e de saída do produto encontram-se localizados distantes da entrada e da saída do trocador de calor de tubo duplo testado, por razões econômicas de aproveitamento de sensores de temperatura já instalados nas tubulações pré-existentes do LACPA.

Assim, o estudo das curvas de resposta não pôde se restringir apenas ao trocador de calor. Foi necessário considerar como volume de controle parte da tubulação de produto, da saída do trocador até o sensor de temperatura de saída. Já a tubulação de entrada do produto no trocador, ou seja, a tubulação desde o tanque de alimentação do produto até a entrada do trocador de calor foi considerada fora do volume de controle.

O esquema representado na Figura 16 mostra as distâncias entre os sensores e o trocador de calor e o volume de controle considerado para análises das curvas de resposta.

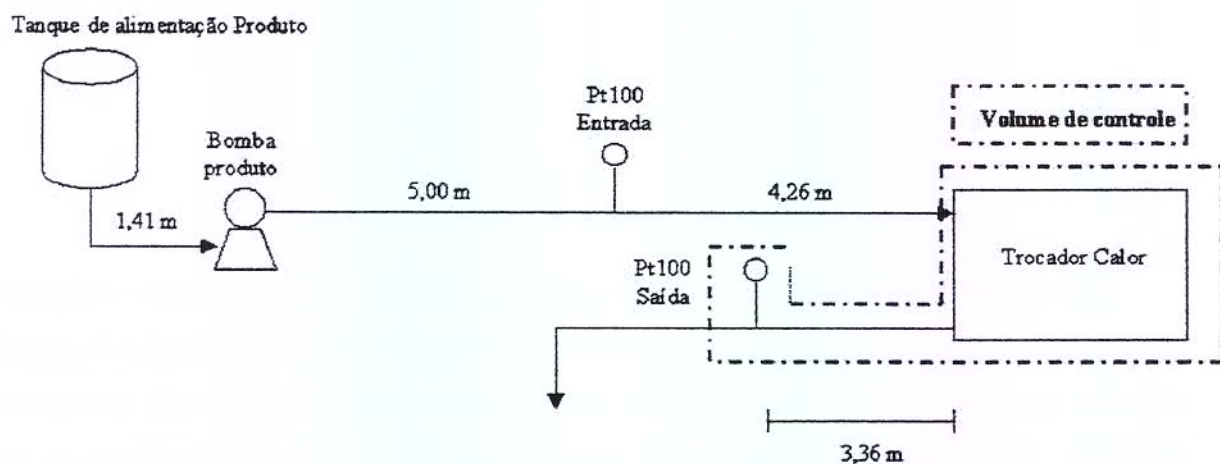


Figura 16 - Distâncias dos sensores de temperatura para a entrada e a saída do trocador e volume de controle para análises.

Dessa forma, para descontar do volume de controle estudado a tubulação de entrada do trocador de calor, fez-se necessário descontar o tempo médio para o produto percorrer este percurso em cada ensaio de perturbação de temperatura de entrada de produto realizado, tanto nos individuais quanto nos de simultâneas.

No caso das perturbações de vazão de produto e de vazão de propileno glicol, as mesmas eram “sentidas” imediatamente na entrada do trocador. Mas, quando se realizava a perturbação de temperatura de entrada de produto, mudava-se o tanque de alimentação e esta nova frente de fluido não era “sentida” imediatamente na entrada do trocador. Este tempo médio inerente ao percurso do fluido na tubulação de entrada foi calculado em relação à velocidade média do fluido no interior da tubulação e então, descontado para consideração do volume de controle apresentado na Figura 16.

Para as perturbações individuais de temperatura de entrada do produto, este tempo médio foi descontado nas planilhas de análise. Para as perturbações simultâneas, esperou-se a nova frente de produto com a nova temperatura chegar ao trocador, baseando-se no tempo médio de percurso do fluido na tubulação de entrada, para então realizar as perturbações de vazões do produto e do propileno glicol.

Assim, para cada perturbação de temperatura de produto à mesma vazão mássica das condições iniciais previstas, calculava-se o tempo que a frente demoraria a atingir o trocador de calor e então, perturbava-se as duas vazões.

Este tempo foi calculado em função das velocidades médias dos fluidos no interior da tubulação, que por sua vez foram obtidas através de um balanço macroscópico de massa na tubulação de entrada, considerando uma aproximação do regime permanente e escoamento laminar plenamente desenvolvido, conforme a Equação (13), descrita no Item II.2.1, uma vez que a temperatura de entrada e a densidade eram previstas.

III. 2. 3 – Métodos de Avaliação dos Resultados

III. 2. 3. 1 – Métodos de Análises dos Resultados das Perturbações Individuais

A partir dos ensaios de perturbações individuais e obtidas as curvas de resposta transiente do processo, conforme descrito no Item II. 6. 1, os dados experimentais podem ser aproximados a funções de segunda ordem com $\xi=1$, segundo a Equação (41), de acordo

com STEPHANOPOULOS (1984). O ajuste dos pontos experimentais a modelos matemáticos facilita a geração de históricos comparativos, como os adimensionais.

Esta aproximação das respostas de temperatura de saída à Equação (41) é válida para fins de controle e foi considerada devido à complexidade do sistema, o qual pode ser caracterizado como um sistema de ordem superior ou complexo, ou como um sistema de primeira ordem com tempo morto ou ainda, representar um sistema multicapacitivo (sistemas de primeira ordem associados em série), cujas respostas transientes assemelham-se ao formato “S”, como apresentado na Figura 9.

O ajuste é feito por método de estimação não-linear no *software* STATISTICA 5.0 a partir dos valores de diferencial de temperatura, $DT_{sp}=T-T_{1^{o}RP}$, em função do tempo t , onde T é o valor instantâneo da temperatura dos fluidos e $T_{1^{o}RP}$ é o valor de estabilização da temperatura dos produtos nas condições iniciais, correspondendo à temperatura de estabilização do primeiro regime permanente.

Há vários métodos para avaliar as influências das perturbações sobre as variáveis de processo. Para cada fluido testado faz-se uma análise comparativa a partir das curvas de resposta, relacionando as perturbações positivas e negativas para cada variável e as perturbações de diferentes intensidades. Além disso, faz-se uma análise comparativa entre os fluidos testados para cada variável perturbada na mesma intensidade.

III. 2. 3. 1. 1 – Históricos Adimensionais

Com o intuito de analisar a simetria destas curvas de resposta entre as variáveis após as perturbações positivas e negativas e perturbações de diferentes amplitudes serão construídos gráficos adimensionais para cada fluido testado, T^* versus t^* , onde T^* e t^* são as variáveis adimensionalizadas definidas conforme as Equações (45) e (46), respectivamente:

$$T^* = \frac{T - T_{1^{o}RP}}{T_{2^{o}RP} - T_{1^{o}RP}} \quad (45)$$

$$t^* = \frac{t - t_{1^{\circ}RP}}{t_{2^{\circ}RP} - t_{1^{\circ}RP}} \quad (46)$$

Na Equação (45), T é o valor instantâneo da temperatura dos fluidos, $T_{1^{\circ}RP}$ é o valor de estabilização da temperatura dos produtos nas condições iniciais e $T_{2^{\circ}RP}$ é o valor da temperatura dos fluidos no segundo regime permanente, após as perturbações. De forma análoga, define-se a variável adimensional temporal t^* , de acordo com a Equação (46).

Os gráficos adimensionais são gerados a partir das equações ajustadas aos dados experimentais, conforme descrito no Item III. 2. 3. 1 e permitem as análises comparativas de simetria entre os ensaios das seguintes perturbações: $[(-) \text{ e } (+)]$, $[(-) \text{ e } (++)]$, $[(-) \text{ e } (--)]$ e $[(+ \text{ e } (++)]$.

III. 2. 3. 1. 2 - Fator de Sensibilidade

Uma forma quantitativa de analisar o grau de influência das perturbações na temperatura final dos fluidos pode ser feita através da análise do Fator de Sensibilidade (FS), que é calculado conforme a Equação (47), onde P_i é o valor inicial da variável de entrada perturbada e P_0 é o valor desta variável após perturbação.

$$FS = \frac{\frac{T_{2^{\circ}RP} - T_{1^{\circ}RP}}{T_{1^{\circ}RP}}}{\frac{P_0 - P_i}{P_i}} \quad (47)$$

Os cálculos serão realizados a partir dos diferenciais de temperatura obtidos dos ajustes das curvas de resposta à Equação (41), sendo os mesmos em valores absolutos.

O FS mostra quantitativamente como uma perturbação individual das variáveis de entrada afeta a temperatura final dos fluidos. Como seu cálculo se referencia apenas aos valores da variável resposta atingidos após o regime permanente, sua análise não permite a comparação das simetrias do comportamento da variável resposta, temperatura de saída dos

produtos, durante o regime transiente, que será obtida apenas pelas análises dos gráficos adimensionais.

O FS também auxilia na interpretação das linearidades dos processos, que são consideradas a partir de valores iguais ou próximos de FS.

III. 2. 3. 2 – Métodos de Análises dos Resultados das Perturbações Simultâneas

Para realização das perturbações simultâneas, fez-se necessário realizar primeiramente a perturbação de temperatura de entrada de produto, devido ao tempo de residência dos produtos na tubulação de entrada do trocador de calor, conforme descrito no Item III. 2. 2.

As curvas de resposta transiente do processo, relativas aos ensaios de perturbações simultâneas, ajustadas a modelos matemáticos de segunda ordem com $\xi=1$ (Equação 41), proporcionam a obtenção do diferencial de temperatura de saída dos produtos (DTsp ou B) e dos valores gráficos, t_d e z , a partir da tangente no ponto de inflexão (Figura 9), para estimativa de parâmetros de sintonia de controladores.

A simetria destas curvas de resposta da diferença de temperatura de saída dos produtos pode ser analisada através dos gráficos adimensionais.

Através dos valores das variáveis dependentes atingidos após as perturbações, os efeitos principais e de interações das variáveis independentes sobre as variáveis dependentes serão avaliados com o auxílio do *software* STATISTICA 5.0, modo *Experimental Design*. São analisados erros puro e residual e testes t , p e R^2 . Os efeitos são também analisados visualmente através do “Gráfico de Pareto”.

Para obtenção das superfícies de resposta linear ou quadrática que representam o comportamento das variáveis-resposta dos fluidos em função de duas variáveis de entrada, são necessários os valores do coeficiente de correlação R^2 e a relação de $F_{\text{calculado}}$ (F_{Calc}) e F_{tabelado} (F_{Tab}) dos modelos quadrático e linear. A superfície de resposta é significativa e

preditiva para os valores de R^2 próximos de “1” e $F_{\text{Calc}}/F_{\text{Tab}} > 4$, segundo BRUNS *et al.* (1995).

O valor do parâmetro “t” indica o quão grande é o efeito de uma perturbação da variável independente sobre a variável resposta, em relação ao erro padrão. O teste “p” mede a probabilidade de significância baseado no “t” calculado. Na literatura, geralmente são considerados significativos os parâmetros com $p < 0,05$, correspondendo ao limite de confiança de 95%. O valor de R^2 fornece uma medida de quanto a variabilidade nas respostas observadas podem ser explicadas pelos fatores experimentais e suas variações.

O modelo matemático probabilístico obtido representa o comportamento das respostas (diferença de temperatura final do produto no 2º regime permanente, DTsp ou B, e os parâmetros, td e z) em função das perturbações nas variáveis de entrada no trocador.

III. 2. 3. 3 – Estimativa Experimental do Coeficiente Global de Transferência de Calor, U_{exp}

Apesar de não ser o intuito deste trabalho, quanto à verificação dos coeficientes globais de transferência de calor (U), ter-se-á uma análise deste parâmetro, obtido no primeiro e no segundo regime permanente, a fim de ilustrar a influência das alterações nas condições de operação deste processo sobre a eficiência de troca térmica.

Utilizando as Equações (1), (3) e (4) apresentadas no Item II. 2, estimou-se o valor experimental do coeficiente global de troca térmica. Os coeficientes de troca térmica, h, não foram estimados por correlações, devido à complexidade do escoamento laminar, principalmente para o espaço anular do trocador de calor de tubo duplo. Além disso, não se pode afirmar que o fluxo de calor e as temperaturas de parede foram mantidos constantes.

O cálculo dos coeficientes globais de troca térmica para cada ensaio realizado baseou-se apenas nos valores experimentais de vazão de produto e nas temperaturas medidas pelos sensores de entrada e de saída do trocador de calor, obtidos no primeiro e segundo regime permanente.

O calor específico foi obtido conforme descrito no Item III. 1. 5. Para o cálculo do calor específico da água, utilizou-se a Equação (17).

No caso das soluções de sacarose e do açúcar invertido, utilizou-se a Equação (44) para o cálculo do calor específico em função da temperatura e da concentração de sólidos solúveis na solução, baseada nos dados tabelados de JUNK & PANCOAST (1973).

Devido à dificuldade em se encontrar na literatura valores para as propriedades físicas do açúcar líquido invertido, utilizou-se a mesma correlação dada na Equação (44), obtida para as soluções de sacarose, considerando concentração de sólidos solúveis de 75°Brix, com o intuito apenas de se obter valores aproximados para os coeficientes globais de troca térmica nos ensaios realizados com o açúcar invertido.

Os valores de U experimentais para cada ensaio foram tabelados para análise comparativa de $U_{1^{o}RP}$ e de $U_{2^{o}RP}$ entre os fluidos.

IV – RESULTADOS E DISCUSSÕES

IV. 1 – ANÁLISES DE SÓLIDOS SOLÚVEIS DOS FLUIDOS

As leituras dos sólidos solúveis foram realizadas conforme descrito no Item III. 1. 3. A média de sólidos solúveis obtida e o desvio padrão para cada produto estão apresentados na Tabela 13.

Para o açúcar líquido invertido, a média de sólidos solúveis obtida e o desvio padrão foram respectivamente $75,06 \pm 0,45$ °Brix. Utilizando o fator de 0,0235, correspondente a esta leitura de sólidos solúveis (JUNK & PANCOAST, 1973), a média e o desvio padrão dos sólidos solúveis da amostra corrigida foi de $76,11 \pm 0,46$, conforme o padrão especificado pelo fabricante, apresentado na Tabela 4.

Tabela 13 – Concentração das soluções de sacarose a 8 e 18% e do açúcar invertido em °Brix.

Produtos	°Brix
Sacarose 8%	$8,07 \pm 0,33$
Sacarose 18%	$18,11 \pm 0,57$
Açúcar Invertido	$75,06 \pm 0,45$

IV. 2 – ANÁLISES DA REOLOGIA DOS FLUIDOS

a) Soluções de Sacarose 8% e 18%

De acordo com o Item III. 1. 6, a correlação dependente da temperatura e da concentração de sólidos solúveis para a viscosidade das soluções de sacarose apresentaram coeficiente de correlação de 0,995, sendo válida para as temperaturas de 0 °C a 80°C e para concentrações de 0 a 75%. Esta correlação é expressa na Equação (48), onde a temperatura é dada em Kelvin e X_s é a fração de sólidos solúveis na solução:

$$\mu = 1,092821 \times 10^{-17} \exp(58,068286/0,008314\theta) \exp(0,2102637X_s) \tag{48}$$

Utilizando a Equação (48), os valores obtidos para as soluções de sacarose a 8% e 18% são e ,respectivamente.

b) Açúcar Invertido

Através das medidas realizadas no reômetro nas temperaturas de -2 a 37°C foi possível caracterizar reologicamente o fluido, conforme descrito no Item III. 1. 6.

Para a confirmação do comportamento newtoniano do açúcar invertido, os dados foram primeiramente ajustados pela Lei da Potência (Equação 27), modelo empírico freqüentemente utilizado na literatura (PRENTICE, 1984).

Os resultados mostraram que o fluido se comporta como um fluido newtoniano dentro da faixa de temperatura estudada, visto que os valores dos índices de comportamento do fluido ajustados foram “1”, conforme apresentados na Tabela 14. Sendo assim, a Equação (27) pode ser simplificada, sendo o índice de consistência (K), o valor da própria viscosidade do fluido (μ), conforme a Equação (26).

Tabela 14 - Reologia do açúcar invertido de -2 a 37°C.

T(°C)	n	K (Pa.s)	R²
-2,0	1,000	16,021	0,9995
8,0	0,998	4,171	0,9998
15,0	1,002	1,765	0,9998
21,5	0,999	0,959	0,9999
28,0	1,003	0,471	0,9998
37,0	0,999	0,248	0,9997

A viscosidade do fluido foi ajustada de acordo com a relação de Arrhenius (Equação 27), cujos parâmetros são apresentados na Tabela 15, juntamente com o coeficiente de correlação obtido no *software* STATISTICA 5.0.

Tabela 15 - Ajuste dos parâmetros para o cálculo da viscosidade do açúcar invertido.

μ (kJ/molK)	Ea (kJ/molK)	R²
5,59x10 ⁻¹⁴	75,00	0,998

Da caracterização reológica nas diferentes temperaturas obteve-se o reograma da solução pela Lei da Potência, representado em um gráfico logarítmico da tensão de cisalhamento *versus* taxa de deformação, conforme é mostrado na Figura 17.

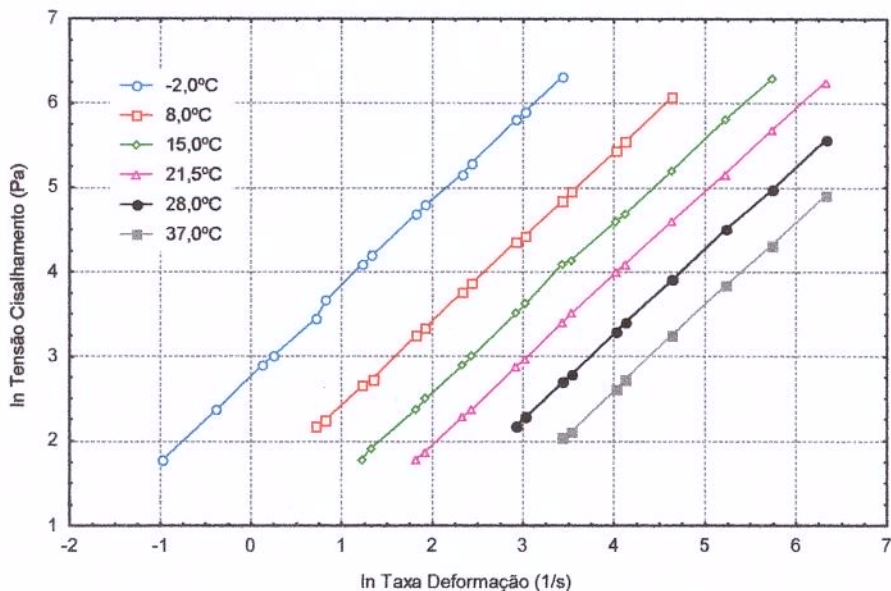


Figura 17 - Reogramas do açúcar invertido a diferentes temperaturas.

IV. 3 – ANÁLISES DAS PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS

Nos ensaios das perturbações individuais de temperatura de entrada de produto, descontou-se para análises das curvas de resposta o tempo médio de chegada da nova frente de fluido, desde a saída do tanque de alimentação até a entrada do trocador, conforme descrito no Item III. 2. 2, para consideração do volume de controle apresentado na Figura 16.

Para cada ensaio realizado, obteve-se uma média da vazão e da densidade do produto, medidas no primeiro regime permanente ou condições iniciais pelo medidor magnético ilustrado na Figura 14. Com os valores médios de vazão e de densidade e com a área fixa de escoamento de $3,976 \times 10^{-4} \text{ m}^2$ calculada a partir do diâmetro interno da tubulação de produto, obteve-se o valor da velocidade média do produto no interior da tubulação, através

da Equação (13). A distância considerada para o cálculo do tempo médio foi de 10,67 m, de acordo com a Figura 16.

Assim, para cada ensaio de perturbação individual de temperatura de entrada de produto, ensaios E01, E02, E07 e E08, descritos nas Tabelas 6 e 8, para a água, as soluções de sacarose e o açúcar invertido, obteve-se os valores médios dos tempos de percurso e desvio padrão, que são apresentados na Tabela 16, para ilustrar os tempos médios descontados ao longo destes quatro ensaios para cada fluido testado.

Tabela 16 - Tempos médios calculados para desconto ao longo dos quatro ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada para cada produto testado.

VALORES MÉDIOS DOS ENSAIOS E01, E02, E07 E E08				
	Água	Sacarose 8%	Sacarose 18%	Açúcar Invertido
Vazão (kg/h)	217,00 ± 0,62	217,73 ± 1,27	217,61 ± 1,53	217,01 ± 0,30
Densidade (kg/m³)	997,57 ± 1,61	1038,18 ± 1,75	1074,98 ± 1,49	1387,61 ± 1,96
Velocidade (m/s)	0,152 ± 0,001	0,148 ± 0,002	0,141 ± 0,001	0,1092 ± 0,0003
Tempo (min)	1,170 ± 0,003	1,218 ± 0,005	1,260 ± 0,008	1,629 ± 0,004

IV. 3. 1 – Históricos Experimentais

A Figura 18 apenas ilustra o histórico dos dados experimentais das temperaturas de saída da água, obtido nos ensaios de perturbações individuais, sendo que os históricos das temperaturas de saída das soluções de sacarose 8 e 18% e do açúcar invertido, referentes a todos os ensaios realizados, após perturbações individuais nas variáveis de entrada, são mostrados nas Figuras A. 1. 1, A. 1. 2 e A. 1. 3 do Apêndice A, respectivamente.

Os históricos são mostrados pelas curvas de resposta do processo, representadas pelo comportamento das temperaturas de saída dos produtos do trocador, após a perturbação, em função do tempo. Sendo assim, o tempo zero indica o instante em que a perturbação foi realizada, após o processo ter atingido o primeiro regime permanente.

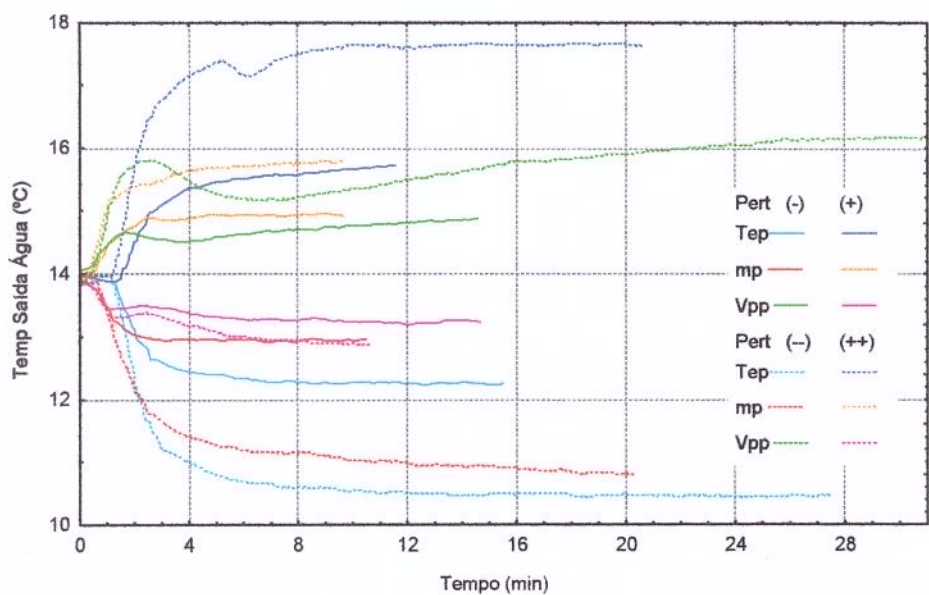


Figura 18 - Curvas de resposta experimental das temperaturas de saída da água após perturbações individuais nas variáveis de entrada.

No caso da solução de sacarose 8%, observa-se pela Figura A. 1. 1 a dificuldade encontrada em se manter as condições iniciais entre os ensaios, obtendo assim diferentes condições de primeiro regime permanente, porém muito próximas, variando cerca de $\pm 1^{\circ}\text{C}$.

Para o açúcar invertido, oito ensaios foram realizados a mais em relação aos outros produtos, conforme descrito no Item III. 2. 1. 1, sendo evidenciadas pela Figura A. 1. 3, as diferentes condições iniciais estudadas, que proporcionaram temperaturas de saída no primeiro regime permanente distintas umas das outras.

Fazendo-se uma análise visual inicial pelas Figuras 18, A. 1. 1, A. 1. 2 e A. 1. 3, observa-se comportamentos semelhantes entre os fluidos. Perturbações negativas, [(-) e (--)], na temperatura de entrada e na vazão do produto provocam desvios negativos na temperatura de saída do produto. Enquanto que perturbações negativas na vazão de propileno glicol provocam desvios positivos na temperatura de saída do produto. Da mesma forma, perturbações positivas, [(+) e (++)], na temperatura de entrada e na vazão do produto provocam desvios positivos na temperatura de saída do produto, enquanto que

perturbações positivas na vazão de propileno glicol provocam desvios negativos na temperatura de saída do produto.

Observa-se também que as perturbações negativas de temperatura de entrada e vazão de produto em maiores intensidades, $[(-)]$, provocam um maior desvio negativo de temperatura de saída de produto, enquanto que a perturbação negativa de vazão de propileno glicol em maior intensidade provoca um maior desvio positivo na temperatura de saída do produto. De forma análoga, perturbações positivas de temperatura de entrada e vazão de produto em maiores intensidades, $[(+)]$, provocam um maior desvio positivo de temperatura de saída de produto, enquanto que a perturbação positiva de vazão de propileno glicol em maior intensidade provoca um maior desvio negativo na temperatura de saída do produto.

Esta análise visual é quantificada pelo fator de sensibilidade, enquanto que a simetria entre as perturbações é obtida pelos gráficos adimensionais.

Em todos os fluidos testados, nota-se um maior desvio das temperaturas de saída dos produtos ao perturbar a temperatura de entrada do produto. Observa-se também, atrasos nas respostas em todos os casos, sendo este comportamento mais intensificado nas perturbações de temperatura de entrada do produto.

Este maior atraso na resposta correspondente aos ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada de produto é explicado devido ao tempo de permanência do fluido dentro do trocador de calor de tubo duplo, conforme descrito no Item II. 6. 1. No caso das perturbações de vazões, a resposta é quase instantânea, enquanto que na perturbação de temperatura, o fluido tem que percorrer todo o trocador e a resposta da saída não é imediata.

No entanto, a resposta de um processo de primeira ordem com tempo morto pode ser aproximada, para fins de controle, a uma curva do tipo “S”, representativa de um sistema de segunda ordem, de acordo com STEPHANOPOULOS (1984).

IV. 3. 2 – Ajuste dos Dados Experimentais de Diferença de Temperatura dos Produtos sob Perturbações Individuais ao Modelo de Segunda Ordem

Para facilitar as análises de simetria entre as perturbações positivas e negativas e entre as perturbações de diferentes intensidades, os pontos experimentais da diferença de temperatura de saída dos produtos foram ajustados à Equação (41), conforme descrito no Item III. 2. 3. 1.

Na Tabela 17 são apresentados os parâmetros da Equação (41), com os respectivos coeficientes de correlação, obtidos nos ensaios E01 a E12 de perturbações individuais para a água e para as soluções de sacarose 8% e 18%.

Tabela 17 - Parâmetros das funções ajustadas aos pontos experimentais da diferença de temperatura de saída da água e das soluções de sacarose 8% e 18%, após perturbações individuais, e coeficientes de correlação.

Ensaio	ÁGUA			SACAROSE 8%			SACAROSE 18%		
	Kpr	τ	R	Kpr	τ	R	Kpr	τ	R
E 01	-1,6097	1,2423	0,980	-1,4960	1,2192	0,988	-2,1000	1,2736	0,980
E 02	1,7557	1,5600	0,978	1,4063	3,2299	0,986	1,5000	1,1206	0,982
E 03	-0,9203	0,6128	0,999	-1,0253	0,7172	0,995	-1,2900	0,5000	0,983
E 04	0,9573	0,6548	0,992	0,6695	0,8491	0,975	0,9842	0,8581	0,985
E 05	0,7896	0,6178	0,996	0,8235	0,5344	0,993	0,6741	0,7785	0,997
E 06	-0,5817	0,6678	0,988	-0,4115	0,6178	0,997	-0,5791	0,4800	0,948
E 07	-3,4650	1,2844	0,985	-4,4646	1,0912	0,992	-4,1313	1,1722	0,991
E 08	3,6955	1,2779	0,982	3,5920	1,3723	0,981	4,4562	1,2590	0,989
E 09	-3,1300	1,2039	0,980	-3,3892	0,8123	0,998	-3,7729	1,0592	0,997
E 10	1,8300	0,6423	0,974	1,5024	0,8499	0,995	1,5334	0,7508	0,993
E 11	2,2712	0,6684	0,995	2,0066	0,7162	0,992	1,7699	0,7715	0,995
E 12	-1,0917	0,5934	0,997	-1,014	0,6445	0,996	-0,8275	0,7054	0,997

Valores negativos do ganho proporcional Kpr indicam um abaixamento da temperatura de saída do produto em relação a sua condição inicial, enquanto que os valores positivos de Kpr indicam um desvio positivo na temperatura de saída do produto após a perturbação na variável de entrada.

Os históricos dos valores experimentais da diferença de temperatura de saída de todos os produtos testados, com os seus respectivos ajustes encontram-se no Apêndice B para

todos os ensaios realizados.

O comportamento da temperatura de entrada do propileno glicol no trocador durante os ensaios foi graficado concomitantemente, em termos da diferença de temperatura de entrada do propileno glicol relativo à sua condição inicial, $DTepp=T-T_i$, onde T é a temperatura instantânea do propileno glicol e T_i é a temperatura inicial do propileno glicol.

A Figura 19 ilustra o ensaio E03 da água correspondente ao ensaio de perturbação individual da vazão de produto. A escala à esquerda representa os valores experimentais da diferença de temperatura de saída do produto ($DTsp$) com o ajuste dos pontos à equação de segunda ordem, enquanto que a escala à direita apresenta os valores da diferença de temperatura de entrada do propileno glicol ($DTepp$).

O E03 corresponde a uma perturbação de $\Delta=-50$ kg/h a partir da condição inicial C I-1, cuja vazão de produto era de 217 kg/h, conforme Tabelas 5 e 6.

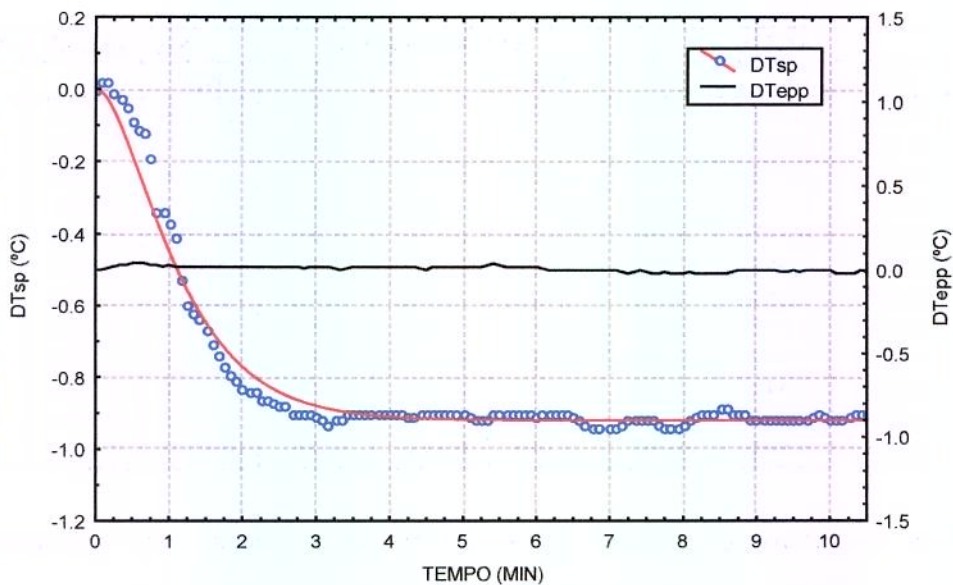


Figura 19 – Ensaio E03 de perturbação individual de vazão da água nas C I-1 ($mp=217$ kg/h) e perturbação de $\Delta mp=-50$ kg/h.

Na Figura 19, observa-se que durante todo o ensaio a temperatura de entrada do propileno glicol foi devidamente controlada em torno de sua condição inicial ($-2^{\circ}C$) através

de um controlador PID, conforme descrito no Item III. 1. 1, porém em muitos ensaios não houve a manutenção do *set point* da temperatura de entrada de propileno glicol na sua condição inicial.

Outros modos de controle da temperatura de entrada de propileno glicol podem ser observados nas figuras do Apêndice B. Na Figura B. 2. 1, nota-se claramente o controle manual *on-off* da temperatura de entrada do propileno glicol durante ensaio com a solução de sacarose 8%. Em outros ensaios, observa-se o controle PID e *on-off* simultâneos, como o E07 da solução de sacarose 8%, apresentado na Figura B. 2. 7.

Com o intuito de manter a temperatura de entrada de propileno glicol constantes vários modos de controle foram testados durante a realização dos ensaios, pois os testes preliminares mostraram que perante algumas perturbações, a variação de temperatura de entrada de propileno glicol era de ± 1 a 3°C em relação a sua condição inicial, principalmente quando se perturbava a vazão de propileno glicol.

Analisando as figuras do Apêndice B, observa-se que em alguns ensaios, a diferença de temperatura de saída dos produtos apresentou resposta complexa, desviando-se da tendência natural esperada, como a da resposta apresentada na Figura 19, por exemplo.

As respostas complexas são mostradas nas Figuras B. 1. 5, B. 1. 6, B. 1. 11, B. 1. 12, B. 2. 5, B. 2. 6, B. 2. 11, B. 2. 12, B. 3. 5, B. 3. 11 e B. 3. 12, as quais correspondem aos ensaios de perturbação individual de vazão de propileno glicol para a água e para as soluções de sacarose.

Nestes casos, houve um rearranjo dos dados experimentais de diferença de temperatura de saída para ajuste da equação de segunda ordem. Alguns pontos experimentais da diferença de temperatura de saída dos produtos foram desconsiderados, porém apresentados, e um novo ajuste foi realizado.

A diferença de temperatura de saída dos produtos nestes casos foi ajustada com os seguintes critérios, quanto à desconsideração de alguns valores experimentais:

- i) o comportamento inicial da diferença de temperatura de saída dos produtos foi considerado até seu primeiro desvio da tendência natural;
- ii) a condição final da temperatura de saída dos produtos, condição de segundo regime permanente, foi acatada incondicionalmente, após estabilização das temperaturas de produto e de propileno glicol.

A Figura 20 ilustra um destes ensaios (E05 da água), cuja resposta da temperatura de saída dos produtos apresentou forma complexa. O E05 apresentado corresponde a um ensaio com água de perturbação individual de vazão de propileno glicol de ($\Delta V_{pp}=-398,48$ L/h), a partir da C I-1 ($V_{pp}=1364,71$ L/h).

Observa-se na Figura 20 que os pontos experimentais da DTsp desconsiderados são apresentados com símbolos diferenciados e que a temperatura de entrada do propileno glicol variou cerca de ($-1,4^{\circ}\text{C}$) em relação a sua condição inicial.

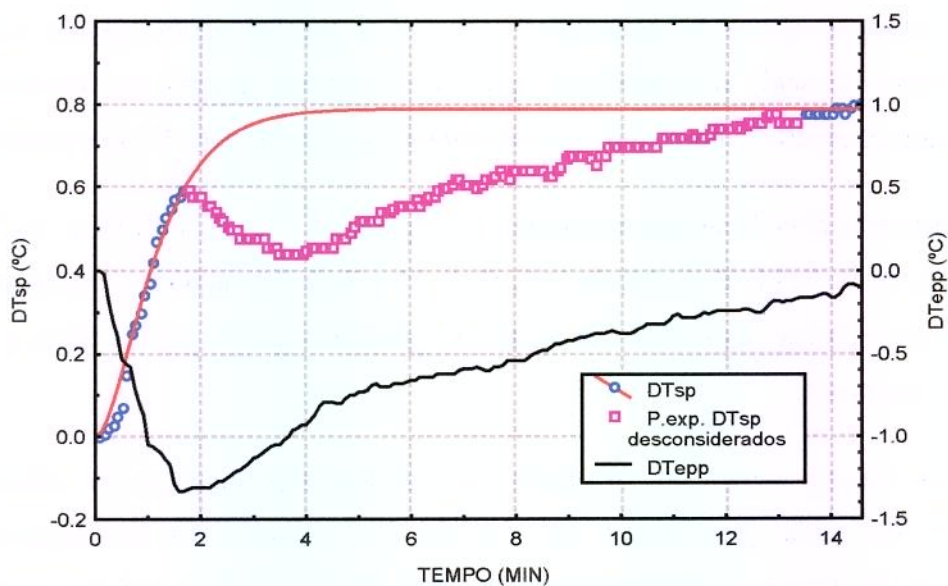


Figura 20 – Ensaio E05 da água de perturbação individual de vazão de propileno glicol: C I-1, $V_{pp}=1364,71$ L/h e perturbação $\Delta V_{pp}=-398,48$ L/h.

Observa-se que a cada ensaio realizado na mesma perturbação, para a água e para as soluções de sacarose, as respostas da DTsp são semelhantes, bem como o comportamento

do DTepp. Os ensaios E05 dos três fluidos citados, por exemplo, apresentaram variações das temperaturas de entrada de propileno glicol praticamente iguais, em torno de $(-1,3^{\circ}\text{C})$ em relação a sua condição inicial e as respostas da temperatura de saída dos produtos apresentaram formas semelhantes.

Nos ensaios E11 de perturbações negativas (--) da vazão de propileno glicol, para todos os fluidos testados, inclusive para o açúcar invertido, observa-se, pelas Figuras B. 1. 11, B. 2. 11, B. 3. 11 e B. 4. 11, que a temperatura de entrada do propileno glicol variou cerca de $(-3,5^{\circ}\text{C})$ em relação a sua condição inicial e nestes casos, as respostas da diferença de temperatura de saída de todos os fluidos também apresentaram comportamentos semelhantes.

Ao diminuir a vazão de propileno glicol, o sistema de refrigeração torna-se ineficiente, no entanto, a carga térmica do compressor se mantém constante, desconsiderando as alterações das propriedades termodinâmicas, e a temperatura de propileno glicol sofre um declínio acentuado. O controlador de temperatura de entrada de propileno glicol no trocador de calor não era robusto o suficiente para manter o *set point* desejado e o DTsp respondeu de maneira complexa ao abaixamento da DTepp.

Para o açúcar invertido, observa-se, pelas figuras do Apêndice B, que as perturbações individuais de vazão de propileno glicol provocavam pequena variação da diferença de temperatura de saída, desde variação praticamente nula, como no ensaio E12 de perturbação positiva (++) na C I-1, chegando a variação máxima de $0,9^{\circ}\text{C}$, no ensaio E19 de perturbação negativa (--) na C I-3.

Nestes ensaios, o ajuste da função de segunda ordem apresentou coeficientes de regressão baixos, variando entre 0,2 e 0,4. Este efeito não significativo da perturbação na vazão do propileno glicol será quantificado pelo fator de sensibilidade.

Portanto, nos casos dos ensaios E05, E06, E11, E12, E15, E16, E19 e E20, referentes às Figuras B. 4. 5, B. 4. 6, B. 4. 11, B. 4. 12, B. 4. 15, B. 4. 16, B. 4. 19 e B. 4. 20, não foram considerados os ajustes dos pontos experimentais ao modelo matemático representativo de um sistema de segunda ordem, acatando variação praticamente nula na

temperatura de saída do açúcar invertido, após perturbações individuais da vazão de propileno glicol.

Observa-se, pelas Figuras do Apêndice B. 4, que a temperatura de entrada de propileno glicol foi melhor controlada pelo controlador PID, comparada com os outros ensaios realizados com a mesma perturbação para os outros fluidos testados.

Na Tabela 49 são apresentados os parâmetros obtidos da Equação (41), juntamente com os coeficientes de correlação para os ensaios E01 a E20 de perturbações individuais para o açúcar invertido.

Tabela 18- Parâmetros das funções ajustadas aos pontos experimentais de diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, após perturbações individuais, e coeficiente de correlação.

AÇÚCAR INVERTIDO			
Ensaio	Kpr	τ	R
E 01	-1,6476	1,5135	0,997
E 02	1,8000	1,7998	0,990
E 03	-1,1231	0,9662	0,995
E 04	0,8300	0,8784	0,960
*E 05	----	----	----
*E 06	----	----	----
E 07	-4,1000	1,6207	0,992
E 08	5,4000	1,9340	0,996
E 09	-2,5377	1,1368	0,984
E 10	1,3200	0,8735	0,986
*E 11	----	----	----
*E 12	----	----	----
E 13	-0,8296	0,5791	0,995
E 14	0,8500	0,5732	0,966
*E 15	----	----	----
*E 16	----	----	----
E 17	-3,8033	1,3123	0,979
E 18	1,8106	0,5108	0,999
*E 19	----	----	----
*E 20	----	----	----

*variação não-perceptível na temperatura de saída do produto.

IV. 3. 3 – Comparações das Curvas de Resposta da Diferença de Temperatura de Saída de cada Produto sob Perturbações Individuais Positivas e Negativas em Amplitudes Diferentes.

Os gráficos adimensionais das perturbações individuais foram construídos a partir das equações ajustadas aos pontos experimentais de diferença de temperatura dos produtos (Equação 41), conforme descrito no Item III. 2. 3. 1. 1.

As Figuras 21, 22, 23 e 24 apresentam o comportamento adimensional da diferença de temperatura de saída da água, das soluções de sacarose 8% e 18% e do açúcar invertido, respectivamente, obtido após perturbações individuais positivas e negativas, em diferentes intensidades, das variáveis de entrada. A cada figura seguem as análises comparativas.

Os comportamentos adimensionais da diferença de temperatura de saída dos produtos foram subdivididos nos itens a, b, c e d, para análises comparativas entre as seguintes perturbações: negativas (-) com positivas (+) ou [(-) e (+)], negativas em maior intensidade (--) com positivas em maior intensidade (++) ou [--) e (++)], negativas em diferentes amplitudes (-) com (--) ou [(-) e (--)], positivas em diferentes amplitudes (+) com (++) ou [(+) e (++)].

Portanto, as comparações são feitas entre perturbações negativas e positivas, ou seja, perturbações de mesma amplitude, porém em sentidos contrários, [(-) e (+)] e [--) e (++)], e entre as perturbações no mesmo sentido, porém em amplitudes diferentes, [(-) e (--)] e [(+) e (++)].

A simetria nas respostas transientes é vista pela sobreposição das curvas adimensionalizadas, enquanto que as inclinações das curvas adimensionalizadas mostram a rapidez da evolução da resposta da temperatura de saída dos produtos.

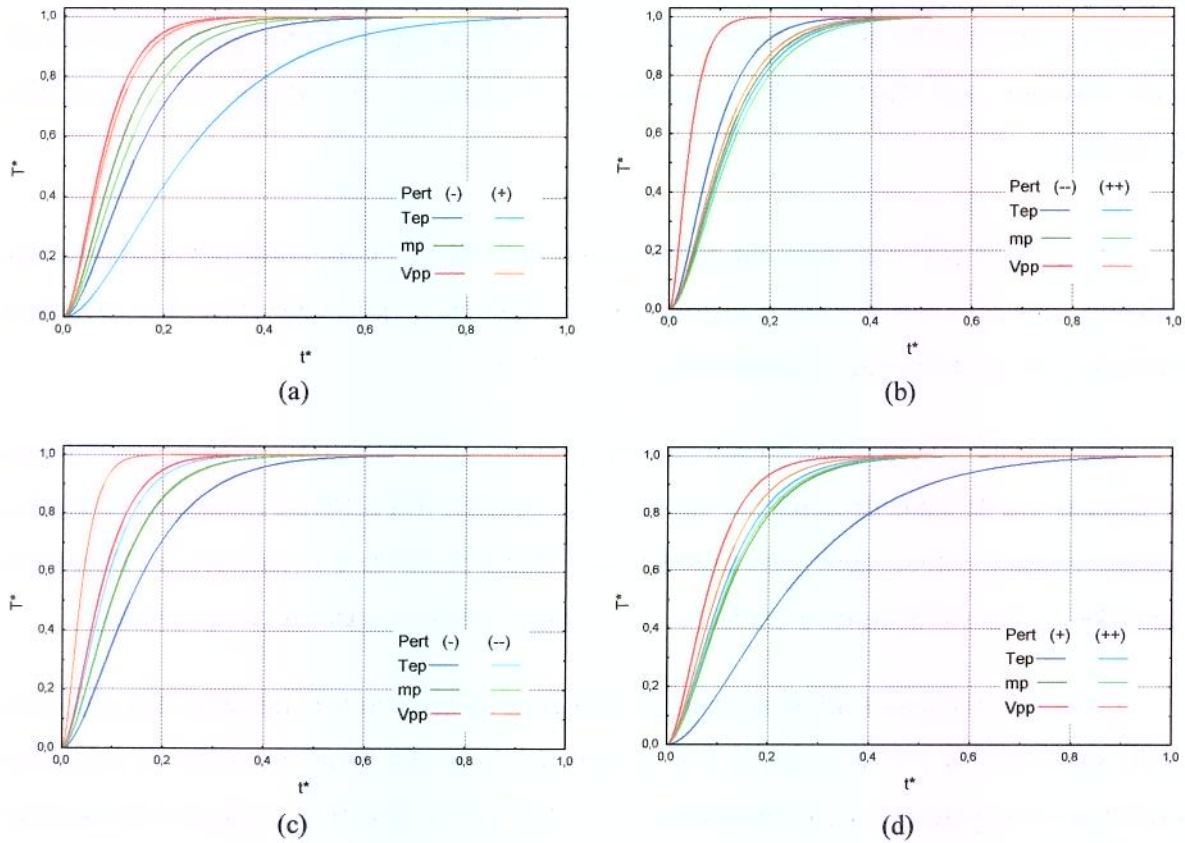


Figura 21 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da água após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.

Na Figura 21.a, observa-se simetria apenas entre as perturbações negativas e positivas [(-) e (+)] da vazão de propileno glicol. Na Figura 21.b, não se observa simetria entre as perturbações negativas e positivas de maiores intensidades, [--) e (++)]. Nas Figuras 21.c e 21.d, observa-se simetria das curvas apenas quando se perturba a vazão de produto. Portanto, para a água, as curvas transientes simétricas são aquelas obtidas sob perturbações da vazão de propileno glicol em sentidos opostos, porém com a mesma intensidade, [(-) e (+)], e sob perturbações da vazão de produto no mesmo sentido, porém em intensidades diferentes, ou seja, as perturbações [(-) e (--)] e as [(+) e (++)].

Nota-se que na maioria dos casos as perturbações na vazão de propileno glicol provocam maior rapidez na resposta da temperatura de saída da água, enquanto que as perturbações na temperatura de entrada do produto acarretam em respostas mais lentas da temperatura de saída. Observa-se também que as perturbações positivas (+) e (++)

provocam respostas mais rápidas na temperatura de saída, em relação às perturbações negativas, (-) e (--).

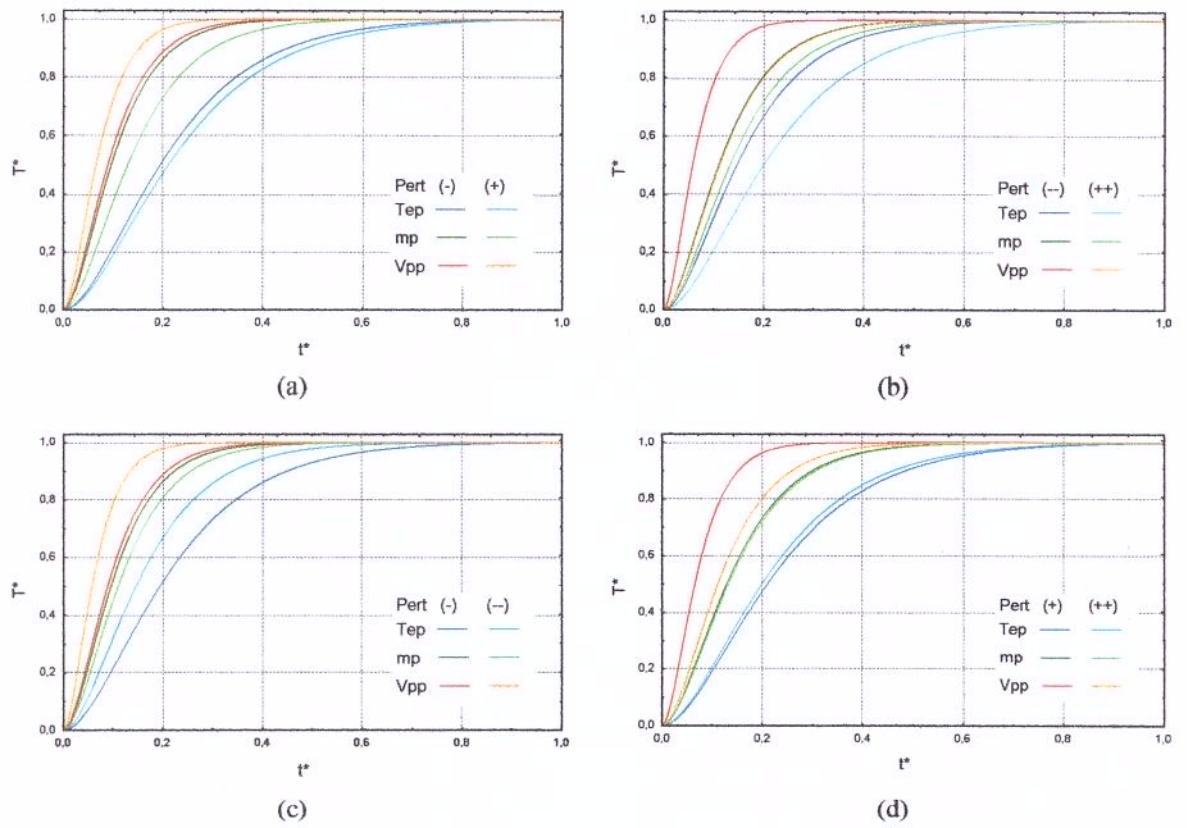


Figura 22 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 8% após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.

Para a solução de sacarose 8%, observa-se pelas Figuras 22.a, 22.b e 22.c, nenhuma simetria das curvas nas perturbações das variáveis de entrada. Há simetria apenas nas curvas de perturbações positivas em amplitudes diferentes, [(+) e (++)], da vazão de produto e da temperatura de entrada de produto (Fig. 22.d).

É interessante notar simetria entre duas grandezas diferentes na Figura 22.b: perturbações negativas (--) da vazão de produto e perturbações positivas (++) da vazão de propileno glicol. Em todas as outras perturbações, não há simetria.

Todas as perturbações na vazão de propileno glicol causam respostas mais rápidas da temperatura de saída, enquanto que todas as perturbações na temperatura de entrada do produto causam respostas mais lentas da temperatura de saída. Nota-se também que as

perturbações positivas em maiores intensidades (++), provocam maior rapidez na resposta da temperatura de saída da solução de sacarose 8% com relação às perturbações negativas (--).

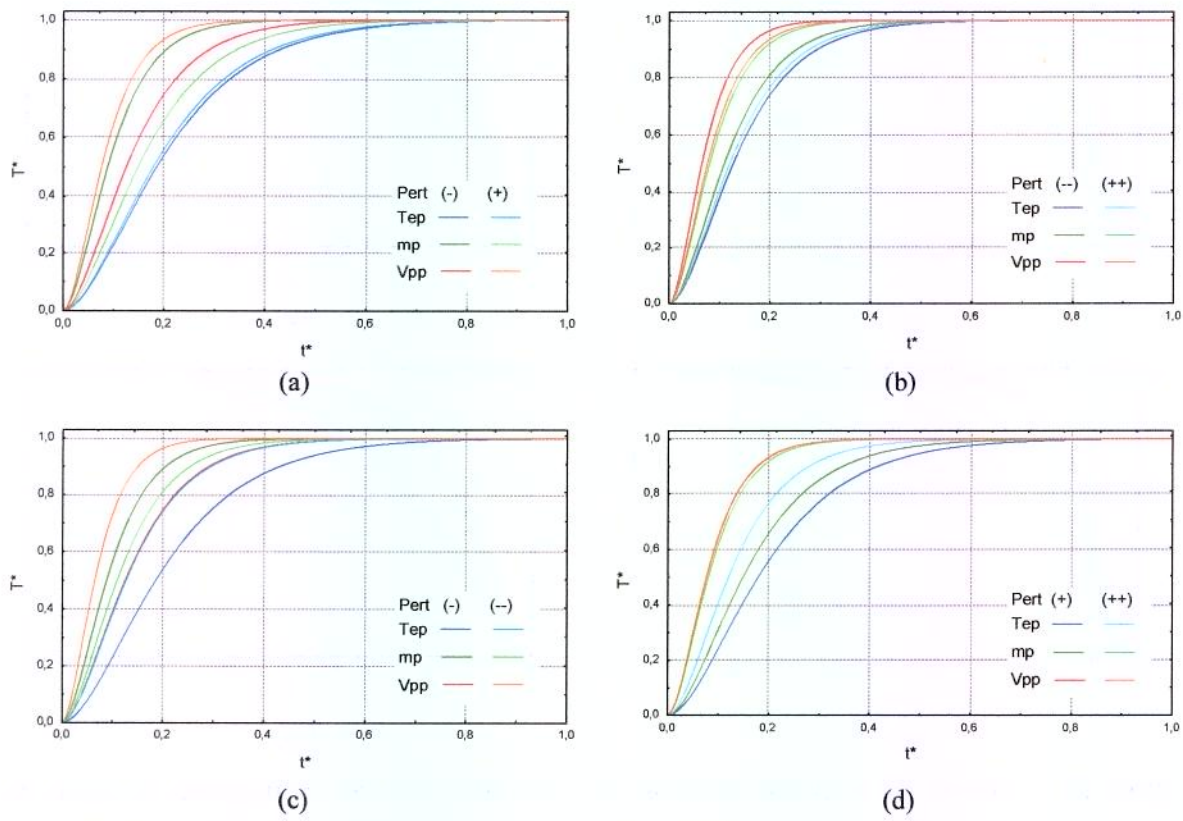


Figura 23 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18% após as perturbações individuais nas varáveis de entrada.

Analisando as Figuras 23.a e 23.b, observa-se simetria das curvas para a sacarose 18%, apenas no caso de perturbações negativas e positivas de temperatura de entrada de produto, [(-) e (+)] e [(--) e (++)], respectivamente. Há simetria também nas respostas obtidas sob perturbações positivas, de mesmo sentido e intensidades diferentes, [(+) e (++)], da vazão de propileno glicol (Fig. 23.d). Em relação às outras perturbações negativas e positivas das mesmas grandezas, não se observa simetria.

Nota-se simetria entre duas grandezas diferentes, na Figura 23.c, perturbações negativas (--) da temperatura de entrada da solução de sacarose 18% e perturbação negativa (-) da vazão de propileno glicol.

Observa-se que as perturbações na temperatura de entrada do produto provocam maior lentidão na resposta da temperatura de saída da solução de sacarose 18% com relação às outras perturbações, sendo que na maioria dos casos, perturbações na vazão de propileno glicol causam maior rapidez na evolução da temperatura de saída.

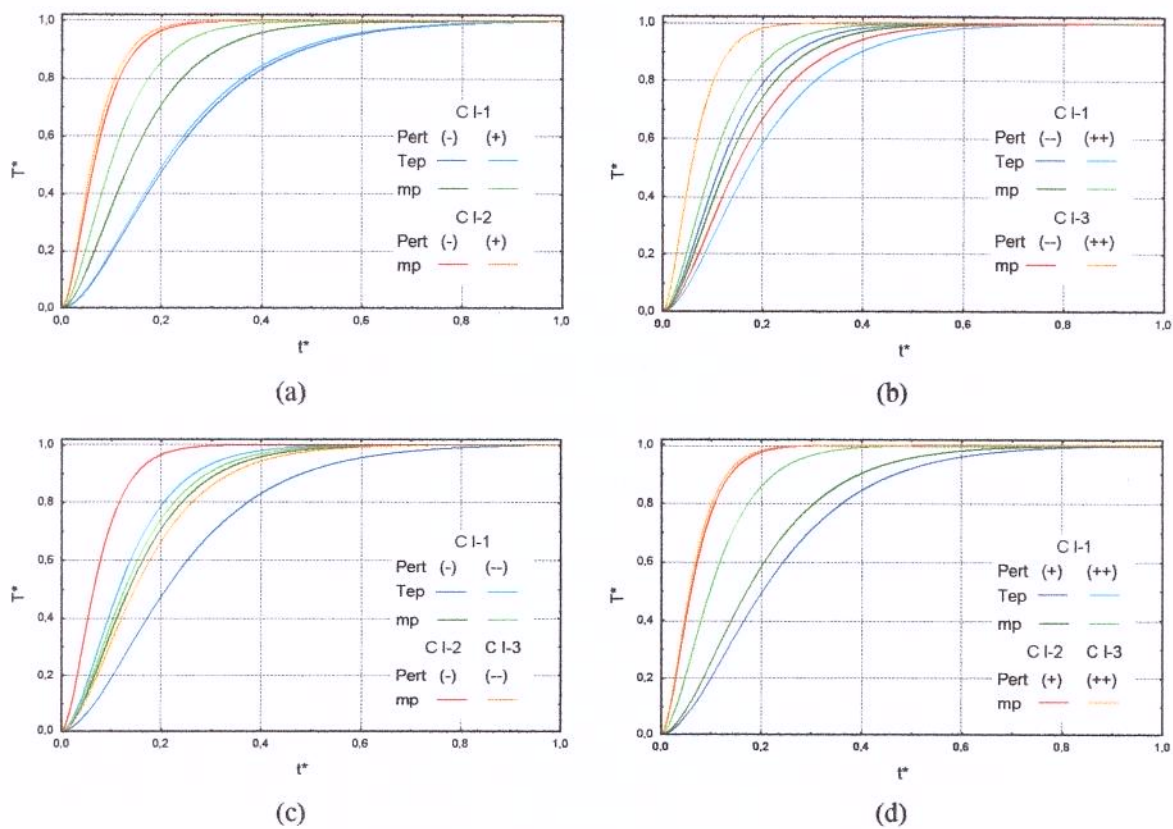


Figura 24 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.

Para o açúcar invertido, observa-se, pelas Figuras 24.b e 24.c que não há simetria nas perturbações das variáveis de entrada em nenhum caso estudado. Enquanto que na Figura 24.a, observa-se simetria entre as perturbações negativas e positivas, [(-) e (+)], tanto da temperatura de entrada do produto nas C I-1, como da vazão de produto nas C I-2.

É possível comparar perturbações positivas e negativas da mesma grandeza e de intensidades diferentes entre as condições iniciais C I-1 com C I-2 (Fig. 24.a), C I-1 com C I-3 (Fig. 24.b) e entre as condições C I-2 com CI-3 (Fig.24.c e 24.d). Nestes casos, há simetria apenas entre as respostas transientes obtidas sob perturbações da vazão de produto

(+) na C I-2 e (++) na C I-3. Para todas as outras curvas obtidas sob diferentes condições iniciais do processo, não se observa simetria.

Vale ressaltar simetria entre duas grandezas diferentes, Figura 24.d, no caso das perturbações positivas de mesma intensidade (++) entre a temperatura de entrada do produto e a vazão do produto, nas condições iniciais C I-1.

Os maiores atrasos na resposta da temperatura de saída do açúcar invertido são provocados pelas perturbações da temperatura de entrada.

A Tabela 19 sintetiza as simetrias ocorridas para cada produto testado no processo transiente de resfriamento, para as mesmas grandezas perturbadas, Tep, mp e Vpp. Vê-se, por exemplo, que nos ensaios E02 e E08 da água, correspondentes a perturbações na temperatura de entrada do produto, (+) e (++) , respectivamente, as respostas transientes da temperatura de saída do produto foram simétricas.

Tabela 19 - Resumo das respostas transientes simétricas sob perturbações individuais das mesmas grandezas, para cada produto testado.

PRODUTOS	PERTURBAÇÕES SIMÉTRICAS					
	Tep		mp		Vpp	
	Pert.	Ensaio	Pert.	Ensaio	Pert.	Ensaio
ÁGUA			(-) e (--) (+) e (++)	E03 e E09 E04 e E10	(-) e (+)	E05 e E06
SACAROSE 8%	(+) e (++)	E02 e E08	(+) e (++)	E04 e E10		
SACAROSE 18%	(-) e (+) (--) e (++)	E01 e E03 E07 e E08			(+) e (++)	E06 e E12
AÇÚCAR INVERTIDO	(-) e (+)	E01 e E02 CI-1	(-) e (+) CI-2 (+) e (++) CI-2 e CI-3	E03 e E04 CI-2 E14 e E18 CI-2 e CI-3		

Portanto, é possível concluir a partir destas análises que, caso haja distúrbios de sentidos e intensidades das diferentes variáveis estudadas, o controlador deve estar sintonizado adequadamente, o que não é visto comercialmente, pois a metodologia convencional utiliza para configuração do controlador apenas um ensaio de perturbação de uma única amplitude.

IV. 3. 4 – Comparações das Curvas de Resposta da Diferença de Temperatura de Saída entre os Diferentes Produtos Testados sob as mesmas Perturbações Individuais Positivas e Negativas.

Nas Figuras 25, 26 e 27, as curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura dos fluidos testados são mostradas, para verificação de possíveis semelhanças de comportamentos entre os diferentes produtos utilizados sob as mesmas perturbações das grandezas estudadas, T_{ep} , mp e V_{pp} , respectivamente.

As comparações são feitas entre fluidos, para os ensaios realizados sob as mesmas perturbações, de mesmo sentido e mesma amplitude, sendo comparadas as linhas de tonalidades azuis para as perturbações negativas (-) e para as positivas (+), e as linhas de diferentes tonalidades vermelhas para as perturbações de maiores intensidades negativas (--) e para as positivas (++)).

Na Figura 25, por exemplo, são comparadas as perturbações na temperatura de entrada do produto, T_{ep} , para os quatro fluidos testados, como por exemplo, o ensaio de perturbação negativa (-) na T_{ep} da água com os ensaios de perturbação (-) na T_{ep} das soluções de sacarose 8% e 18% e do açúcar invertido.

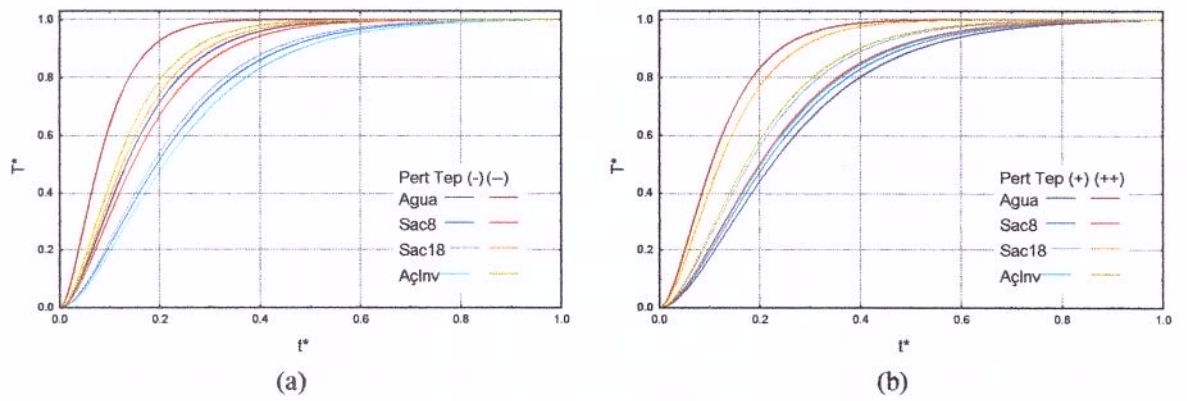


Figura 25 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída dos diferentes produtos testados, após as perturbações individuais negativas e positivas da variável temperatura de entrada dos produtos.

Na Figura 25, correspondente aos ensaios de perturbações de temperatura de entrada dos produtos, não se observa semelhança das respostas transientes obtidas sob as mesmas perturbações para os fluidos testados.

Na Figura 26 são comparados os ensaios sob as mesmas perturbações na vazão do produto, mp, para os quatro fluidos testados.

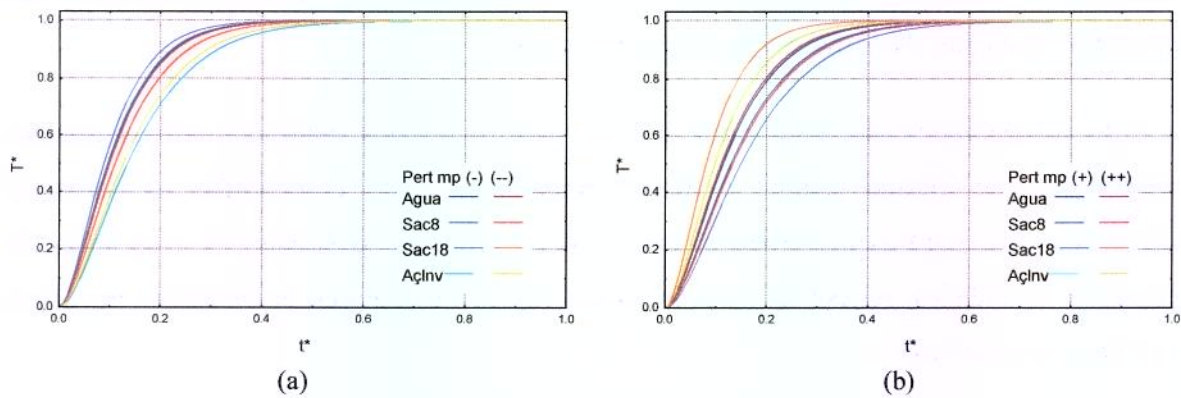


Figura 26 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída dos diferentes produtos testados, após as perturbações individuais negativas e positivas da variável vazão dos produtos.

Na Figura 26.a, observa-se semelhanças do comportamento transiente da temperatura de saída da água e da solução de sacarose 8% nas perturbações negativas (-). Há simetria também nas perturbações (--) da vazão de produto para as soluções de sacarose 8% e 18%. No caso das perturbações positivas de vazão dos produtos, não se observa nenhuma semelhança de comportamento entre os fluidos.

Na Figura 27 são comparados os ensaios sob as mesmas perturbações na vazão do propileno glicol, Vpp, para a água e para as soluções de sacarose, visto que os ensaios de perturbações de vazão de propileno glicol realizados para o açúcar invertido não foram considerados para análises adimensionais, devido a variação não perceptível da resposta transiente de saída do produto.

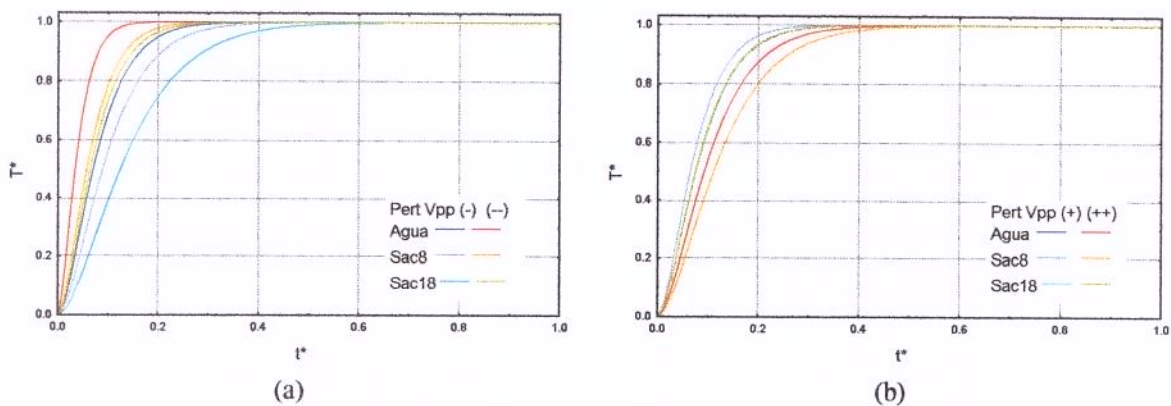


Figura 27 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída dos diferentes produtos testados, após as perturbações individuais negativas e positivas da variável vazão de propileno glicol.

Na Figura 27.a, não se observa semelhanças do comportamento transiente entre os fluidos sob perturbações negativas de vazão de propileno glicol. Enquanto que na Figura 27.b, nota-se semelhanças dos processos entre as perturbações positivas (+) na vazão de propileno glicol, para a água e a solução de sacarose 18%.

Estas análises mostram as simetrias das respostas transientes obtidas sob as perturbações individuais negativas e positivas, de diferentes intensidades, entre as mesmas grandezas estudadas e dos diferentes fluidos testados, sendo fundamentais para aplicação de sintonias de controladores no processo de resfriamento destes fluidos no trocador de calor de tubo duplo testado.

Além de cada variável ter que ser controlada de forma individual, não se pode considerar correções proporcionais para perturbações da mesma grandeza, negativas e positivas, de diferentes intensidades. Constatou-se que para os fluidos testados, ocorrem não linearidades no comportamento transiente para a mesma perturbação realizada.

Portanto, caso seja utilizado o mesmo equipamento no processo de resfriamento para aplicação de controle, a sintonia de um possível controlador deve ser alterada, pois os comportamentos das respostas da temperatura de saída do trocador foram distintos para as mesmas perturbações, sendo representados por funções de transferência diferentes.

IV. 3. 5 – Análises do Fator de Sensibilidade

Na Tabela 20 são apresentados os valores dos fatores de sensibilidade calculados pela Equação (47), de acordo com o Item III. 2. 3. 1. 2 . Os FS representam os efeitos provocados pelas variáveis perturbadas, positiva e negativamente, das mesmas grandezas e de intensidades diferentes, para todos os produtos utilizados.

Tabela 20 - Fatores de sensibilidade das variáveis perturbadas nos ensaios E01 a E12 para a água e para as soluções de sacarose 8 e18%, e nos ensaios E01 a E20 para o açúcar líquido invertido.

Condições Iniciais	Ensaio	Variável Perturbada	FATORES DE SENSIBILIDADE			
			ÁGUA	SAC 8	SAC 18	AÇ INV
CI-1	01	Tep (-)	0,510	0,564	0,588	0,783
	02	Tep (+)	0,506	0,465	0,435	0,837
	03	mp (-)	0,014	0,017	0,020	0,018
	04	mp (+)	0,015	0,011	0,017	0,013
	05	Vpp (-)	-0,010	-0,010	-0,009	-0,001
	06	Vpp (+)	-0,009	-0,005	-0,008	-0,001
	07	Tep (--)	0,532	0,631	0,621	0,827
	08	Tep (++)	0,497	0,505	0,589	0,855
	09	mp (- -)	0,025	0,027	0,030	0,020
	10	mp (++)	0,015	0,012	0,012	0,012
	11	Vpp (--)	-0,014	-0,012	-0,010	0,000
	12	Vpp (++)	-0,007	-0,007	-0,005	0,000
CI-2	13	mp (-)	----	----	----	0,013
	14	mp (+)	----	----	----	0,013
	15	Vpp (-)	----	----	----	-0,001
	16	Vpp (+)	----	----	----	0,000
CI-3	17	mp (--)	----	----	----	0,031
	18	mp (++)	----	----	----	0,018
	19	Vpp (--)	----	----	----	0,000
	20	Vpp (++)	----	----	----	0,000

Valores negativos no fator de sensibilidade representam que uma perturbação na variável de entrada manipulável provoca uma resposta em sentido contrário na temperatura de saída do produto em relação à perturbação. Por exemplo, uma perturbação negativa na vazão de propileno glicol (E05, E11, E15 e E19) provoca um aumento na temperatura de saída do produto, portanto o fator de sensibilidade neste caso é negativo. Da mesma forma, uma perturbação positiva da vazão de propileno glicol provoca o abaixamento da temperatura de saída dos produtos (E06, E12, E16 e E20).

Efeito contrário ocorre para os fatores de sensibilidade positivos. Por exemplo, uma perturbação negativa na temperatura de entrada do produto (E01 e E07) provoca um abaixamento da temperatura de saída, logo, o fator de sensibilidade é positivo.

Nota-se que o maior valor de fator de sensibilidade indica o maior efeito da perturbação na temperatura de saída do produto e, para todos os fluidos testados, verifica-se que a temperatura de entrada do produto provoca o maior desvio na temperatura de saída. De forma análoga, observa-se os menores valores de fator de sensibilidade para os caso de perturbação de vazão de propileno glicol, sendo este efeito ainda menor no caso do açúcar invertido, o que justifica a consideração de variação nula na temperatura de saída do produto para obtenção dos comportamentos adimensionais da temperatura de saída do açúcar invertido.

O FS também auxilia na interpretação das linearidades e proporcionalidades dos processos. Assume-se que no caso dos processos lineares ou proporcionais, os FS são iguais sob as mesmas perturbações de sentidos contrários e sob as perturbações de diferentes amplitudes, as quais são proporcionais, conforme Tabelas 5 e 7. Esta análise também pode ser extrapolada para análise comparativa entre os fluidos sob as perturbações de mesma amplitude em cada variável de entrada.

Para a água, por exemplo, observa-se que as respostas transientes simétricas, resumidas na Tabela 19, apresentam os mesmos FS, no caso das perturbações na temperatura de entrada de produto (E04 e E10) e na vazão de propileno glicol (E05 e E06). Isto demonstra a linearidade ou proporcionalidade entre estes ensaios, o que significa que os valores da diferença de temperatura de saída do produto no segundo regime permanente são proporcionais.

Na Figura 28 são apresentados os gráficos de barras para análise visual dos efeitos de cada perturbação individual nas variáveis de entrada sobre a temperatura de saída de cada produto testado.

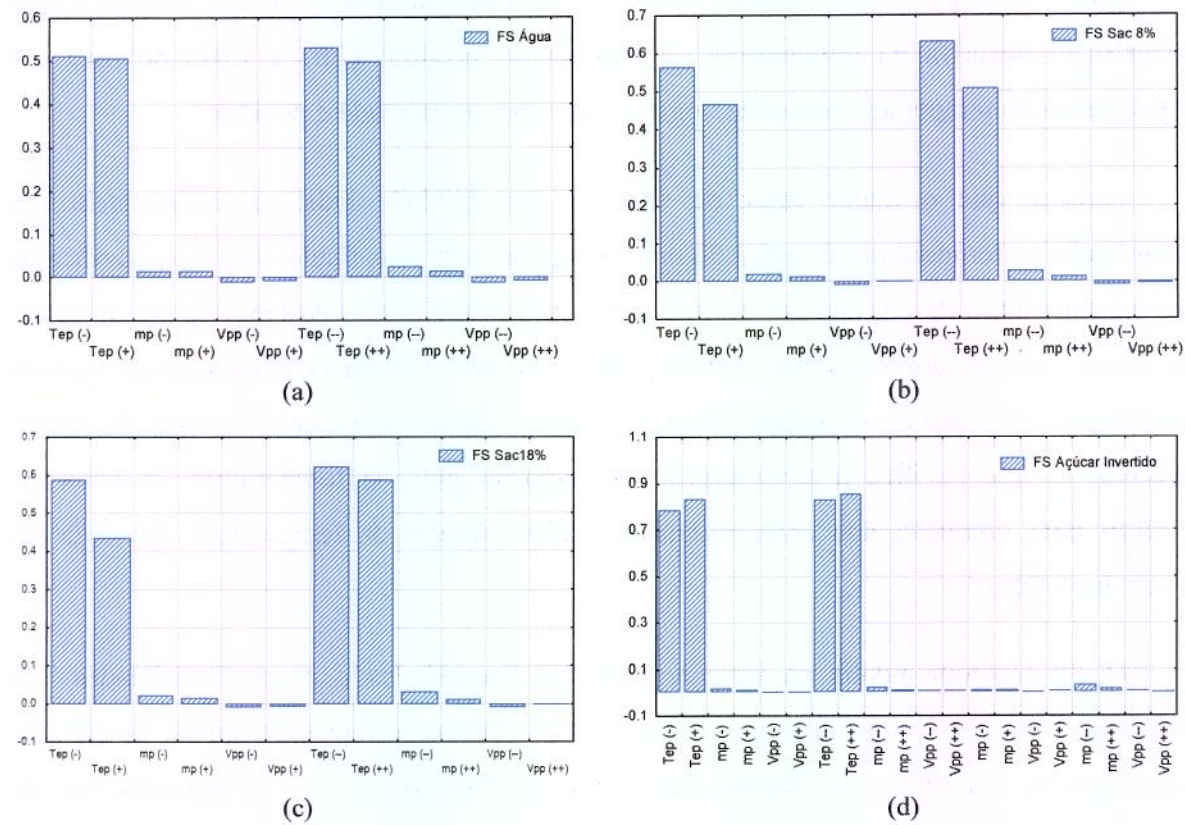


Figura 28 – Gráficos de barras para análise visual dos efeitos das perturbações individuais nas variáveis de entrada para cada produto: (a) Água; (b) Sacarose 8%; (c) Sacarose 18%; d) Açúcar Invertido.

As análises do fator de sensibilidade são essenciais para verificação dos efeitos individuais de cada variável perturbada na temperatura de saída dos produtos testados, fornecendo um banco de conhecimento sobre o processo transiente do trocador de calor de tubo duplo utilizado, que poderá auxiliar diretamente um futuro trabalho de implementação de controle neste sistema, para o resfriamento dos produtos estudados.

IV. 4 – ANÁLISES DAS PERTURBAÇÕES SIMULTÂNEAS

Os fluidos testados nos ensaios de perturbações simultâneas foram: solução de sacarose a 18 % e açúcar líquido invertido, conforme descrito no Item III. 2. 1. 2.

Para realização dos ensaios foi necessário descontar-se o tempo de chegada da nova frente de produto com temperatura diferente, desde a saída do tanque de alimentação de produto até a entrada do trocador, para então realizar as perturbações das vazões de produto e de propileno glicol, conforme descrito no Item III. 2. 2.

Os tempos descontados foram calculados em função das velocidades médias dos fluidos no interior da tubulação, que por sua vez foram obtidas pela Equação (13). A área fixa de escoamento de $3,976 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, calculada a partir do diâmetro interno da tubulação de produto. A distância considerada para desconto do tempo foi de 10,67 m, de acordo com a Figura 16. As vazões e as densidades dos fluidos são dadas pelo próprio medidor magnético de vazão (Figura 14).

Na Tabela 21 são apresentados as médias e os desvios padrões, calculados a partir de seis testes preliminares realizados com cada produto, das densidades consideradas para o cálculo das velocidades médias, juntamente com o tempo médio calculado para desconto.

Tabela 21 - Tempos descontados para realização das perturbações simultâneas de vazões de produto e de propileno glicol, após perturbação da temperatura de entrada do produto.

	Sacarose 18%	Aç. Inv.
Densidade (kg/m^3)	$1074,43 \pm 1,89$	$1387,13 \pm 2,48$
Tempo (min)	1,26	2,35

Ao realizar os ensaios de perturbações simultâneas, perturbava-se inicialmente a temperatura de entrada do produto, esperava-se o tempo calculado apresentado na Tabela 21, para então realizar as perturbações simultâneas das vazões de produto e de propileno glicol. Como o acionamento para a realização das perturbações era manual, há um erro inerente a este tempo esperado, em torno de 5 a 10 s.

IV. 4. 1 - Ajuste dos Dados Experimentais da Diferença de Temperatura de Saída da Solução de Sacarose 18% ao Modelo de Segunda Ordem

Os históricos dos valores experimentais com seus respectivos ajustes estão mostrados no Apêndice C. Nas Figuras de C. 1. 1 a C. 1. 17, os pontos experimentais da diferença de

temperatura de saída da solução de sacarose 18% são apresentados com os respectivos ajustes pela Equação (41) de segunda ordem, juntamente com os valores experimentais da diferença de temperatura de entrada do propileno glicol no trocador de calor, que são graficados no eixo vertical direito, conforme descrito no Item IV. 3. 2 para análises das perturbações individuais.

Para algumas combinações de perturbações nas variáveis de entrada, o sistema respondeu de forma complexa e a temperatura de saída do produto apresentou comportamento distinto com relação a maioria das respostas obtidas sob as combinações de perturbações realizadas, cujas curvas transientes aproximaram-se da forma “S”.

Estas respostas complexas foram obtidas nos ensaios E03, E06 e E07, correspondentes as Figuras C. 1. 3, C. 1. 6 e C. 1. 7.

Particularmente o E06, correspondente a Figura C. 1. 6, apresentou uma resposta inversa da temperatura de saída do produto, mediante perturbações simultâneas nos níveis [(+1), (-1) e (+1)] da temperatura de entrada, vazão de produto e vazão de propileno glicol, respectivamente.

Nestes três ensaios, observa-se uma variação na temperatura de entrada de propileno glicol, em relação à condição inicial, de aproximadamente 1°C, 1,8°C e 1,4°C, respectivamente.

Assim, devido às respostas complexas obtidas, desconsiderou-se alguns valores experimentais de temperatura de saída de produto, melhorando assim o ajuste da Equação (41) aos pontos experimentais. A desconsideração de alguns valores experimentais foi feita seguindo os mesmos critérios citados anteriormente no Item IV. 2. 2, para as análises das perturbações individuais.

Na Tabela 22 são apresentados os parâmetros ajustados da Equação (41) para a diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18% nos ensaios de perturbações simultâneas das variáveis de entrada, juntamente com os coeficientes de regressão do ajuste.

Observa-se na Tabela a seguir, o menor valor de coeficiente de regressão justamente para o E06, o qual apresentou resposta inversa.

Tabela 22 - Parâmetros das funções ajustadas aos pontos experimentais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações simultâneas das variáveis de entrada e coeficientes de correlação.

SOLUÇÃO DE SACAROSE 18%			
Ensaio	Kpr	τ	R
E 01	-2,5000	1,5656	0,940
E 02	2,4994	1,8742	0,972
E 03	0,6900	0,4161	0,940
E 04	7,5414	0,7881	0,990
E 05	-3,2551	1,4344	0,996
E 06	0,6104	0,8919	0,725
E 07	-0,7782	0,4763	0,995
E 08	5,0765	0,8152	0,976
E 09	6,7699	1,1489	0,985
E 10	-2,6701	1,3500	0,978
E 11	3,4856	0,8008	0,992
E 12	-5,0000	0,9437	0,960
E 13	1,2400	0,9350	0,918
E 14	4,5000	1,3133	0,904
E 15	2,0885	1,1699	0,963
E 16	2,0966	1,2044	0,982
E 17	1,9051	1,1105	0,987

As novas funções ajustadas aos pontos experimentais da diferença de temperatura de saída (DTsp ou parâmetro B da Figura 9), no caso dos ensaios E03, E06 e E07, foram acatadas para obtenção dos gráficos adimensionais e do modelo matemático probabilístico representativo do comportamento da diferença de temperatura em função das perturbações nas variáveis de entrada. Ressaltando que ao realizar o ajuste pelo modelo de segundo ordem foi acatada a condição real de temperatura atingida no segundo regime permanente.

No entanto, para o caso das análises dos outros parâmetros gráficos para controle, t_d e z , que indicam o tempo morto e a rapidez da resposta transiente, vale ressaltar que as funções ajustadas referentes aos ensaios E03, E06 e E07 podem causar desvios maiores em relação ao DTsp, nas análises dos efeitos das múltiplas perturbações sobre estes parâmetros, bem como nas superfícies tridimensionais, devido às respostas complexas ocorridas.

IV. 4. 2 – Resultados do PFCC para a Solução de Sacarose 18%.

O resultado do planejamento fatorial composto central 2³ realizado para analisar as perturbações simultâneas é mostrado na Tabela 23, conforme o PFCC apresentado na Tabela 12, para a solução de sacarose 18%, com os valores reais codificados das perturbações.

Neste estudo experimental, houve dificuldades em se atingir os valores exatos dos níveis do planejamento [(-α), (-1), (0), (+1), (+α)] durante os ensaios. Dessa forma, os níveis foram re-codificados para análises em função dos valores reais de perturbações atingidos nos ensaios.

Tabela 23 - Resultados dos ensaios do PFCC para a solução de sacarose 18%, com os níveis reais codificados.

SOLUÇÃO DE SACAROSE 18%						
Ensaio	Variáveis Independentes (Entrada)			Variáveis Dependentes (Saída)		
	ΔTp (°C)	Δmp (kg/h)	ΔVpp (L/h)	ΔTsp(°C)	td (min)	z (min)
E 01	-0,9	-1,0	-1,0	-2,50	0,44	4,25
E 02	0,9	-1,0	-1,0	2,50	0,53	5,09
E 03	-0,9	1,0	-1,0	0,70	0,18	1,24
E 04	0,9	0,9	-1,0	7,54	0,22	2,14
E 05	-0,9	-1,0	0,9	-3,52	0,46	3,90
E 06	0,8	-1,0	1,0	0,61	0,25	2,43
E 07	-0,9	1,0	0,9	-0,78	0,13	1,30
E 08	0,9	1,0	0,9	5,08	0,23	2,23
E 09	1,5	0,0	0,0	6,77	0,32	3,12
E 10	-1,5	0,0	0,0	-2,67	0,38	3,67
E 11	0,0	1,7	0,0	3,49	0,23	2,18
E 12	0,0	-1,7	0,0	-5,00	0,27	2,57
E 13	-0,1	0,0	1,2	1,24	0,26	2,54
E 14	0,0	0,0	-1,6	4,50	0,37	3,57
E 15	-0,02	-0,01	-0,03	2,09	0,33	3,18
E 16	-0,02	-0,01	-0,03	2,10	0,34	3,27
E 17	-0,02	-0,01	-0,03	1,91	0,31	3,02

O valor da resposta da diferença de temperatura de saída do produto é dado em termos de $DT_{sp}=T-T_{1^{o}RP}$, obtido do ajuste da Equação (41). Os valores dos parâmetros td e z foram obtidos traçando-se a tangente ao ponto de inflexão nas funções ajustadas de cada

ensaio, conforme exemplo da Figura 29, que mostra a curva de ajuste obtida da diferença de temperatura de saída do produto no ensaio E02 de perturbação simultânea da solução de sacarose 18%, nos níveis [(+1) Tep, (-1) mp, (-1) Vpp].

A Figura 29 é semelhante à Figura 9, adequada para análises das perturbações individuais, porém aplicada para as análises de perturbações simultâneas, cuja metodologia não é estudada nas referências bibliográficas consultadas.

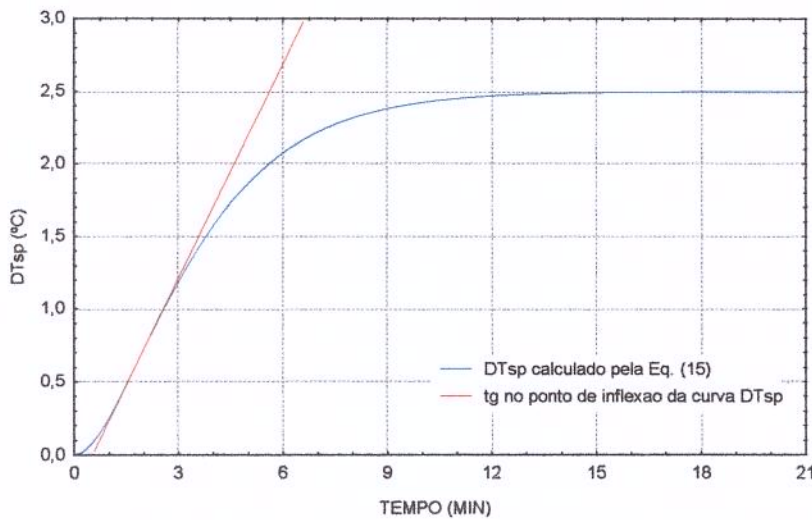


Figura 29 – Curva de resposta do processo para obtenção dos valores de t_d e z , exemplificada pelo E02 de perturbações simultâneas nos níveis [(+1) Tep, (-1) mp, (-1) Vpp].

Na Tabela 23, os ensaios E15, E16 e E17 são referentes aos ensaios no ponto central, realizados para estimativa do erro puro, conforme descrito no Item II. 6. Nota-se que estes valores não estão apresentados exatamente no nível intermediário (0), devido à recodificação aos níveis reais de perturbações atingidos durante os ensaios. No entanto, observa-se que os valores são repetidos para cada variável independente, devido à média dos valores experimentais. Dessa forma, ainda é possível analisar os erros inerentes aos ensaios, pois os mesmos continuam sendo repetições em torno do ponto central.

IV. 4. 2. 1 – Análises dos Efeitos das Perturbações Simultâneas das Variáveis Independentes sobre a Diferença de Temperatura de Saída do Produto

Os efeitos medem a variação da resposta ao alterar os fatores envolvidos nos níveis $[(-\alpha), (-1), (0), (+1), (+\alpha)]$ e podem ser calculados baseando-se no Erro Puro, que representam os desvios em relação aos pontos experimentais, ou seja, os erros inerentes aos ensaios (E15, E16 e E17 da Tabela 23) e no Erro Residual, que engloba tanto o erro experimental aleatório quanto a falta de ajuste do modelo probabilístico aos pontos experimentais.

Na Tabela 24 são apresentados os efeitos principais e de interações das perturbações das variáveis independentes, ou seja, variáveis de entrada, sobre a variável dependente, diferença de temperatura de saída do produto (DTsp), além dos parâmetros estatísticos de “t” e “p” e os desvios padrões (Erro Puro). Foram considerados os efeitos lineares (L) e quadráticos (Q) estatisticamente significativos no limite de confiança de 94%.

Tabela 24 - Efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis independentes sobre a diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%.

	Efeitos	Desvio Padrão	t(2)	p
Média *	2,357	0,061	38,916	0,001
Tep (L) *	9,535	0,101	93,964	0,000
Tep (Q)	-0,447	0,179	-2,501	0,130
mp (L) *	7,448	0,101	73,532	0,000
mp (Q) *	-5,769	0,178	-32,369	0,001
Vpp (L) *	-3,004	0,094	-32,054	0,001
Vpp (Q) *	1,488	0,164	9,101	0,012
Tep (L) x mp (L) *	2,027	0,220	9,220	0,012
Tep (L) x Vpp (L) *	-0,973	0,192	-5,055	0,037
mp (L) x Vpp (L) *	-0,803	0,189	-4,253	0,051

*efeitos estatisticamente significativos no limite de confiança de 94%

Neste caso, o limite de confiança foi diminuído para 94%, sendo considerados os efeitos significativos com $p<0,06$, para que o efeito de interação das vazões de produto e de propileno glicol fosse incluído no modelo probabilístico, pois o valor de “p” obtido foi de 0,051 (Tabela 24).

Na Figura 30 é apresentado o Gráfico de Pareto, onde uma análise visual pode ser feita com relação aos efeitos principais e de interações entre as perturbações nas variáveis de entrada sobre a variável dependente estudada, a diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%.

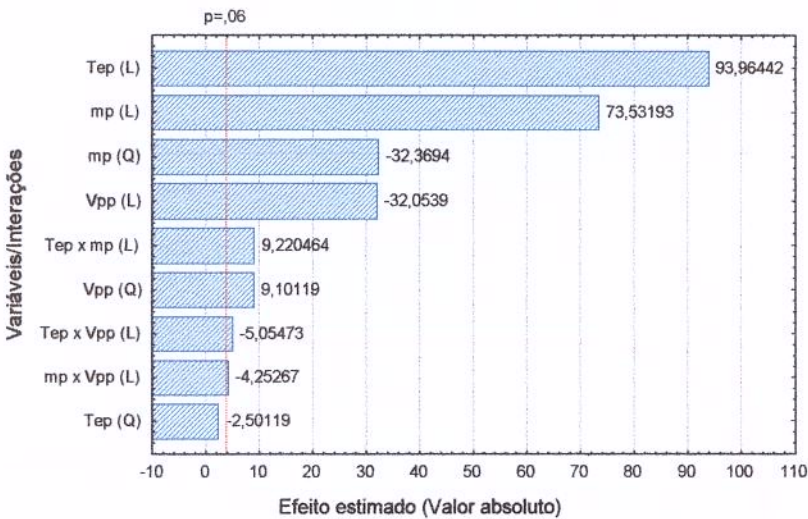


Figura 30 - Gráfico de Pareto para análises visuais dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre a diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%.

Através das análises da Tabela 24 e da Figura 30, observa-se que a variável que apresenta o maior efeito na diferença de temperatura de saída do produto é a perturbação na temperatura de entrada do produto, seguida das perturbações na vazão de produto e na vazão de propileno glicol, confirmando os resultados obtidos pelo fator de sensibilidade das perturbações individuais nestas variáveis de entrada.

Os efeitos lineares positivos das perturbações nas variáveis de temperatura de entrada e vazão de produto indicam que a temperatura de saída do produto é aumentada em 9,535 e 7,448, respectivamente, ao variar estas perturbações entre os níveis (-1) e (+1). Enquanto que o efeito linear negativo da perturbação na vazão de propileno glicol indica que a temperatura de saída do produto diminui ao variar esta perturbação do nível (-1) para o (+1).

Na Figura 31 são apresentadas as curvas de resposta transiente ajustadas (Equação 41) da diferença de temperatura de saída da sacarose 18%, nos ensaios de perturbações positivas na temperatura de entrada do produto, que são comparadas à curva ajustada de temperatura de saída da solução de sacarose 18% sob perturbação individual positiva na temperatura de entrada do produto, evidenciando que as interações das outras perturbações afetam substancialmente o comportamento da variável resposta.

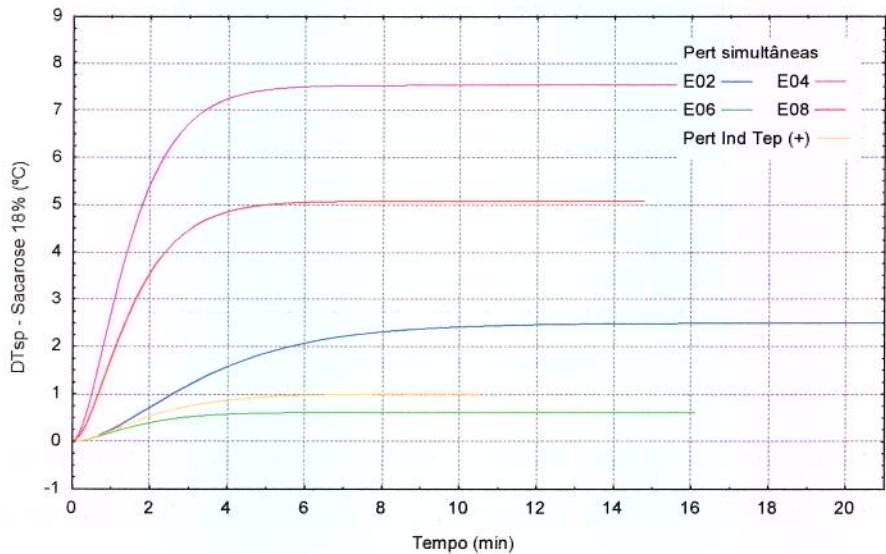


Figura 31 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva.

Na Figura 32 são apresentadas as curvas de resposta transiente ajustadas da diferença de temperatura de saída do produto mediante as perturbações simultâneas das variáveis de entrada, das quais a perturbação na temperatura de entrada do produto está no nível (-1). Paralelamente é apresentada a curva de resposta sob perturbação individual negativa da temperatura de entrada do produto.

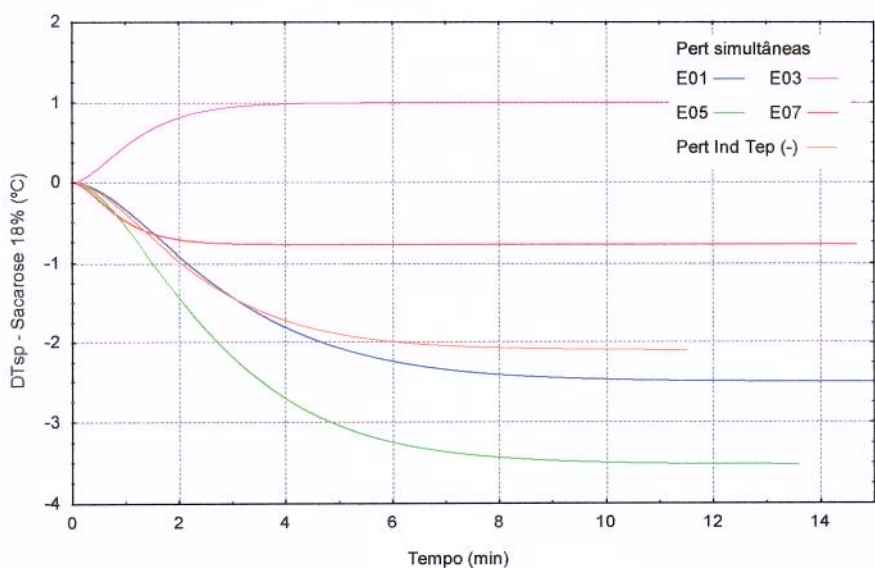


Figura 32 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa.

Observa-se pela Figura 31, que os ensaios de perturbações positivas na temperatura de entrada do produto provocam um aumento na temperatura de saída, da mesma forma que o ensaio de perturbação individual positiva nesta mesma variável. Enquanto que os ensaios de perturbações negativas da temperatura de entrada de produto, apresentados na Figura 32, apresentam decréscimo na temperatura de saída do produto, com exceção do ensaio E03, o qual possui a combinação de perturbações [(-1) Tep, (+1) mp, (-1) Vpp], evidenciando que os efeitos de interações entre as perturbações afetam o comportamento da temperatura de saída do produto, pois as perturbações [(+1) mp, (-1) Vpp] contribuem para um desvio de tendência contrária.

Comparando as curvas de resposta simultâneas em relação à curva de perturbação individual de temperatura de entrada, observou-se que as que tiveram os maiores acréscimos na diferença de temperatura de saída do produto (E04 e E08, Figura 31) referem-se a perturbações positivas de vazão de produto, e as curvas que apresentaram os menores desvios de diferença de temperatura de saída do produto (E01 e E05, Figura 32), foram aquelas em que a vazão de produto foi diminuída.

Estas análises permitem confirmar que a segunda variável que tem o maior efeito na resposta de diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18% é a vazão de produto.

O efeito quadrático da perturbação na vazão de produto é negativo, indicando um decréscimo na temperatura de saída do produto ao variar os níveis de $(+\alpha)$ a $(-\alpha)$, ocorrendo o contrário para o efeito quadrático de vazão de propileno glicol. Estes efeitos podem ser evidenciados pela análise da Figura 33, onde são apresentadas as curvas de resposta transiente da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18% mediante perturbações simultâneas em cada variável independente nos níveis axiais.

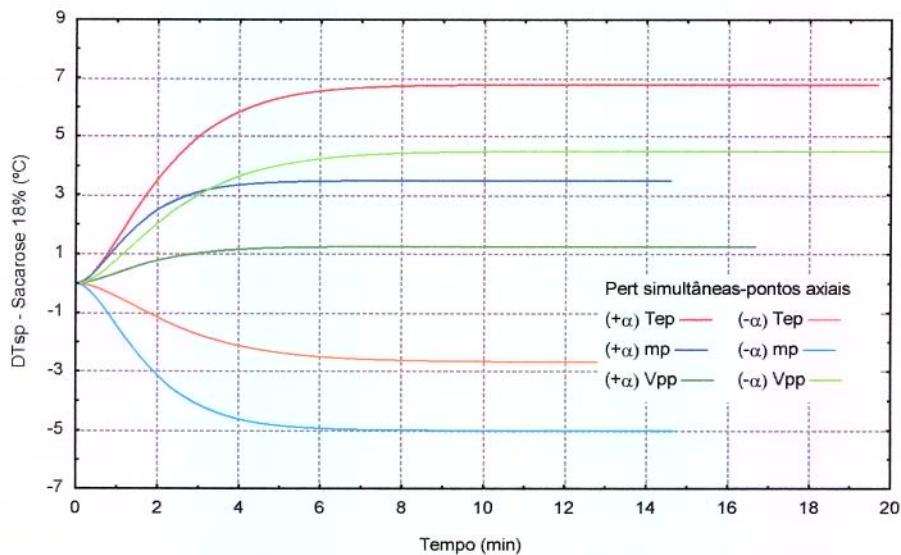


Figura 33 - Curvas de resposta ajustadas da temperatura de saída da solução de sacarose 18% nos ensaios de E09 a E14 (Tabela 23) de perturbações simultâneas das variáveis de entrada nos níveis axiais.

Observa-se que, mesmo para os ensaios propostos para as perturbações nos níveis axiais, ainda permanecem as perturbações simultâneas das outras variáveis independentes promovendo os mesmos comportamentos para os ensaios que possuem as perturbações de maior intensidade para a vazão de propileno glicol.

As curvas de resposta permitem visualizar os diferentes comportamentos da diferença de temperatura de saída do produto sob cada combinação de perturbação das variáveis de entrada.

Através da análise das curvas de resposta adimensionais é possível visualizar as simetrias entre as combinações de perturbações. Nas Figuras 34 e 35 são apresentadas as diferenças de temperatura de saída adimensionais da solução de sacarose 18%, sob perturbações das variáveis de entrada nos níveis (+1) e (-1), respectivamente.

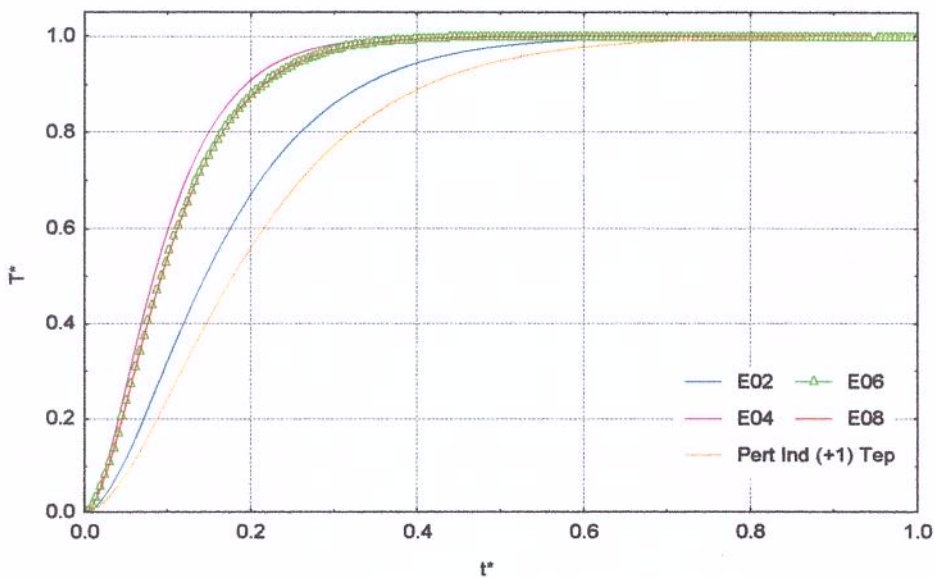


Figura 34 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva.

Analisando a Figura 34, observam-se simetrias entre as curvas da diferença de temperatura do produto referentes aos ensaios E06 e E08, sob perturbações simultâneas no nível (+1) de temperatura de entrada do produto, uma vez que estão sobrepostas. Não se observa simetrias em nenhum outro ensaio, inclusive nos ensaios apresentados na Figura 35.

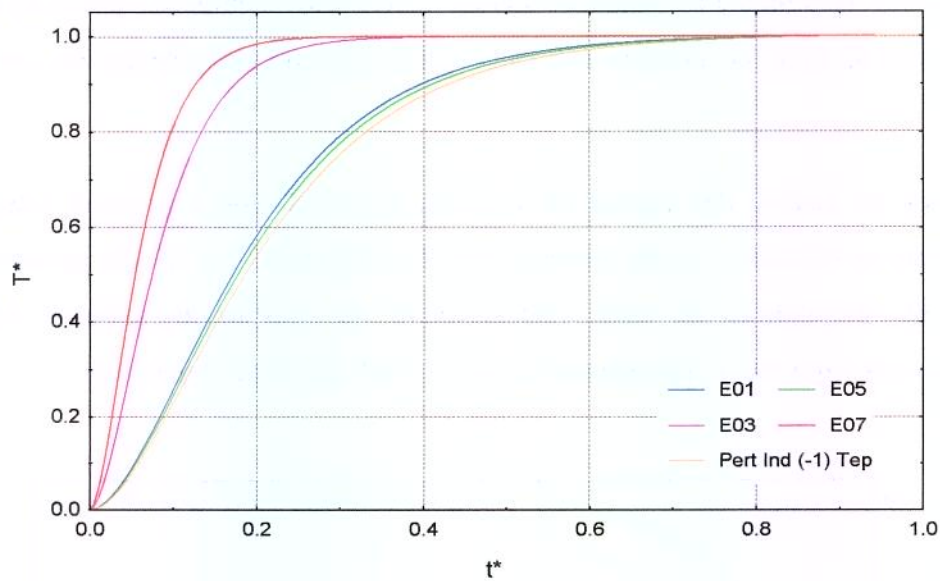


Figura 35 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa.

IV. 4. 2. 2 –Modelo Quadrático para Predição da Diferença de Temperatura de Saída da Solução de Sacarose 18% sob Perturbações Simultâneas das Variáveis de Entrada.

Com a finalidade de obtenção da superfície de resposta para predição da diferença de temperatura de saída do produto sob as perturbações simultâneas nas variáveis de entrada, foram avaliadas as relações entre o “F_{calculado}” e o “F_{tabelado}” e os coeficientes de regressão do modelo quadrático, desconsiderando os parâmetros estatisticamente não significativos no intervalo de confiança de 94%, apresentados na Tabela 24. Neste caso, desconsiderou-se apenas o efeito quadrático da perturbação da temperatura de entrada do produto.

O valor de R² foi de 0,995, o que significa que 99,5% das variações experimentais são explicadas pelo modelo probabilístico ajustado. A relação F_{cal}/F_{tab} foi de 51,46. O erro puro encontrado foi de 0,023, o que demonstra a reprodutibilidade dos dados experimentais perante um desvio tão baixo.

Deste modo, o modelo probabilístico codificado entre os níveis $(-\alpha)$ e $(+\alpha)$ e válido nesta faixa de perturbação, é mostrado na equação (49), sendo significativo e preditivo estatisticamente:

$$\begin{aligned} DT_{sp} = & 1,996 + 3,145\Delta T_{ep} + 2,144\Delta m_p - 0,999\Delta m_p^2 - 0,919\Delta V_{pp} + \\ & + 0,403\Delta V_{pp}^2 + 0,403\Delta T_{ep}\Delta m_p - 0,230\Delta T_{ep}\Delta V_{pp} - 0,173\Delta m_p\Delta V_{pp} \end{aligned} \quad (49)$$

As superfícies de resposta da temperatura de saída do produto (DT_{sp}) em função das perturbações nas variáveis significativas são mostradas na Figura 36.

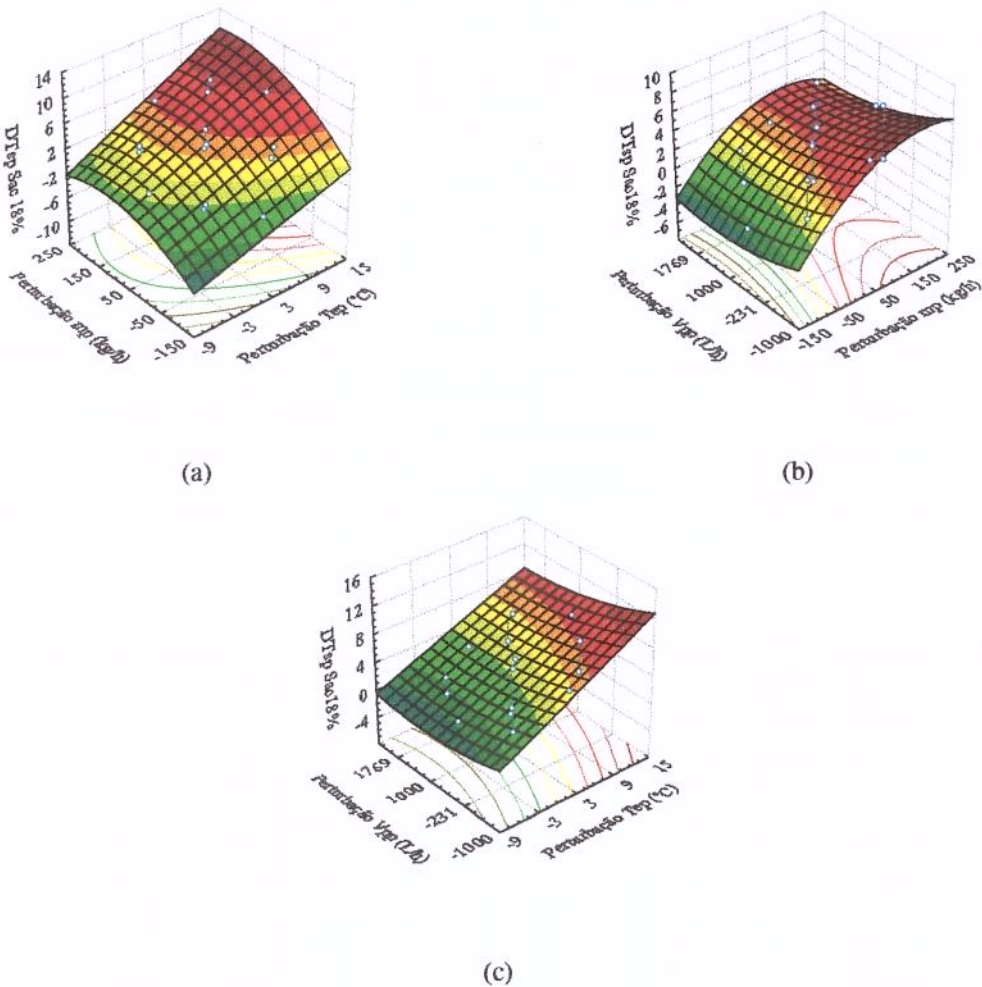


Figura 36 - Superfícies de resposta da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18% (DT_{sp}) em função das seguintes perturbações: (a) vazão de produto e temperatura de entrada de produto, (b) vazão de produto e vazão de propileno glicol, (c) vazão de propileno glicol e temperatura de entrada do produto.

As superfícies de resposta mostradas permitem a visualização do comportamento da diferença de temperatura de saída do produto sob perturbações nas variáveis, mostrando os diferentes comportamentos da resposta a cada combinação entre as perturbações. Isto demonstra a necessidade de avaliação das interações entre as perturbações para a implementação das estratégias de controle não convencionais, pois um controlador S.I.S.O. (*Single Input, Single Output*) poderá ser insuficiente na ocorrência de distúrbios simultâneos nas variáveis de processo, uma vez que o processo apresenta-se não-linear.

IV. 4. 2. 3 – Análises dos Efeitos das Perturbações Simultâneas nas Variáveis Independentes sobre os Parâmetros t_d e z da Curva de Resposta Transiente.

Os parâmetros gráficos para configuração de sintonias de controle são obtidos pela tangente ao ponto de inflexão das funções ajustadas às curvas de resposta da diferença de temperatura de saída do produto, conforme exemplificado na Figura 29.

Nas Tabelas 25 e 26 são apresentados os efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis de entrada, sobre o parâmetro t_d e z , respectivamente, além dos parâmetros estatísticos de “t” e “p” e os desvios padrões (Erro Puro). Foram considerados os efeitos lineares (L) e quadráticos (Q) estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%.

Tabela 25 - Efeitos principais e de interações das perturbações sobre o parâmetro t_d para a solução de sacarose 18%.

	Efeitos	Desvio Padrão	t(2)	p
Média *	0,334	0,008	44,155	0,001
Tep (L)	-0,003	0,013	-0,275	0,809
Tep (Q)	0,051	0,022	2,277	0,151
mp (L) *	-0,252	0,013	-19,911	0,003
mp (Q) *	-0,157	0,022	-7,045	0,020
Vpp (L) *	-0,112	0,012	-9,549	0,011
Vpp (Q)	-0,024	0,020	-1,181	0,359
Tep (L) x mp (L) *	0,191	0,027	6,941	0,020
Tep (L) x Vpp (L) *	-0,145	0,024	-6,013	0,027
mp (L) x Vpp (L) *	0,142	0,024	6,026	0,026

*efeitos estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%

Tabela 26 - Efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis independentes sobre o parâmetro z da curva de resposta transiente de temperatura de saída da solução de sacarose 18%.

	Efeitos	Desvio Padrão	t(2)	p
Média *	3,254	0,073	44,779	0,000
Tep (L)	0,221	0,122	1,815	0,211
Tep (Q)	0,287	0,215	1,337	0,313
mp (L) *	-2,508	0,122	-20,642	0,002
mp (Q) *	-1,682	0,214	-7,868	0,016
Vpp (L) *	-1,045	0,112	-9,295	0,011
Vpp (Q)	-0,419	0,196	-2,138	0,166
Tep (L) x mp (L) *	1,814	0,264	6,876	0,021
Tep (L) x Vpp (L) *	-1,369	0,231	-5,927	0,027
mp (L) x Vpp (L) *	2,001	0,227	8,830	0,013

*efeitos estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%

Nas Figuras 37 e 38 são apresentados os Gráficos de Pareto obtidos para análises dos efeitos das perturbações sobre as variáveis respostas, td e z, respectivamente.

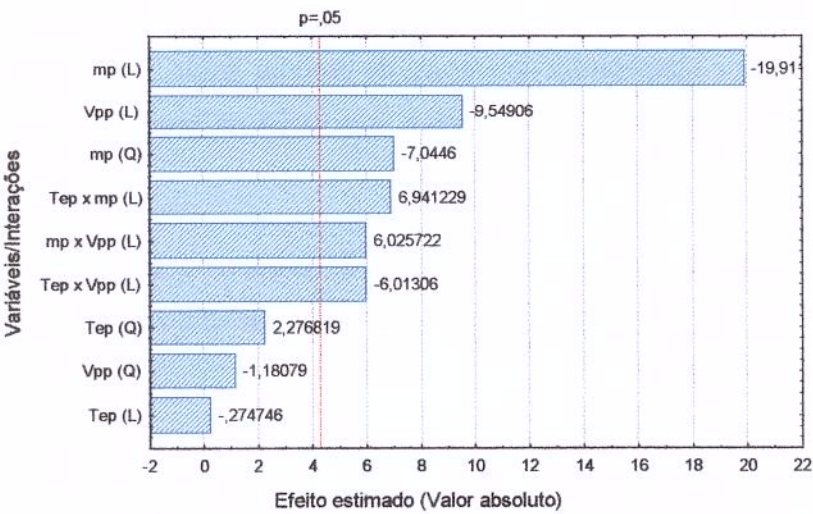


Figura 37 - Gráfico de Pareto para análise dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro td da curva de resposta da temperatura de saída da solução de sacarose 18%.

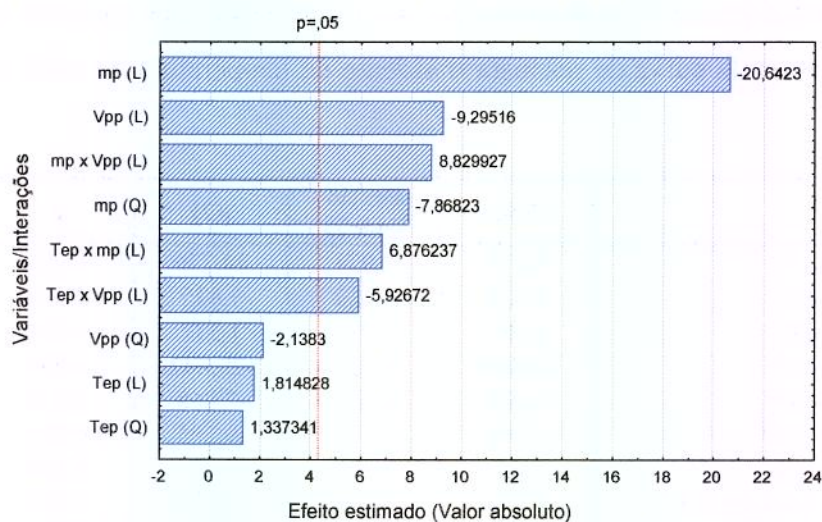


Figura 38 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro z da curva de resposta da temperatura de saída solução de sacarose 18%.

Para ambas respostas estudadas, td e z, observa-se que as variáveis que não apresentam efeito significativo são: vazão de propileno glicol e temperatura de entrada de produto quadráticas e temperatura de entrada de produto linear. A variável que apresenta o maior efeito linear sobre as respostas, td e z, é a vazão de produto, seguida da vazão de propileno glicol.

Os efeitos das perturbações nas vazões de produto e de propileno glicol foram negativos em ambos os casos, indicando um decréscimo de td e z ao variar esta perturbação do nível (-1) para o nível (+1).

Para avaliar a validade do modelo probabilístico ajustado obtiveram-se as relações entre o “F_{calculado}” e o “F_{tabelado}”, além dos coeficientes de regressão para os dois parâmetros, desconsiderando os efeitos estaticamente não significativos. Estes valores são mostrados na Tabela 27 e indicam que o modelo ajustado não é estatisticamente significativo, pois a relação F_{calc}/F_{tab} foi menor do que 4 e o valor de R² bem distante de um para as duas respostas consideradas sob perturbações simultâneas nas variáveis de entrada.

Tabela 27 - Valores de F_{calc}/F_{tab} e R^2 obtidos pelo ajuste do modelo probabilístico quadrático para predição das respostas td e z .

	F_{calc}/F_{tab}	R^2
td	1,194	0,692
z	1,465	0,727

Apesar dos modelos estatísticos não serem significativos e preditivos estatisticamente, os mesmos são apresentados nas Equações (50) e (51) para uma estimativa quantitativa aproximada de td e z , respectivamente, válidos entre os níveis codificados $(-\alpha)$ e $(+\alpha)$:

$$td = 0,33 - 0,0709\Delta mp - 0,029\Delta mp^2 - 0,0393\Delta Vpp + 0,03745\Delta Tep\Delta mp - 0,03386\Delta Tep\Delta Vpp + 0,03029\Delta mp\Delta Vpp \quad (50)$$

$$z = 3,139 - 0,6835\Delta mp - 0,2954\Delta mp^2 - 0,3779\Delta Vpp + 0,3614\Delta Tep\Delta mp - 0,3260\Delta Tep\Delta Vpp + 0,4250\Delta mp\Delta Vpp \quad (51)$$

Mesmo as superfícies de resposta tridimensionais, representativas do comportamento dos parâmetros gráficos, td e z , em função das perturbações das variáveis de entrada, não serem estatisticamente válidas, as mesmas são apresentadas para visualização de uma tendência do comportamento em torno da superfície traçada.

Na Figura 39 são apresentadas as superfícies de resposta que representam os comportamentos do tempo morto, td (Figuras 39.a, 39.b e 39.c), e da rapidez da resposta, z (Figuras 39.d, 39.e e 39.f), sob perturbações simultâneas das variáveis de entrada, temperatura de entrada do produto, vazão do produto e vazão de propileno glicol.

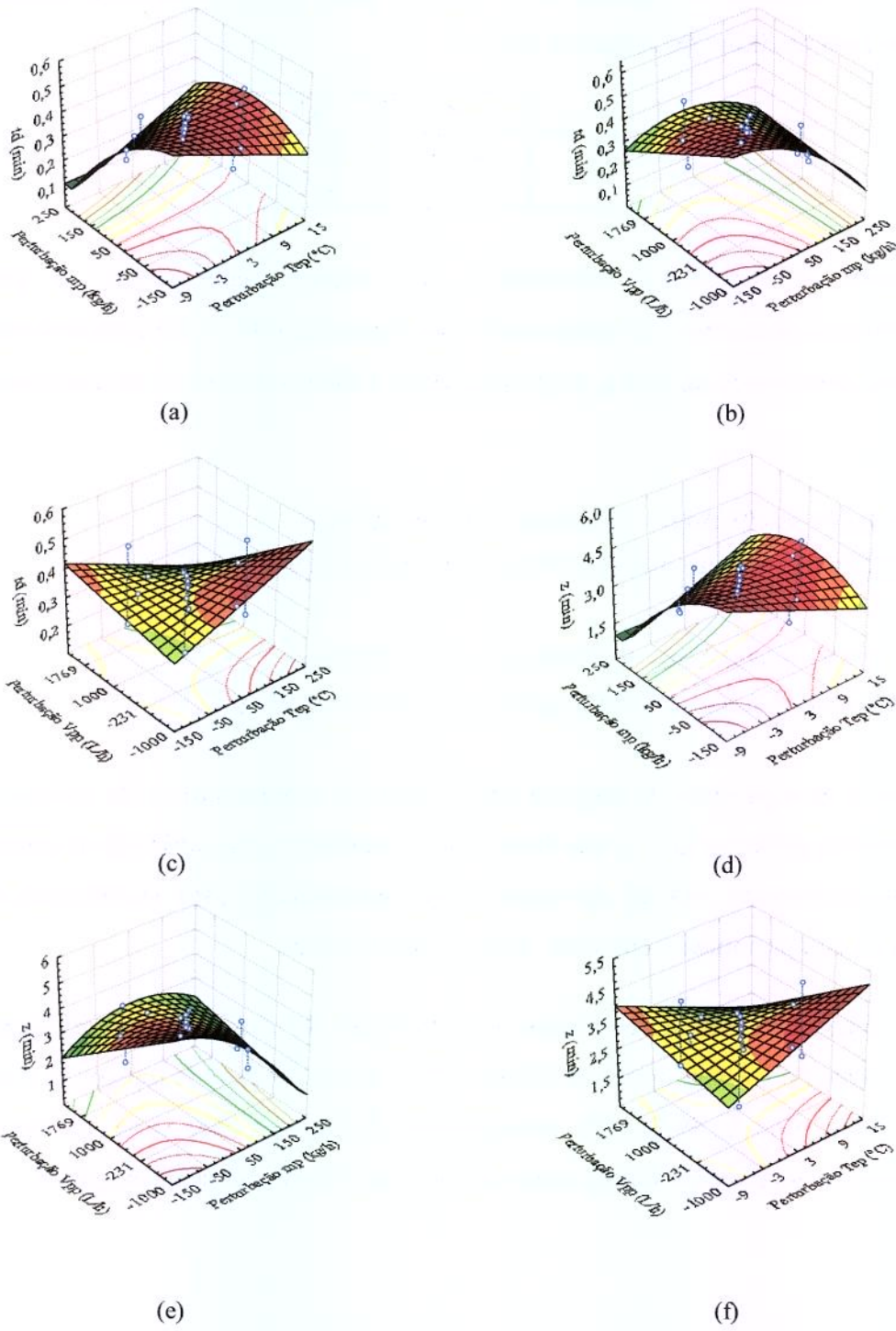


Figura 39 - Superfícies de resposta de td [(a), (b) (c)] e z [(d), (e), (f)], em função das seguintes perturbações: (a), (d) temperatura de entrada e vazão da solução de sacarose 18%, (b), (e) vazões de propileno glicol e da solução de sacarose 18%, (c), (f) temperatura de entrada do produto e vazão de propileno glicol.

Na Figura 39, observam-se as tendências do tempo morto t_d , e do parâmetro z , que representa a rapidez de resposta da diferença de temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob as perturbações simultâneas. Notam-se os pontos experimentais distantes das superfícies tridimensionais, indicando a falta de ajuste do modelo a estes pontos.

Uma explicação plausível para este fato seria a consideração dos ajustes de segunda ordem dos ensaios E03, E06 e E07, os quais apresentaram comportamento de diferença de temperatura de saída do produto complexo. Para estes casos, a Equação (41) de segunda ordem, com $\xi=1$, não foi representativa, porém acatada para uso da metodologia do Planejamento Experimental, que requer um número mínimo de ensaios para comprovação estatística das análises de efeito.

Contudo, apesar de não se ter conseguido uma correlação preditiva e significativa dos parâmetros t_d e z , as tendências indicam uma não-linearidade do processo sob as perturbações realizadas, mais uma vez comprovando a não simplicidade de configuração de sintonias de controladores, mesmo que sejam S.I.S.O, porém mais adequado para controladores M.I.M.O.

IV. 4. 3. – Ajuste dos Dados Experimentais da Diferença de Temperatura de Saída do Açúcar Invertido ao Modelo de Segunda Ordem.

Os históricos dos dados experimentais da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido sob perturbações simultâneas das variáveis de entrada, com seus respectivos ajustes, estão mostrados no Apêndice C, nas Figuras de C. 2. 1 a C. 2. 17.

Nas Figuras C. 2. 3 e C. 2. 7 houve a desconsideração de alguns valores experimentais da diferença de temperatura de saída de produto, devido a não manutenção da temperatura de entrada do propileno glicol, melhorando assim o ajuste da Equação. Esta desconsideração foi feita seguindo os mesmos critérios citados anteriormente no Item IV. 2. 2.

Na Tabela 28 são apresentados os parâmetros ajustados da Equação (41) para a diferença de temperatura de saída do açúcar invertido nos ensaios de perturbações simultâneas das variáveis de entrada, juntamente com os coeficientes de regressão do ajuste.

Tabela 28 - Parâmetros das funções ajustadas aos pontos experimentais da DTsp do açúcar invertido, sob perturbações simultâneas das variáveis de entrada e coeficientes de correlação.

AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO			
Ensaio	Kpr	τ	R
E 01	-2,6000	1,4266	0,992
E 02	3,4500	2,9753	0,992
E 03	0,0400	0,9419	0,940
E 04	10,0000	1,2338	0,974
E 05	-3,5000	1,9953	0,976
E 06	3,7000	2,7349	0,993
E 07	-1,1377	0,6002	0,999
E 08	10,0000	1,2450	0,976
E 09	12,0000	1,9370	0,984
E 10	-3,5108	2,0859	0,994
E 11	5,6000	0,7650	0,970
E 12	-3,2041	1,1169	0,998
E 13	3,4000	1,4271	0,965
E 14	2,7000	1,7278	0,923
E 15	3,1000	1,3546	0,980
E 16	3,5600	1,3903	0,983
E 17	2,8700	1,3144	0,979

IV. 4. 4 – Resultados do PFCC para o Açúcar Invertido

O resultado do planejamento fatorial composto central 2^3 realizado para analisar as perturbações simultâneas é mostrado na Tabela 29, conforme o PFCC apresentado na Tabela 12. De forma análoga ao planejamento da solução de sacarose 18%, os níveis foram re-codificados para análises em função dos valores reais de perturbações atingidos nos ensaios, devido às dificuldades em se atingir os valores exatos dos níveis do planejamento $[(-\alpha), (-1), (0), (+1), (+\alpha)]$ durante os ensaios.

O valor da resposta de temperatura de saída do produto é dado em termos de $DT_{sp}=T-T_{1^{o}RP}$, obtido do ajuste da Equação (41). Os valores dos parâmetros td e z foram

obtidos traçando-se a tangente ao ponto de inflexão nas funções ajustadas de cada ensaio, conforme exemplo da Figura 29.

Tabela 29- Resultados dos ensaios do PFCC para o açúcar invertido com os níveis reais codificados.

AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO						
Ensaio	Variáveis de entrada			Variáveis de saída		
	ΔT_p (°C)	Δm_p (kg/h)	ΔV_{pp} (L/h)	ΔT_{sp} (°C)	td (min)	z (min)
01	-0,71	-1,03	-0,95	-2,60	0,40	3,88
02	0,78	-0,96	-0,96	3,45	0,84	8,08
03	-0,97	0,96	-0,95	0,04	0,30	2,56
04	1,04	1,06	-0,97	10,00	0,35	3,36
05	-1,02	-1,03	0,95	-3,49	0,56	5,41
06	0,89	-0,95	0,93	3,69	0,77	7,41
07	-1,17	0,95	0,94	-1,14	0,17	1,63
08	0,97	1,04	0,95	10,00	0,35	3,39
09	1,80	0,06	-0,04	12,00	0,55	5,27
10	-1,54	-0,01	0,01	-3,51	0,59	5,66
11	0,12	1,67	-0,02	5,60	0,22	2,08
12	-0,03	-1,70	-0,03	-3,20	0,31	3,04
13	0,18	-0,01	1,18	3,40	0,40	3,88
14	-0,07	0,00	-1,60	2,70	0,49	4,70
15	0,11	0,00	-0,07	3,10	0,38	3,68
16	0,11	0,00	-0,07	3,56	0,39	3,78
17	0,11	0,00	-0,07	2,87	0,37	3,57

IV. 4. 4. 1 – Análise dos Efeitos das Perturbações nas Variáveis Independentes sobre a Diferença de Temperatura de Saída do Açúcar Invertido.

Na Tabela 30 são apresentados os efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis de entrada, sobre a variável resposta, temperatura de saída do produto (DTsp), além dos valores de “t” e “p” e os desvios padrões (Erro Puro). Foram considerados os efeitos lineares (L) e quadráticos (Q) estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%.

Na Figura 40 é apresentado o Gráfico de Pareto, onde uma análise visual pode ser feita com relação aos efeitos principais e de interações entre as perturbações nas variáveis de entrada para o açúcar invertido.

Tabela 30 - Efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas nas variáveis independentes sobre a diferença de temperatura de saída do açúcar invertido.

	Efeitos	Desvio Padrão	t(2)	p
Média *	3,195	0,194	16,455	0,004
Tep (L) *	15,008	0,361	41,615	0,001
Tep (Q)	1,994	0,584	3,415	0,076
mp (L) *	7,998	0,338	23,679	0,002
mp (Q) *	-3,298	0,587	-5,616	0,030
Vpp (L)	-0,226	0,313	-0,720	0,546
Vpp (Q)	0,472	0,527	0,896	0,465
Tep (L) x mp (L) *	3,690	0,752	4,906	0,039
Tep (L) x Vpp (L)	0,216	0,648	0,334	0,770
mp (L) x Vpp (L)	0,246	0,616	0,400	0,728

*efeitos estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%

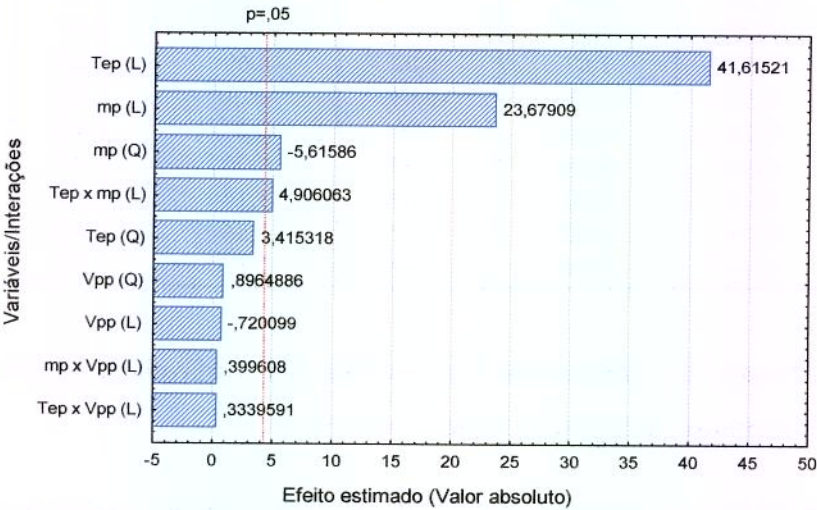


Figura 40 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre a diferença de temperatura de saída do açúcar invertido.

Observa-se que a perturbação que apresenta o maior efeito na temperatura de saída é a temperatura de entrada do produto, seguida da perturbação na vazão de produto e da interação entre a temperatura de entrada e a vazão do produto. A perturbação na vazão de propileno glicol não tem efeito significativo na temperatura de saída do produto, confirmando os resultados obtidos pelo fator de sensibilidade das perturbações individuais nestas variáveis de entrada.

Os efeitos lineares positivos das perturbações nas variáveis de temperatura de entrada e vazão de produto indicam que a temperatura de saída do produto é aumentada em 15,008 e 7,998, respectivamente, ao variar estas perturbações entre os níveis (-1) e (+1).

As curvas de resposta transiente da temperatura de saída do produto foram traçadas de acordo com as funções de segunda ordem ajustadas e são mostradas nas Figuras 41 e 42.

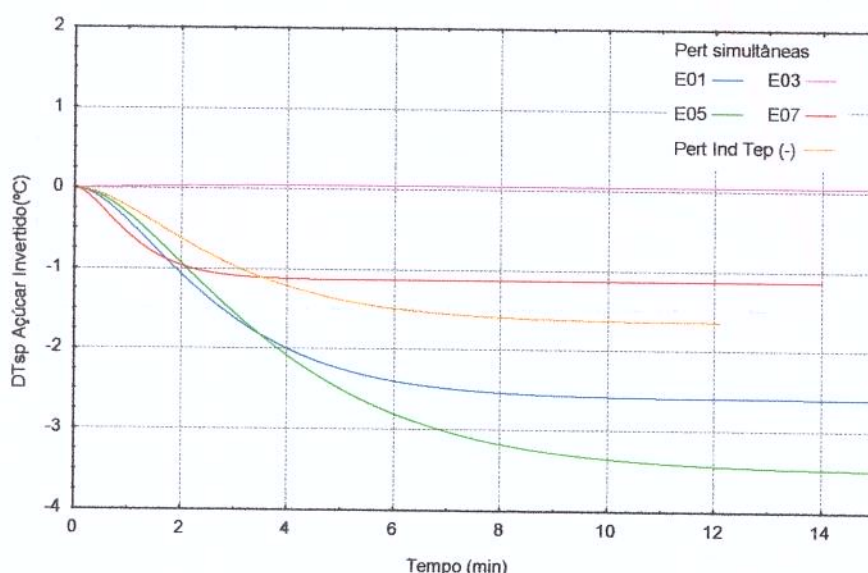


Figura 41 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa.

Analisando a Figura 41 e comparando as curvas de perturbações simultâneas, as quais tiveram perturbação no nível (-1) de Tep, com a curva de resposta de perturbação individual negativa na temperatura de entrada de produto, constatou-se que as curvas que obtiveram uma variação maior da diferença de temperatura de saída do produto são referentes aos ensaios de perturbações negativas da vazão de produto.

As curvas que obtiveram menor desvio com relação à curva de perturbação individual negativa na temperatura de entrada do produto são relativas aos ensaios de perturbação positiva na vazão de produto. Isto confirma o resultado obtido pela análise do Gráfico de

Pareto, na qual foi concluída que a segunda variável que tem o maior efeito na temperatura de saída do produto é a perturbação na vazão de produto.

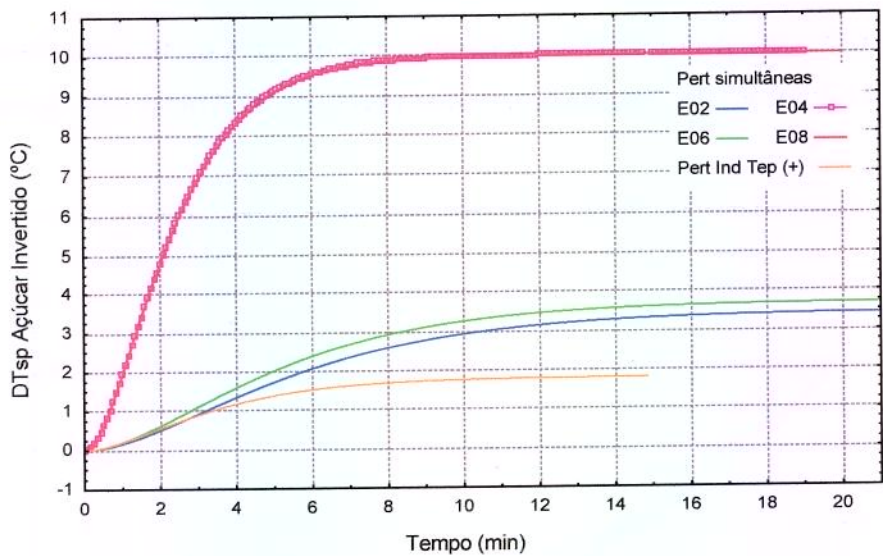


Figura 42 - Curvas de resposta ajustadas da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva.

Na Figura 42, observa-se que as curvas de resposta transiente dos ensaios E04 e E08 ficaram sobrepostas. Nestes ensaios, perturbou-se a vazão de produto no nível (+1), sendo que a vazão de propileno glicol foi perturbada ao nível (-1) no ensaio E04 e ao nível (+1) no ensaio E08. Isto comprova o efeito não significativo da vazão de propileno glicol ao variar a perturbação na vazão de propileno glicol entre o nível (-1) e (+1), pois as curvas de resposta da temperatura de saída do produto são análogas.

Os gráficos adimensionais foram construídos para visualização das simetrias ocorridas entre as diferentes combinações de perturbações realizadas e são apresentados nas Figuras 43 e 44, relativas às perturbações nos níveis (-1) e (+1) de temperatura de entrada do açúcar invertido, respectivamente. Concomitantemente, foram graficadas as curvas de resposta de diferença de temperatura de saída do produto sob perturbações individuais, negativa e positiva, de mesmas amplitudes.

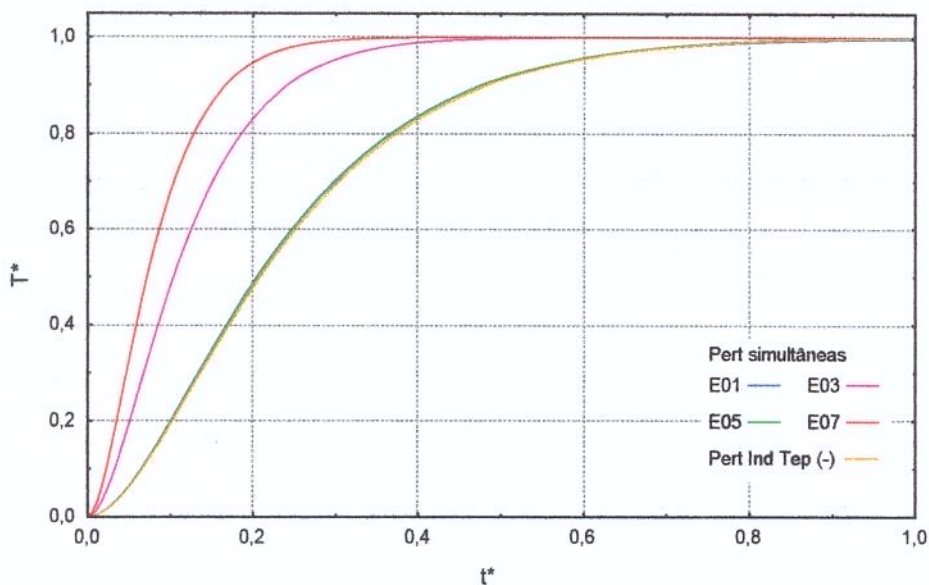


Figura 43 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (-1) (E01, E03, E05 e E07) e sob perturbação individual negativa.

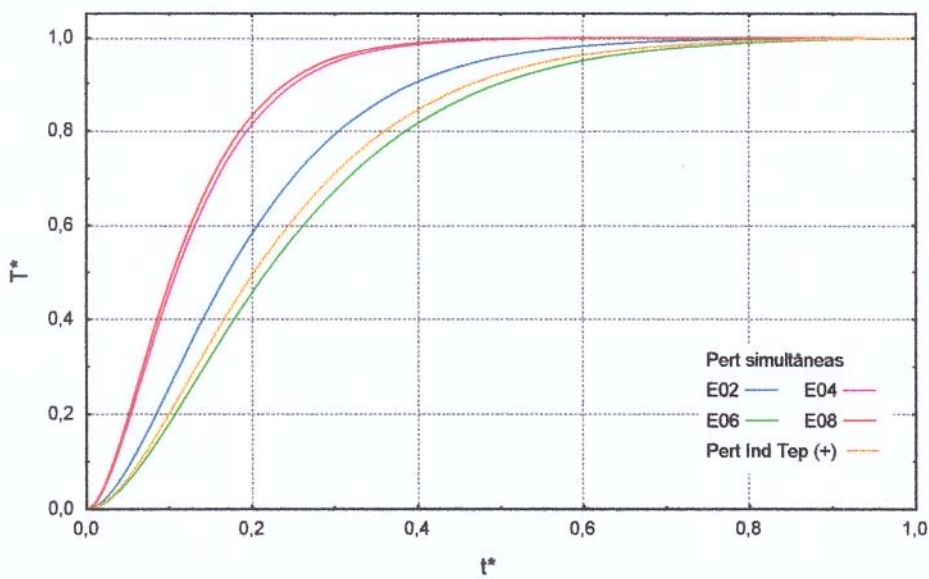


Figura 44 - Curvas de resposta adimensionais da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido, sob perturbações de temperatura de entrada de produto simultâneas no nível (+1) (E02, E04, E06 e E08) e sob perturbação individual positiva.

Na Figura 43, observam-se simetrias entre os ensaios E01 e E05, correspondentes aos ensaios de perturbações simultâneas no nível (-1) de temperatura de entrada de produto. A curva adimensional de diferença de temperatura de saída sob perturbação individual na temperatura de entrada de mesma amplitude também está sobreposta às curvas obtidas nos ensaios E01 e E05, mostrando a simetria do comportamento da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido nestes casos.

Na Figura 44, é possível notar a simetria entre os ensaios E04 e E08 das curvas adimensionais de diferença de temperatura de saída do açúcar invertido sob perturbação no nível (+1) de temperatura de entrada, conforme constatado na Figura 42.

Através destas curvas, constata-se as diferenças de comportamento da temperatura de saída do açúcar invertido após perturbação individual e após diferentes combinações de perturbações simultâneas.

De forma análoga aos resultados obtidos para a solução de sacarose 18%, os futuros trabalhos de implementação de controle neste sistema devem levar em consideração as múltiplas perturbações que podem ocorrer no processo de resfriamento do açúcar invertido, reafirmando a necessidade de controles inteligentes M.I.M.O (*Multiple Input, Multiple Output*).

IV. 4. 4. 2 –Modelo Quadrático para Predição da Temperatura de Saída do Açúcar Invertido sob Perturbações nas Variáveis de Entrada.

Com a finalidade de obtenção da superfície de resposta para predição da temperatura de saída do produto sob perturbações simultâneas nas variáveis de entrada, foram avaliadas as relações entre o $F_{\text{calculado}}$ e o F_{tabelado} e os coeficientes de regressão do modelo quadrático, desconsiderando os efeitos estatisticamente não significativos no intervalo de confiança de 95%, apresentados na Tabela 30.

O valor de R^2 foi de 0,994 e a relação $F_{\text{cal}}/F_{\text{tab}}$ foi de 149,97. Deste modo, o modelo probabilístico é significativo e preditivo estatisticamente e as superfícies de resposta da

temperatura de saída do produto em função das perturbações nas variáveis significativas são mostradas na Figura 45.

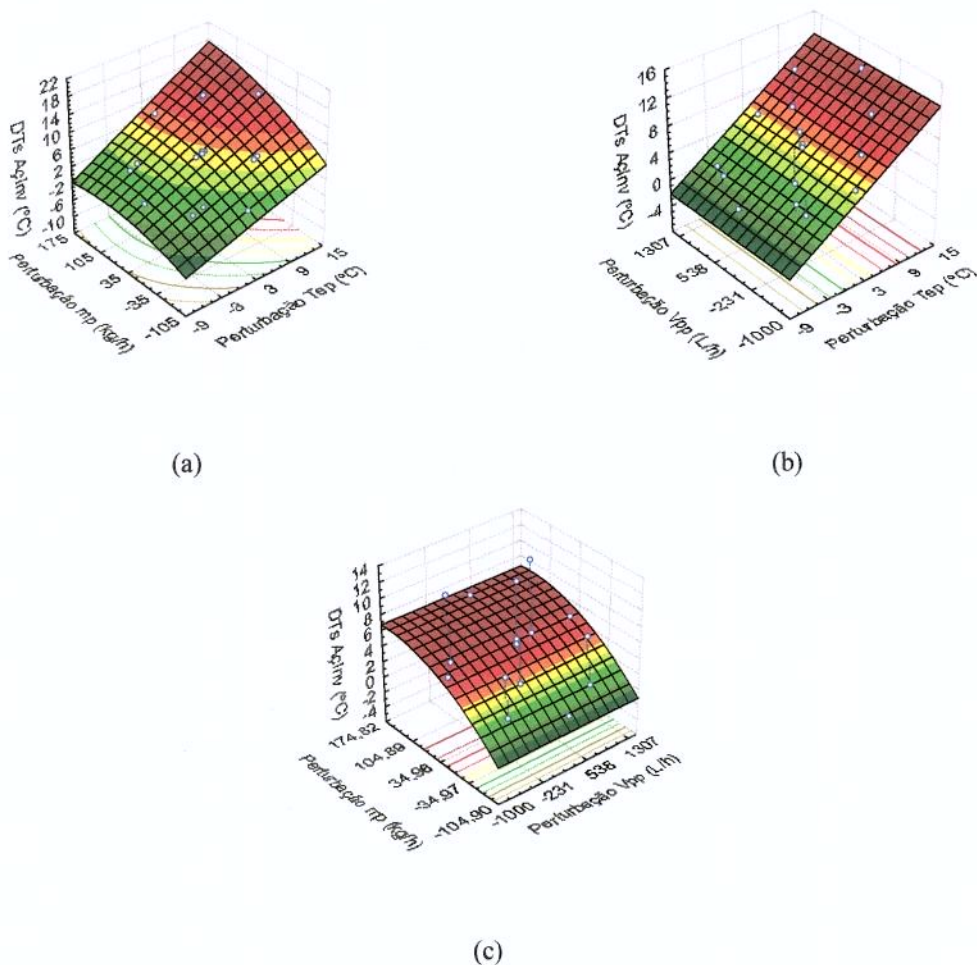


Figura 45 – Superfícies de resposta da DTsp do açúcar invertido em função das seguintes perturbações: (a) temperatura de entrada e na vazão de produto, (b) vazão de propileno glicol e temperatura de entrada de produto, (c) vazões de propileno glicol e de produto.

O modelo estatístico de segunda ordem para a predição da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido é mostrado na Equação (52), válido entre os níveis codificados $(-\alpha)$ e $(+\alpha)$:

$$DT_{sp} = 3,088 + 4,4463\Delta T_{ep} + 2,3237\Delta mp - 0,6841\Delta mp^2 + 0,6581\Delta T_{ep}\Delta mp \quad (52)$$

IV. 4. 4. 3 – Análise dos Efeitos das Perturbações Simultâneas das Variáveis Independentes sobre os Parâmetros t_d e z da Curva de Resposta Transiente de Diferença de Temperatura de Saída do Açúcar Invertido.

Os parâmetros de controle foram obtidos pela tangente ao ponto de inflexão das funções ajustadas às curvas de resposta da diferença de temperatura de saída do produto, conforme exemplificado na Figura 29.

Nas Tabelas 31 e 32 são apresentados os efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis de entrada, sobre os parâmetros, t_d e z , respectivamente, além dos valores de “t” e “p” e os desvios padrões (Erro Puro). Foram considerados os efeitos lineares (L) e quadráticos (Q) estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%.

Nas Figuras 46 e 47 são apresentados os Gráficos de Pareto obtidos para análise dos efeitos das perturbações nas variáveis de entrada sobre os parâmetros t_d e z , respectivamente.

Tabela 31 - Efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis independentes sobre o parâmetro t_d da curva de resposta transiente da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido.

	Efeitos	Desvio Padrão	t(2)	p
Média *	0,408	0,006	68,264	0,000
Tep (L) *	0,256	0,011	23,008	0,002
Tep (Q) *	0,309	0,018	17,191	0,003
mp (L) *	-0,404	0,010	-38,857	0,001
mp (Q) *	-0,206	0,018	-11,375	0,008
Vpp (L) *	-0,076	0,010	-7,905	0,016
Vpp (Q) *	0,171	0,016	10,528	0,009
Tep (L) x mp (L) *	-0,241	0,023	-10,404	0,009
Tep (L) x Vpp (L)	-0,012	0,020	-0,579	0,621
mp (L) x Vpp (L) *	-0,136	0,019	-7,183	0,019

*efeitos estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%

Tabela 32 - Efeitos principais e de interações das perturbações nas variáveis independentes sobre o parâmetro z da curva de resposta transiente da diferença de temperatura de saída do açúcar invertido.

	Efeitos	Desvio Padrão	t(7)	p
Média *	3,946	0,057	69,266	0,000
Tep (L) *	2,558	0,106	24,171	0,002
Tep (Q) *	2,903	0,171	16,943	0,003
mp (L) *	-3,968	0,099	-40,036	0,001
mp (Q) *	-2,050	0,172	-11,894	0,007
Vpp (L) *	-0,682	0,092	-7,417	0,018
Vpp (Q) *	1,607	0,155	10,399	0,009
Tep (L) x mp (L) *	-2,115	0,221	-9,582	0,011
Tep (L) x Vpp (L)	-0,349	0,190	-1,836	0,208
mp (L) x Vpp (L) *	-1,091	0,181	-6,033	0,026

*efeitos estatisticamente significativos no limite de confiança de 95%

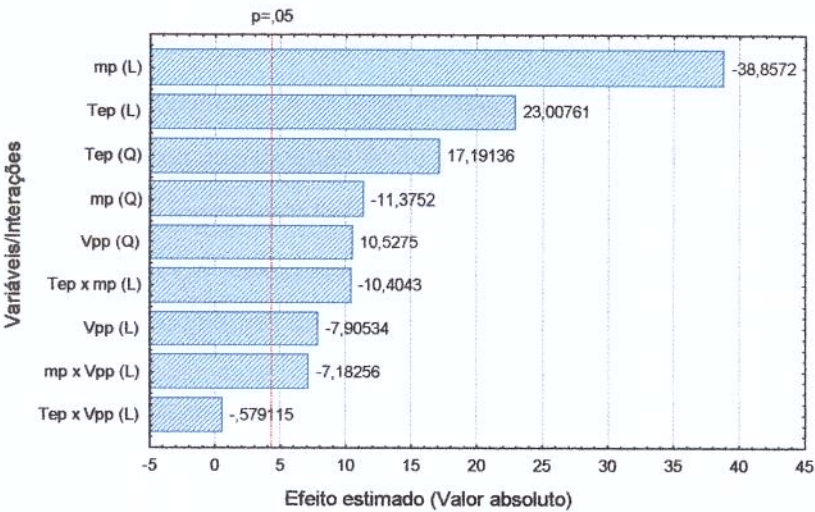


Figura 46 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro de controle td para o açúcar invertido.

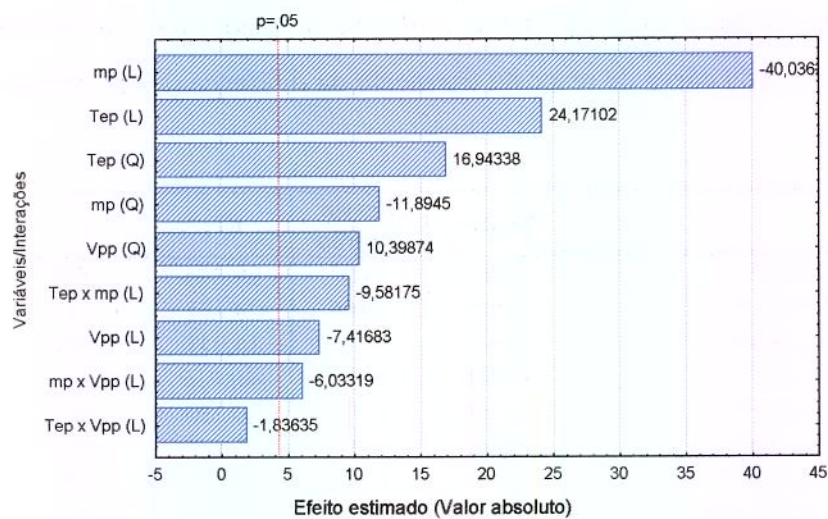


Figura 47 - Gráfico de Pareto para análise visual dos efeitos principais e de interações das perturbações simultâneas sobre o parâmetro de controle z para o açúcar invertido.

Com relação aos efeitos das perturbações nos dois parâmetros estudados, td e z, observa-se que a única variável não significativa é a interação entre a temperatura de entrada do produto e vazão de propileno glicol. A variável que apresenta o maior efeito nos parâmetros, td e z, é a vazão de produto, seguida da temperatura de entrada de produto, da vazão de propileno glicol, das interações entre a temperatura de entrada e vazão de produto e por fim, a interação entre vazão de produto e vazão de propileno glicol.

Os efeitos da perturbação na vazão de produto foram negativos em ambos os casos, indicando um decréscimo de td e z ao variar esta perturbação do nível (-1) para o nível (+1). Efeito contrário ocorre na perturbação de temperatura de entrada de produto, sendo o mesmo positivo, provoca um aumento dos valores de td e z ao variar os fatores entre os níveis (-1) e (+1).

Para avaliar a validade do modelo probabilístico ajustado obtiveram-se as relações entre o $F_{\text{calculado}}$ e o F_{tabelado} , além dos coeficientes de regressão para os dois parâmetros.

Estes valores são mostrados na Tabela 33 e indicam que o modelo ajustado não é estatisticamente significativo, pois a relação $F_{\text{calc}}/F_{\text{tab}}$ foi menor do que 4 e o valor de R^2

bem distante de um, para as duas respostas consideradas, td e z, sob perturbações simultâneas nas variáveis de entrada.

Tabela 33 - Valores de F_{calc}/F_{tab} e R^2 obtidos pelo ajuste do modelo probabilístico quadrático para predição das respostas td e z.

	F_{calc}/F_{tab}	R^2
td	0,52	0,635
z	0,52	0,634

Apesar dos modelos estatísticos não serem significativos e preditivos estatisticamente, os mesmos são apresentados nas Equações (53) e (54) para uma estimativa quantitativa aproximada de td e z, respectivamente, válidos nas faixas entre os níveis codificados $(-\alpha)$ e $(+\alpha)$:

$$\begin{aligned} td = & 0,3936 + 0,0611\Delta Tep + 0,0557\Delta Tep^2 - 0,1217\Delta mp - 0,03617\Delta mp^2 - \\ & - 0,00927\Delta Vpp + 0,0442\Delta Vpp^2 - 0,04269\Delta Tep\Delta mp - 0,02921\Delta mp\Delta Vpp \end{aligned} \tag{53}$$

$$\begin{aligned} z = & 3,80 + 0,6071\Delta Tep + 0,5299\Delta Tep^2 - 1,19018\Delta mp - 0,3578\Delta mp^2 - \\ & - 0,06793\Delta Vpp + 0,4162\Delta Vpp^2 - 0,37066\Delta Tep\Delta mp - 0,2356\Delta mp\Delta Vpp \end{aligned} \tag{54}$$

Mesmo as superfícies não sendo preditivas, elas são apresentadas para visualização de uma tendência do comportamento dos parâmetros sob as perturbações, em torno da superfície traçada.

A Figura 48 apresenta as superfícies de resposta dos comportamentos de td [(a), (b) e (c)] e z [(d), (e) e (f)] em função das perturbações simultâneas nas variáveis de entrada para o açúcar invertido.

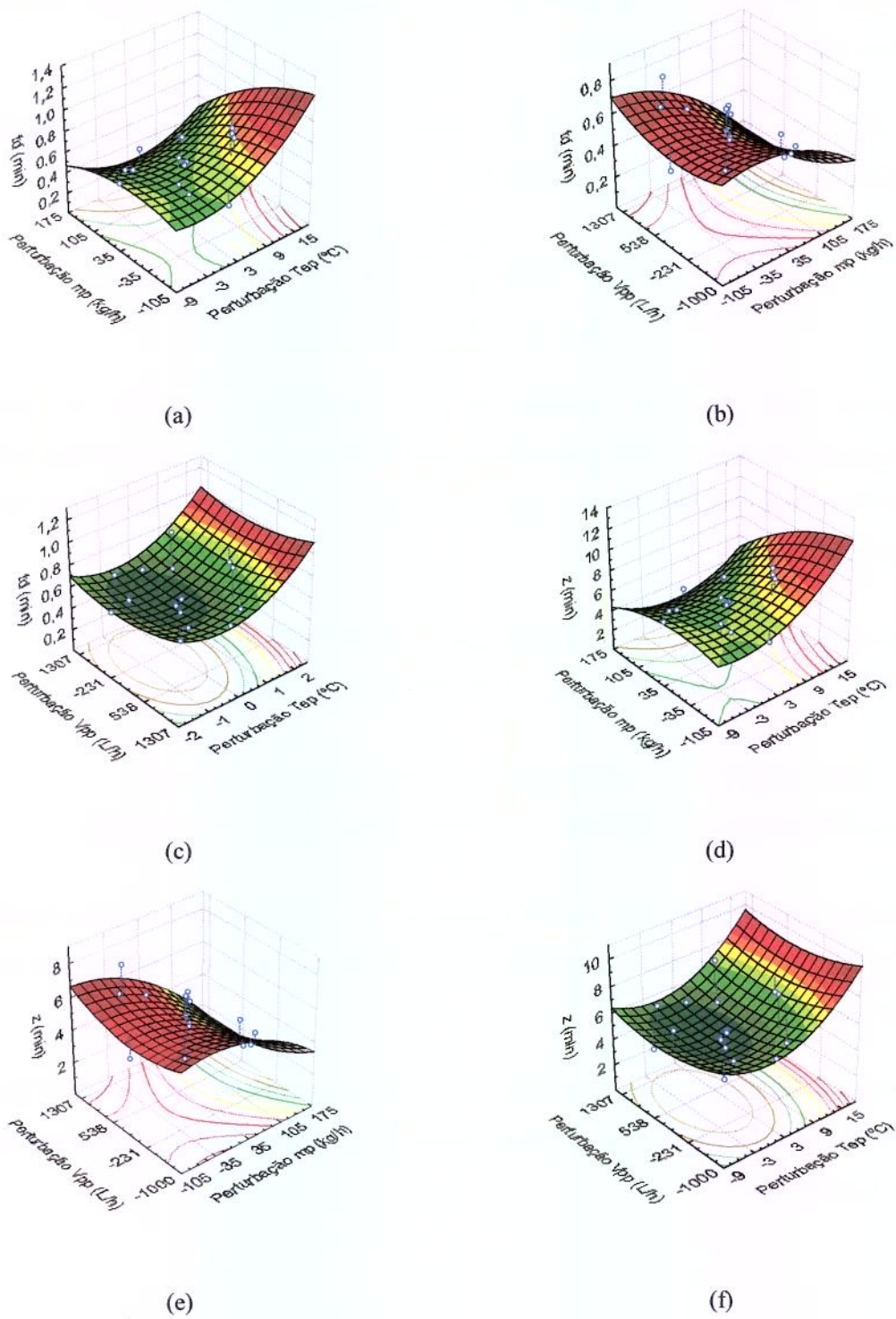


Figura 48 - Superfícies da resposta de td e z em função das seguintes perturbações: (a), (d) temperatura de entrada e vazão do açúcar invertido, (b), (e) vazões de propileno glicol e do açúcar invertido, (c), (f) temperatura de entrada do produto e vazão de propileno glicol.

IV. 5 – ANÁLISES DOS VALORES EXPERIMENTAIS ESTIMADOS PARA O COEFICIENTE GLOBAL DE TROCA TÉRMICA, U_{exp}

Os valores do coeficiente global de transferência de calor experimental foram calculados no primeiro regime permanente, com as variáveis de entrada nas condições iniciais, e no segundo regime permanente, ou seja, nas condições de segunda estabilização do sistema, após a aplicação da perturbação no processo.

Os cálculos foram realizados de acordo com o Item III. 2. 3. 3, baseando-se na taxa de calor do produto, obtido pela Equação (4). Admitiu-se este valor mais confiável em relação à taxa de calor trocada pelo propileno glicol, pois o refrigerante escoava pelo espaço anular e a superfícies desta tubulação, apesar de isoladas termicamente, estavam expostas ao ar que se manteve em torno de 25°C quando na realização dos ensaios.

Os resultados dos coeficientes globais de transferência de calor experimentais obtidos no primeiro e no segundo regime permanente ($U_{1^{o}RP}$ e $U_{2^{o}RP}$) para os ensaios de perturbações individuais são apresentados na Tabela 34 para todos os fluidos: água, soluções de sacarose 8% e 18% e açúcar invertido. Para os ensaios de perturbações simultâneas, os resultados de U_{exp} no primeiro e no segundo regime permanente são apresentados na Tabela 35, para a solução de sacarose 18% e para o açúcar invertido.

No caso dos ensaios realizados sob perturbações individuais, observa-se claramente na Tabela (34), que os menores valores encontrados de U_{exp} são para o açúcar invertido, indicando uma menor eficiência de troca térmica para este produto, o que já foi constatado pelos desvios causados na temperatura de saída do produto em relação a sua condição inicial. Os menores desvios da temperatura de saída de produto (DT_{sp}) foram obtidos com o açúcar invertido (conforme Figuras apresentadas no Apêndice B). Os valores de U_{exp} são bastante próximos para a água e para as soluções de sacarose, explicando a semelhança entre as curvas de reposta transiente para estes três fluidos.

No caso das perturbações simultâneas, observa-se comportamento semelhante, uma vez que o açúcar invertido apresentou valores bem menores para estes coeficientes em relação à solução de sacarose 18%.

Tabela 34 – Resultados de U_{exp} nos ensaios de perturbações individuais.

Ensaio	ÁGUA		SAC 8%		SAC 18%		AÇÚCAR INVERTIDO	
	$U_{1^{o}RP}$	$U_{2^{o}RP}$	$U_{1^{o}RP}$	$U_{2^{o}RP}$	$U_{1^{o}RP}$	$U_{2^{o}RP}$	$U_{1^{o}RP}$	$U_{2^{o}RP}$
E 01	-248.0	-274.4	-254.0	-237.2	-228.7	-208.2	-59.0	-55.1
E 02	-313.1	-307.2	-253.8	-268.0	-227.8	-242.3	-61.0	-62.5
E 03	-292.6	-244.0	-253.9	-219.9	-230.4	-204.5	-53.5	-54.8
E 04	-292.3	-322.9	-251.6	-285.6	-228.6	-252.8	-55.7	-56.6
E 05	-289.3	-264.9	-258.5	-239.6	-228.5	-211.0	-55.6	-54.7
E 06	-285.6	-303.2	-254.0	-266.0	-221.6	-237.9	-53.6	-56.4
E 07	-290.7	-253.7	-253.6	-190.2	-228.6	-195.6	-59.8	-52.3
E 08	-291.2	-320.8	-249.6	-284.7	-215.9	-239.1	-56.4	-60.7
E 09	-293.2	-205.0	-252.2	-202.7	-215.2	-184.4	-55.6	-50.3
E 10	-368.3	-350.7	-258.4	-315.6	-234.8	-206.0	-57.5	-55.4
E 11	-293.7	-228.9	-253.4	-202.0	-216.3	-178.9	-58.6	-58.3
E 12	-293.5	-319.7	-251.9	-272.8	-214.2	-231.0	-53.8	-55.2
E 13	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-52.2	-54.4
E 14	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-56.2	-52.4
E 15	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-54.6	-53.0
E 16	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-46.0	-69.7
E 17	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-56.0	-53.6
E 18	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-56.1	-52.1
E 19	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-58.7	-54.7
E 20	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-60.1	-59.9

Tabela 35 – Resultados de U_{exp} nos ensaios de perturbações simultâneas.

Ensaio	SACAROSE 18%		AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO	
	$U_{1^{o}RP}$	$U_{2^{o}RP}$	$U_{1^{o}RP}$	$U_{2^{o}RP}$
E 01	-230.9	-187.7	-47.1	-50.2
E 02	-225.3	-209.6	-80.5	-55.6
E 03	-221.0	-261.1	-45.7	-52.7
E 04	-234.0	-312.6	-80.3	-54.8
E 05	-221.8	-211.0	-43.7	-50.4
E 06	-230.9	-248.9	-79.0	-54.8
E 07	-217.5	-324.3	-42.0	-52.2
E 08	-222.6	-385.2	-79.5	-56.3
E 09	-223.9	-304.1	-86.2	-51.2
E 10	-221.5	-228.3	-37.7	-47.6
E 11	-218.7	-366.2	-67.5	-58.6
E 12	-221.3	-196.8	-64.6	-995.1
E 13	-224.3	-291.3	-67.7	-63.2
E 14	-228.6	-222.7	-62.9	-60.4
E 15	-223.6	-270.8	-67.4	-61.7
E 16	-221.8	-271.0	-65.9	-60.6
E 17	-222.5	-268.8	-66.9	-61.7

IV. 6 – COMPARAÇÃO ENTRE OS RESULTADOS OBTIDOS PELO FATOR DE SENSIBILIDADE, CURVAS DE RESPOSTA TRANSIENTE E PLANEJAMENTO EXPERIMENTAL.

Com a finalidade de sintetizar as análises dos resultados obtidos pelos métodos de avaliação, constatou-se o grau de importância das perturbações das variáveis de entrada na temperatura de saída dos produtos.

Na Tabela 36 são apresentadas de forma resumida as ordens de importância das perturbações encontradas pelos métodos de análise: curvas de resposta transiente, fator de sensibilidade e Planejamento Experimental.

Tabela 36 - Ordem de importância das perturbações individuais e simultâneas das variáveis de entrada e interações sobre a temperatura de saída dos produtos, obtidos pelos diferentes métodos de análise dos resultados.

ÁGUA		SAC 8%		SAC 18%			AÇÚCAR INVERTIDO		
FS	Curvas Resposta	FS	Curvas Resposta	FS	Curvas Resposta	Pareto	FS	Curvas Resposta	Pareto
Tep mp Vpp	Tep mp Vpp	Tep mp Vpp	Tep mp Vpp	Tep mp Vpp	Tep mp Vpp	Tep (L) mp (L) mp (Q) Vpp (L) Tep x mp Vpp (Q) Tep x Vpp mp x Vpp Tep (Q)	Tep mp Vpp	Tep mp Vpp	Tep (L) mp (L) mp (Q) Tep x mp Tep (Q) Vpp (Q) Vpp (L) mp x Vpp Tep x Vpp

Através da análise da Tabela 36, observa-se que a ordem de influência nas perturbações individuais das variáveis é a mesma, para a água, as soluções de sacarose e o açúcar invertido. A perturbação na temperatura de entrada do produto tem o maior efeito na temperatura de saída, seguido da vazão de produto e da vazão de propileno glicol.

Uma vez que a perturbação na Tep foi constatada a de maior influência na temperatura de saída dos diferentes produtos, quer seja em perturbações simultâneas ou individuais, conclui-se que esta variável deve ser assistida em qualquer tipo de controle, significando a necessidade de uma estratégia *feedforward*.

Na análise obtida pelo planejamento experimental realizado para a solução de sacarose a 18% e para o açúcar invertido, constatou-se os mesmos efeitos das perturbações individuais pelos três métodos de análise. Para o caso do açúcar invertido, é interessante notar que a perturbação na vazão de propileno glicol apresentou valores de fator de sensibilidade bem baixos e este fato foi comprovado pelo Gráfico de Pareto.

Vale ressaltar que o FS demonstra a importância das perturbações em relação à amplitude das mesmas, apresentando na grande maioria dos casos estudados, valores maiores para amplitudes de perturbações maiores.

O Planejamento Experimental tem como maior vantagem apresentar o efeito de interação entre as perturbações das variáveis de entrada, o que não pode ser obtido pelos outros métodos de análise, além de possibilitar a avaliação de perturbações simultâneas, até então não sugerida na literatura para os estudos de controle de processos.

V – CONCLUSÕES

O presente trabalho proporcionou um conhecimento profundo sobre as respostas transientes da temperatura de saída de fluidos alimentícios newtonianos, durante o processo de resfriamento em trocador de calor de tubo duplo, fornecendo um banco de dados imprescindível para aplicação de metodologias de controladores convencionais ou não deste sistema.

As curvas de resposta transiente do processo, representadas pelo comportamento da temperatura de saída dos produtos após perturbações das variáveis de entrada, apresentaram diferenças significativas quanto à amplitude de perturbações impostas ao sistema, bem como quanto aos diferentes fluidos testados.

Os três métodos de análise dos resultados mostraram que a perturbação na temperatura de entrada do produto causa o maior desvio na temperatura de saída, seguido da perturbação na vazão de produto e na vazão de propileno glicol. Sendo assim, conclui-se sobre a necessidade de se ter um controle *feedforward* neste processo.

Para o açúcar invertido, constatou-se efeito praticamente nulo na temperatura de saída ao se perturbar a vazão de propileno glicol na entrada do trocador de calor.

O Fator de Sensibilidade mostrou que as perturbações em maiores amplitudes causam efeitos maiores na temperatura de saída dos produtos e que as alterações na temperatura de saída não são simétricas mediante as perturbações positivas e negativas de mesma amplitude. Este fato pode dificultar a aplicação de metodologia de sintonia de controladores.

Através da análise direta e visual dos gráficos adimensionais, que representaram o comportamento transiente dos produtos após as perturbações positivas e negativas, constatou-se que o comportamento da temperatura de saída é simétrico para os seguintes casos: i) água: perturbações (-) e (+) na vazão de propileno glicol; ii) solução de sacarose 8%: perturbações (-) e (+) na vazão de produto e perturbações (+) e (++) da temperatura de

entrada do produto; iii) solução de sacarose 18%: perturbações (-) e (+) da temperatura de entrada do produto e perturbações (+) e (++) da vazão de propileno glicol; iv) açúcar invertido: perturbações (-) e (+) da temperatura de entrada do produto e da vazão de propileno glicol. Com relação às diferentes condições iniciais estudadas para o açúcar invertido, constatou-se simetria entre perturbações (+) e (++) da vazão de produto a partir de duas condições diferentes de primeiro regime permanente.

Os planejamentos fatoriais compostos centrais, realizados para a solução de sacarose 18% e para o açúcar invertido, permitiram a obtenção do grau de influência das perturbações, bem como os efeitos de interação, sobre a temperatura de saída dos produtos e sobre os parâmetros gráficos para aplicação em controle (td e z). Além disso, constatou-se que cada combinação de perturbação gera um comportamento diferente da temperatura de saída dos produtos, o que demonstra a necessidade de controles não convencionais para este processo. A obtenção das superfícies de resposta facilita a visualização das tendências da temperatura de saída sob as múltiplas perturbações realizadas nas variáveis de entrada.

Este trabalho é totalmente focado ao levantamento de subsídios para aplicação de metodologias de sintonias de controladores, sendo as curvas de resposta transiente obtidas sob as perturbações realizadas, individuais e simultâneas, de fundamental importância para obtenção dos parâmetros controladores, quer seja S.I.S.O. ou M.I.M.O.

Conclui-se que as sintonias dos controles deverão ser distintas para cada variável manipulável a ser controlada, devido às diferenças provocadas na temperatura de saída dos produtos, bem como as não linearidades do processo. Devido a complexidade destas variações, sugere-se implementação de controles sofisticados neste sistema de trocador de calor de tubo duplo testado.

VI – SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

A partir dos resultados obtidos neste trabalho, propõe-se como sugestões para futuros trabalhos:

- Implementação de sintonia de controladores não convencionais no sistema de trocador de tubo duplo estudado, utilizando a base de conhecimento das curvas de resposta transiente obtidas neste estudo;
- Realização de experimentos nos quais se aplicariam perturbações na temperatura de entrada de propileno glicol para análise da sua influência na temperatura de saída dos produtos;
- Análise da eficiência térmica deste trocador de tubo duplo, a partir de determinação de coeficientes globais de transmissão de calor em regime transiente e estimativa dos números adimensionais e dos coeficientes convectivos;
- Implementação de um controle robusto e eficaz na linha de refrigerante, para manutenção adequada da temperatura de entrada de propileno glicol no trocador e análise das curvas de resposta inversa obtidas;
- Realização de experimentos com fluidos não-newtonianos e análise do comportamento reológico sob perturbações;
- Realização de experimentos para o processo de aquecimento de fluidos newtonianos e não-newtonianos;
- Realização de experimentos de perturbações com diferentes condições iniciais de processo;
- Estudo mais preciso das tendências dos parâmetros gráficos, t_d e z , para sintonia de controladores, em fluidos newtonianos e não-newtonianos;

- Verificação da influência reológica dos produtos na sintonia de controladores.

VII – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELMESSIH, A. N. e BELL, K. J. Effect of mixed convection and u-bends on the design of double-pipe heat exchangers. **Heat Transfer Engineering**, v.20, n.3, p.25-36, 1999.

AÇÚCAR-GUARANI **Açúcar líquido invertido invex.** Disponível em: <<http://www.acucarguarani.com.br>>. Acesso em: jan/2002.

BARNES, H. A.; HUTTON, J. F. e WALTERS, K. **An introduction to rheology: Rheology series.** Netherlands: Elsevier Science, 1989. v.3, 199p.

BATES, F. J. e ASSOCIATES **Polarimetry, saccharimetry and the sugars:** U. S. Department of commerce, national bureau of standards. Circular of the nbs c440. Washington: U.S. Great Printing Office, 1942. 810p.

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, SP, 2000. 110p. Dissertação de mestrado Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp.

BIRD, R. B.; STEWART, W. E. e LIGHTFOOT, E. N. **Transport phenomena.** New York, USA: Wiley, 1960.

BOBBIO, F. O. e BOBBIO, P. A. **Introdução à química de alimentos.** 2º.ed. São Paulo: Livraria Varela Ltda., 1992. 223p.

BRUNS, R. E.; BARROS NETO, B. e SCARMINIO, I. S. **Planejamento e otimização de experimentos.** 2º.ed. Campinas: Editora da Universidade Estadual de Campinas, 1995. 299p.

- CEPEDA, E. e VILLARÀN, M. C. Density and viscosity of *malus floribunda* juice as a function of concentration and temperature. **Journal of Food Engineering**, v.41, p.103-107, 1999.
- CHOI, Y. e OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. **Food engineering and process application**. Canada: Elsevier Applied Science Publisher, 1986. v. I, p.93-101.
- COHEN, W. C. e JOHNSON, E. F. Dynamic characteristic of double pipe heat exchangers. **Industrial and Engineering Chemistry**, v.48, n.6, p.1031-1034, 1956.
- COUGHANOWR, D. R. e KOPPEL, L. B. **Análise e controle de processos**. Tradução de Carlos Augusto Perlingeiro e Evaristo Chalbaud Biscaia Jr. Rio de Janeiro: Guanabara, 1978. 474p.
- DAS, S. K. e DAN, T. K. Transient response of a parallel flow shell and tube heat exchanger and its control. **Heat and Mass Transfer**, v.31, n.4, p.231-235, 1996.
- ELGENK, M. S. e HUANG, L. M. An experimental investigation of the transient response of a water heat pipe. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.36, n.15, p.3823-3830, 1993.
- HANSSON, A.; ANDERSSON, J. e LEUFVÉN, A. The effects os sugar and pectin on flavour release from a soft drink-related model system. **Food Chemistry**, v.72, p.363-368, 2001.
- HELDMAN, D. R. e LUND, D. B. **Handbook of food engineering**. Marcel Dekker Inc., 1992.
- HEWITT, G. F.; SHIRES, G. L. e BOTT, T. R. Double-pipe heat exchangers. **Process heat transfer**. Boca Raton, New York: CRC Press LLC, 1994. p.233-236.
- HOLDSWORTH, S. D. Applicability of rheological models to the interpretation of flow and processing behaviour of fluid food products. **Journal of Texture Studies**, v.2, p.393-418, 1971.

- INCROPERA, F. P. e DEWITT, D. P. Internal flow. **Introduction to heat transfer**. New York: 1985. p.333-365.
- JUNK, W. R. e PANCOAST, H. M. **Handbook of sugars for processors, chemists and technologists**. Westport, Connecticut: The AVI Publishing Company, Inc., 1973. 327p.
- KERN, D. Q. **Processos de transmissão de calor**. Tradução de Adir M. Luiz. Rio de Janeiro: Editora Guanabara, 1987. 671p.
- KRIEGER, I. M. e ELROD, H. Direct determination of the flow curves of non-newtonian fluids ii. Shearing rate in the concentric cylinder viscosimeter. **Journal of Applied Physics**, v.24, n.2, p.134-136, 1953.
- LACHI, M.; WAKIL, N. e PADET, J. The time constant of double pipe and one pass shell-and-tube heat exchangers in the case of varyin fluid flow rates. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v.40, n.9, p.2067-2079, 1997.
- NETO, F. S. e COTTA, R. M. Dynamic analysis of double pipe heat exchangers subjected to periodic inlet temperature disturbances. **Warne Stoffubertrag**, v.28, n.8, p.497-503, 1993.
- OGATA, K. **Modern control engineering**. Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1990. 963p.
- OZISIK, M. N. Convecção forçada no escoamento no interior de dutos. In: **Heat Transfer. Transferência de calor**. Trad. de Luiz de Oliveira. Rio de Janeiro: 1990. p.239.
- PRASAD, R. C. Analytical solution for a double pipe heat exchanger with non-adiabatic condition at the outer surface. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.14, p.665-672, 1987.
- PRENTICE, J. H. **Measurements in the rheology of foodstuffs**. Great Britain: Elsevier Applied Science Publishers, 1984. 191p.
- RAO, M. A. Rheology of liquid foods. **Journal of Texture Studies**, v.8, p.135-168, 1977.

- RAO, M. A. e RIZVI, S. S. H. **Engineering properties of foods**. New York: Marcel Dekker Inc., 1986.
- RENE, F.; LEULIET, J. C. e LALANDE, M. Heat transfer to newtonian and non-newtonian food fluids in plate heat exchangers. Experimental and numerical approaches. **Transactions of Industrial Chemical Engineering**, v.69, p.115-126, 1991.
- SARAVACOS, G. D. e KOSTAROPOULOS, A. E. Transport properties in processing of fruits and vegetables. **Food Technology**, v.49, p.99-105, 1995.
- SHAH, R. K. Classification of heat exchangers. **Heat exchangers - thermal hydraulics, fundamentals and design**. Hemisphere, New York: 1981. p.9.
- SHARIFI, F.; NARANDJI, G. e MEHRAVARAN, K. Dynamic simulation of plate heat exchangers. **International Communication in heat and mass transfer**, v.22, n.2, p.213-225, 1995.
- SINGH, R. P. e HELDMAN, D. R. **Introduction to food engineering**. Academic Press Inc., 1993. 499p.
- SISSOM, L. E. e PITTS, D. R. **Fenômenos de transporte**. Tradução de Adir M. Luiz. 3º.ed. Rio de Janeiro: Guanabara, 1979.
- Apostila da Smar Equipamentos Industriais Ltda. Como implementar projetos com foundation fieldbus. 1998.
- STEPHANOPOULOS, G. **Chemical process control: An introduction to theory and practice**. New Jersey, USA: Prentice-Hall, Inc., 1984.
- TELIS-ROMERO, J., TELIS, V. R. N., YAMASHITA, F., GABAS, A. L. Thermophysical properties of brazilian orange juice as affected by temperature and water content. **Journal of Food Engineering**, v.38, p.27-40, 1998.
- VITALI, A. A.; RAO, M. A. e COOLEY, H. J. Flow properties of concentrated juices at low temperatures. **Food Technology**, v.38, n.3, p.113-119, 1984.

WANG, C. C. e LIAO, N. S. Transient response of a double-pipe condenser to change of coolant flowrate. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v.16, p.325-334, 1989.

APÊNDICE A

A. 1 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DAS TEMPERATURAS DE SAÍDA DAS SOLUÇÕES DE SACAROSE 8% E 18% E DO AÇÚCAR LÍQUIDO INVERTIDO SOB AS PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS NAS VARIÁVEIS DE ENTRADA.

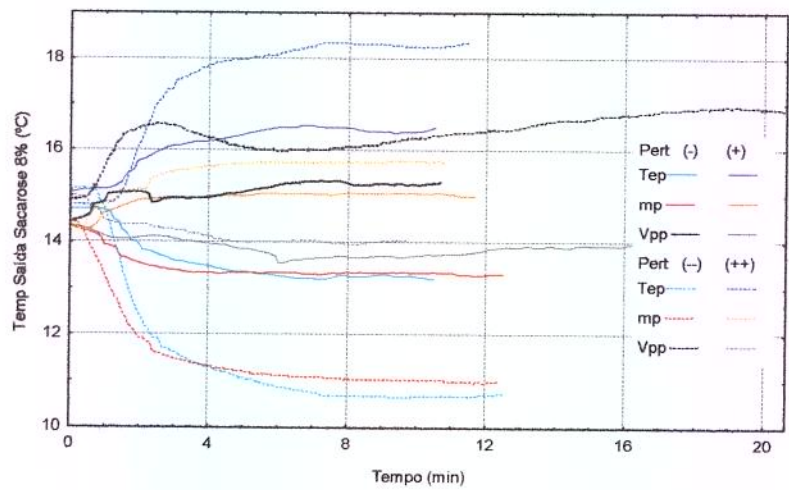


Figura A. 1. 1 - - Curvas de resposta experimental da temperatura de saída da solução de sacarose 8%, sob perturbações individuais nas variáveis de entrada

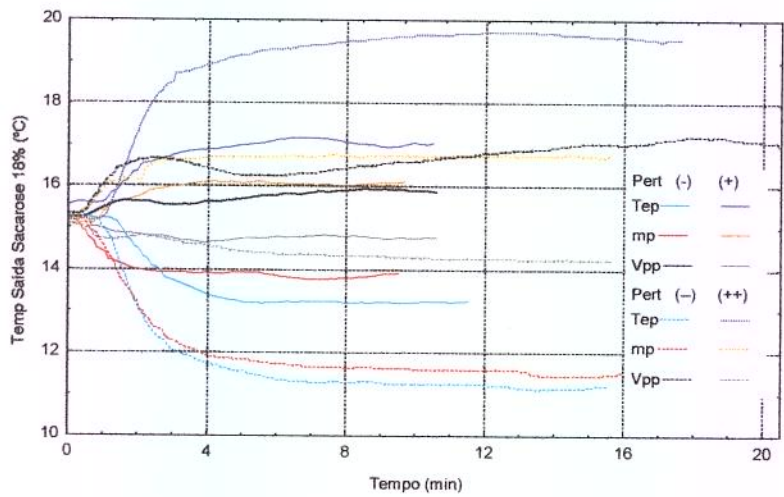


Figura A. 1. 1 - Curvas de resposta experimental da temperatura de saída da solução de sacarose 18%, sob perturbações individuais nas variáveis de entrada.

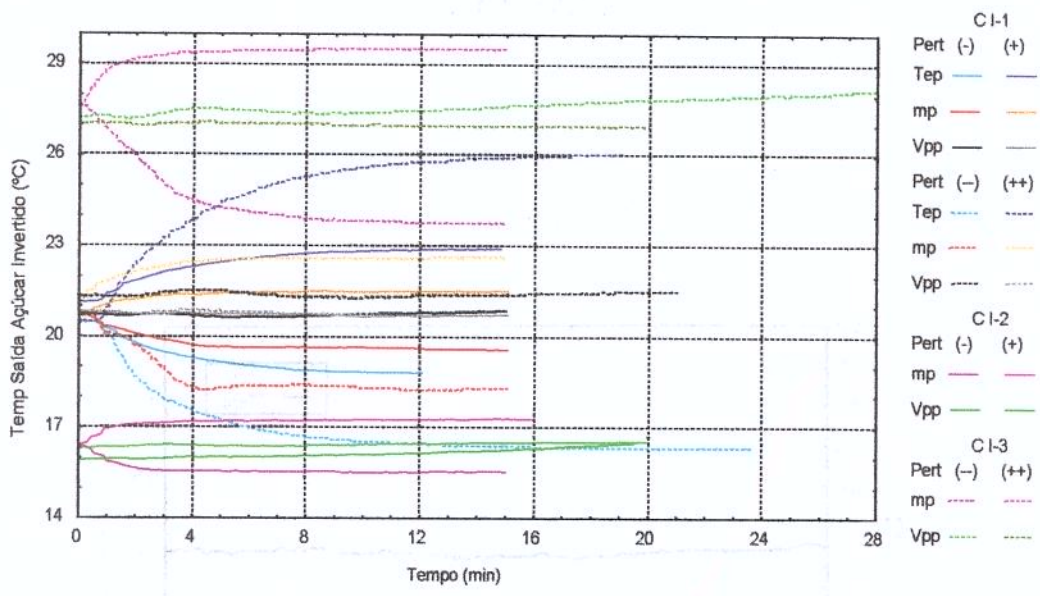
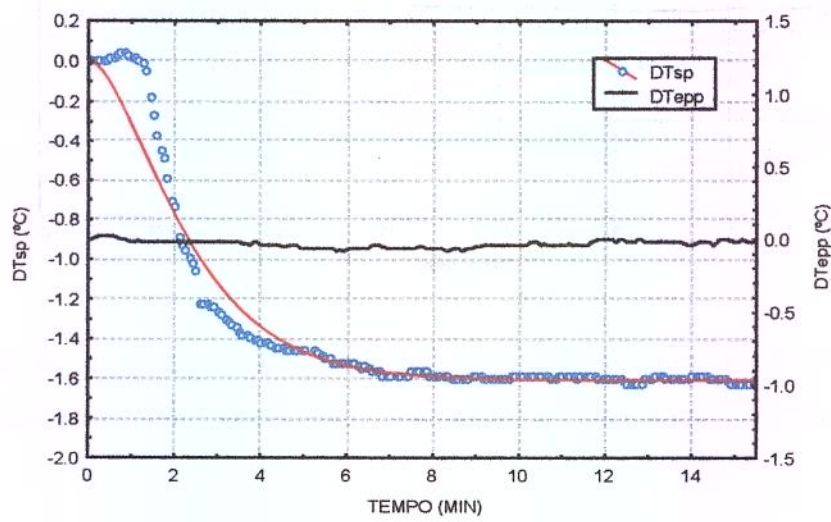


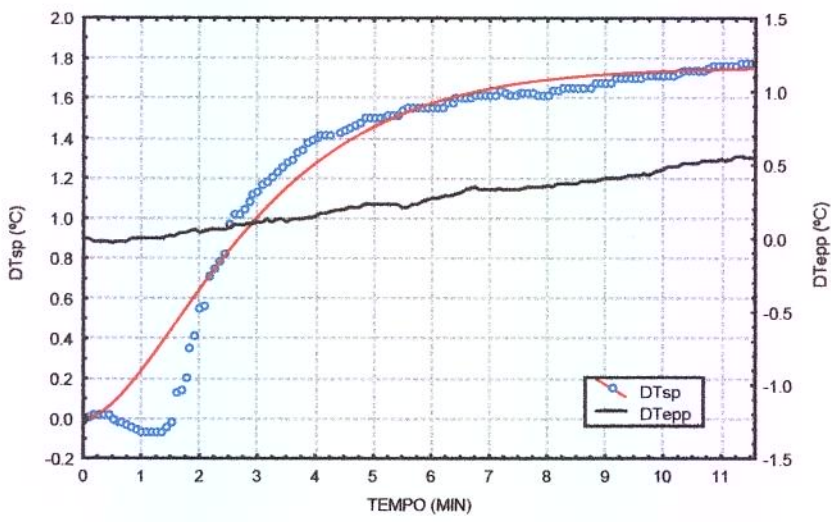
Figura A. 1. 2 - Curvas de resposta experimental da temperatura de saída do açúcar invertido, obtidas após as perturbações individuais nas variáveis de entrada.

APÊNDICE B

B. 1 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DA ÁGUA.

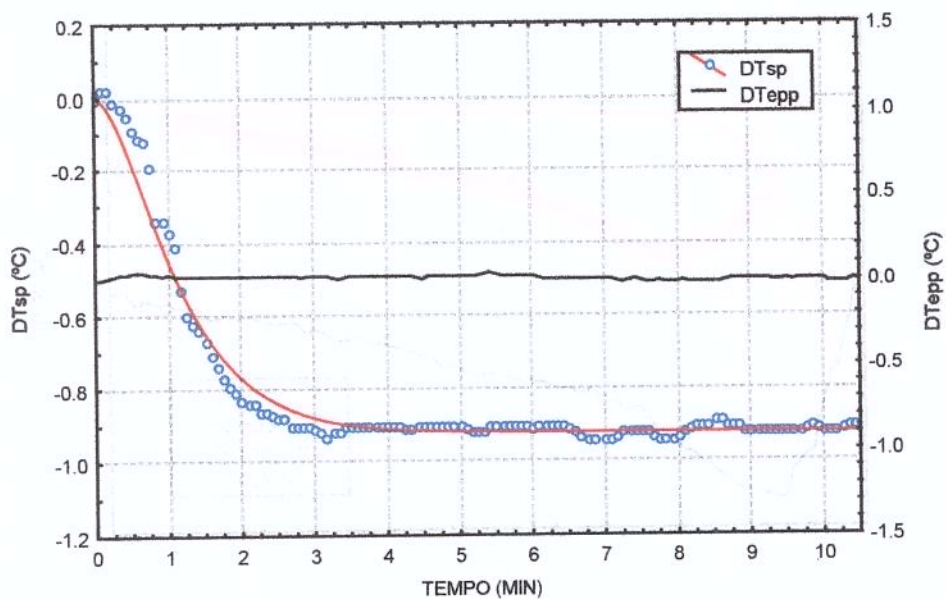


(a)

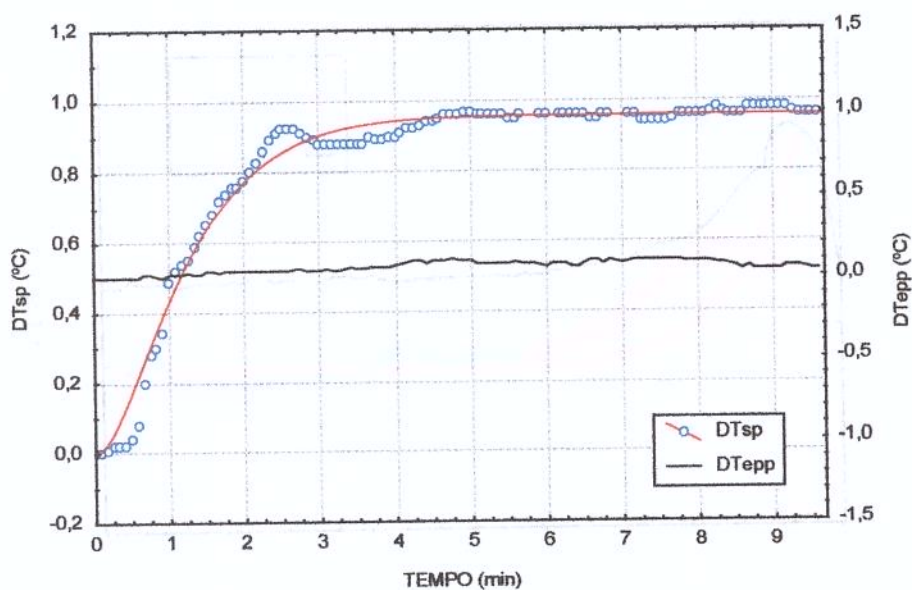


(b)

Figura B. 1. 1 - Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada da água: (a) E01 - perturbação $\Delta T_{ep} = -4^{\circ}\text{C}$; (b) E02 - perturbação $\Delta T_{ep} = +4^{\circ}\text{C}$.

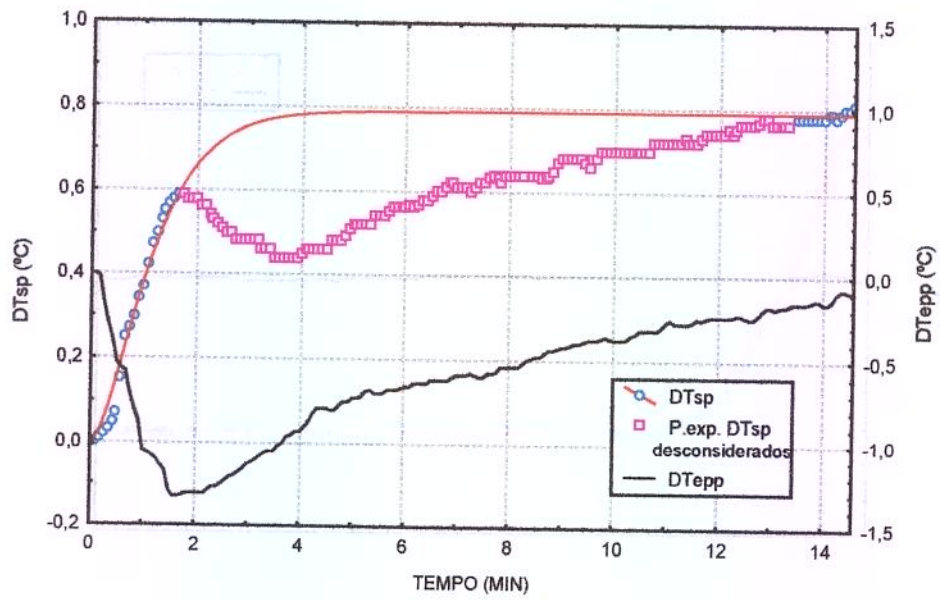


(a)

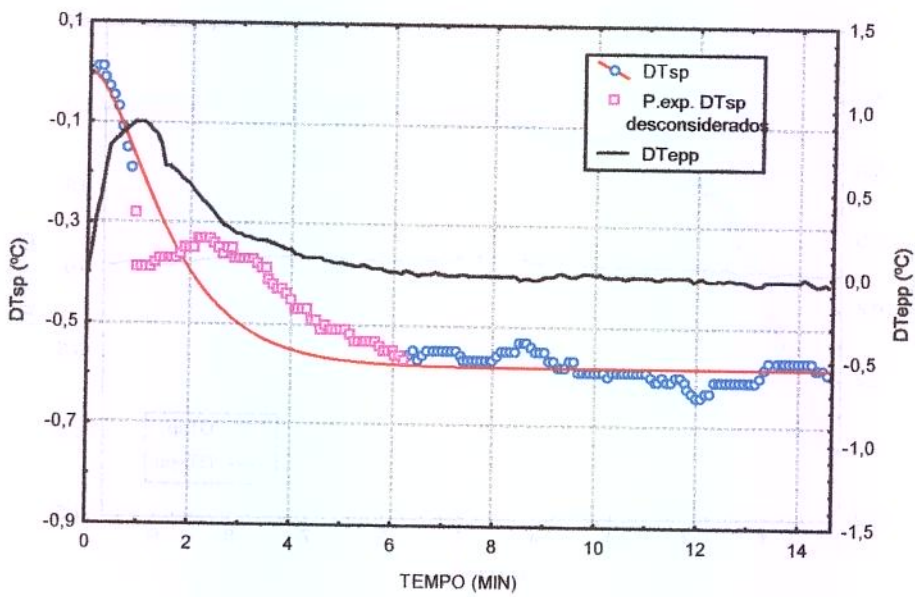


(b)

Figura B. 1. 1 – Ensaios de perturbações individuais de vazão da água: (a) E03 - perturbação $\Delta mp = -50$ kg/h; (b) E04 - perturbação $\Delta mp = +50$ kg/h.

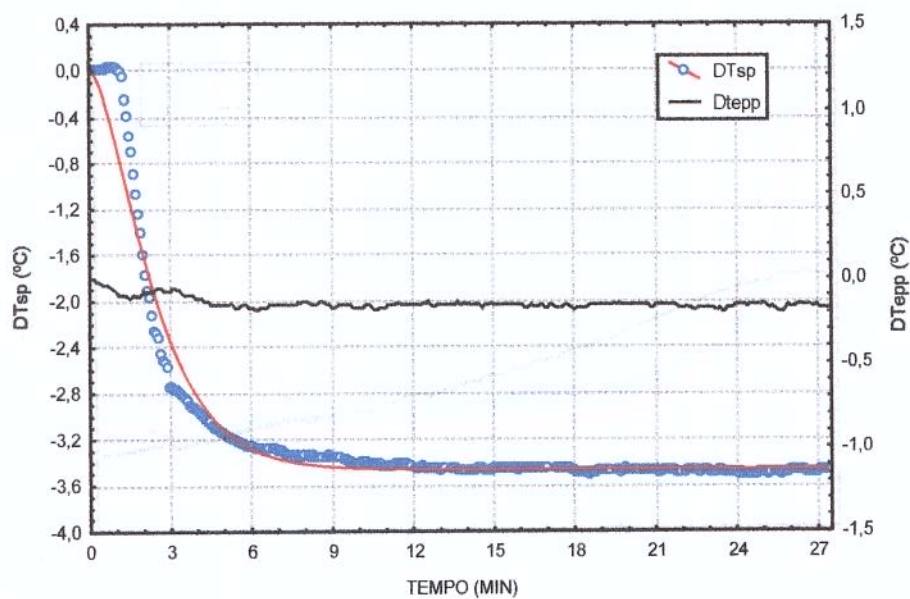


(a)

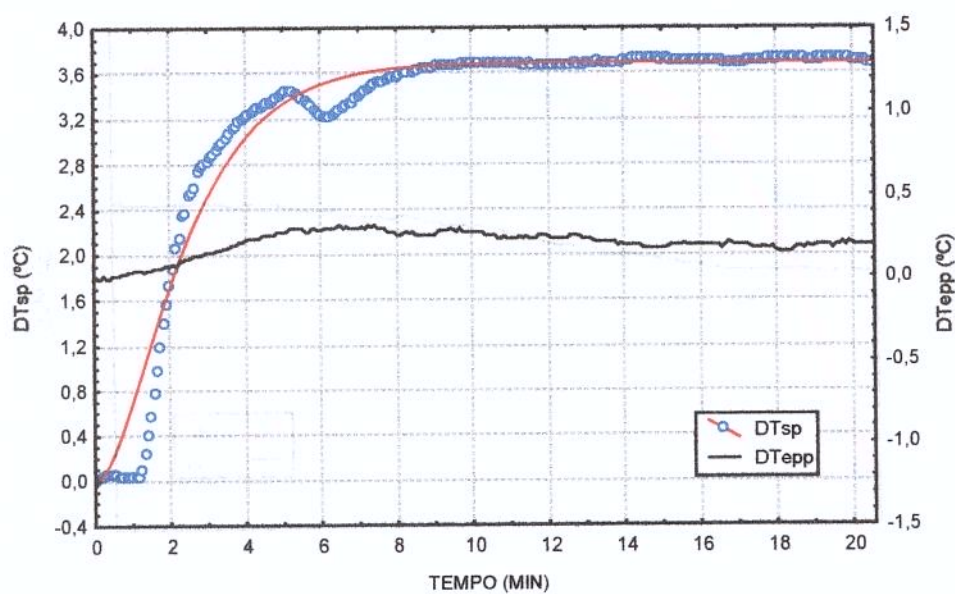


(b)

Figura B. 1. 2 – Ensaio da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol:
(a) E05 - perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h; (b) E06 - perturbação $\Delta V_{pp}=+467$ L/h.

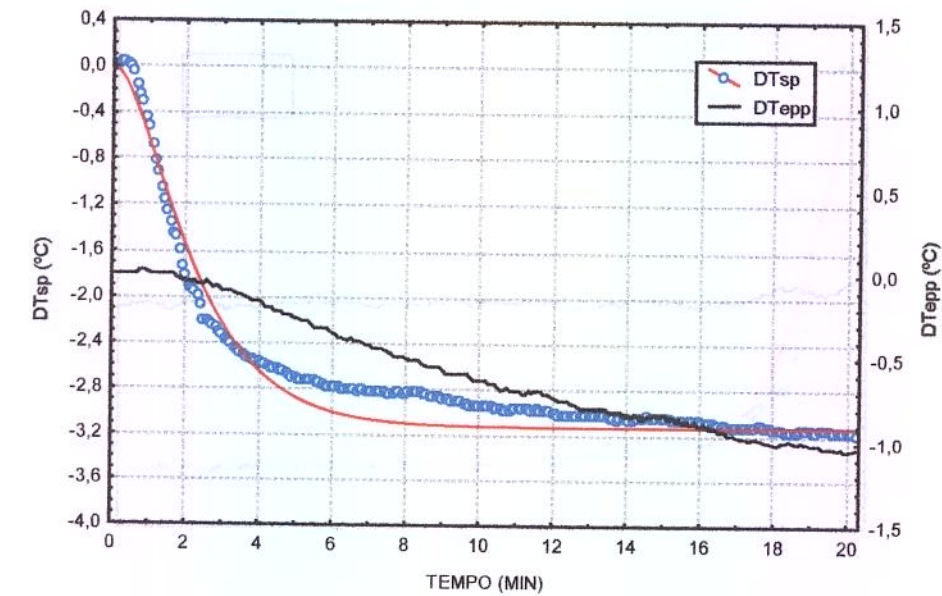


(a)

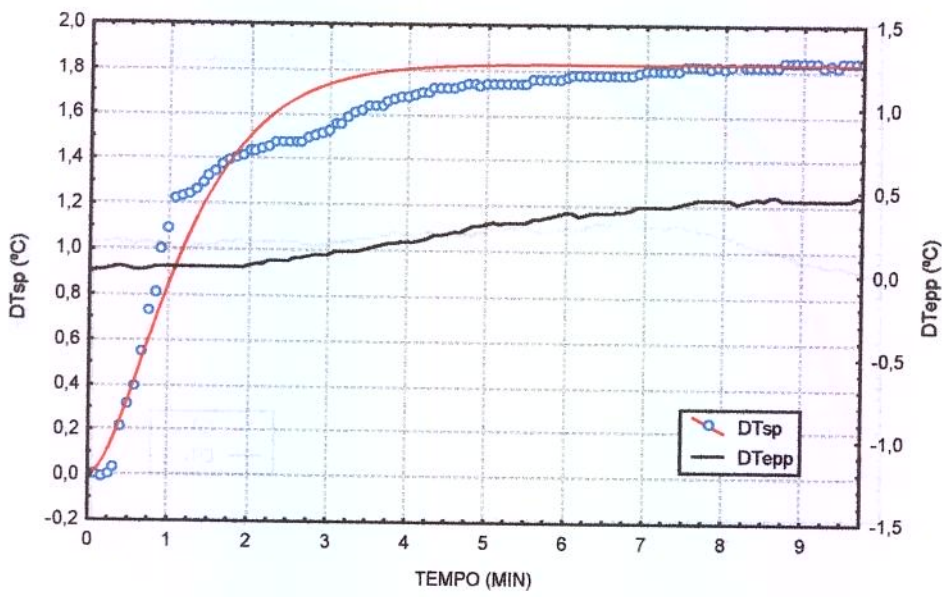


(b)

Figura B. 1. 3 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada da água: (a) E07 - perturbação $\Delta T_{ep} = -8^\circ\text{C}$; (b) E08 - perturbação $\Delta T_{ep} = +8^\circ\text{C}$.

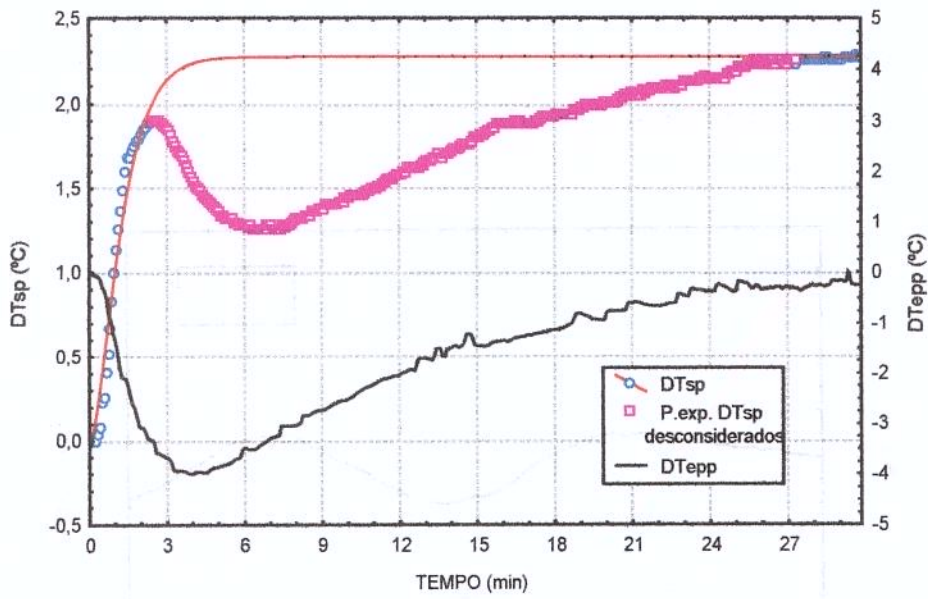


(a)

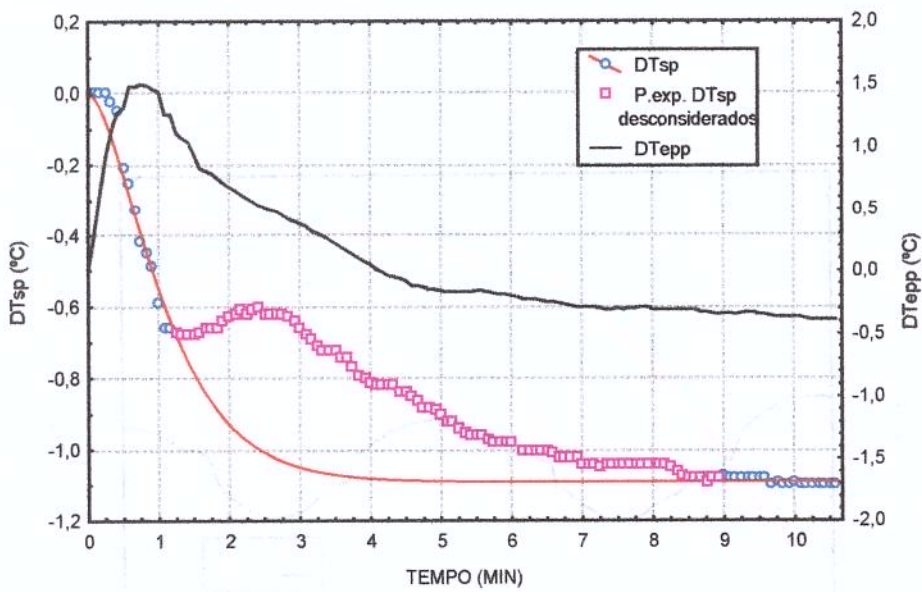


(b)

Figura B. 1. 4 – Ensaio de perturbações individuais de vazão da água: (a) E09 - perturbação $\Delta m_p = -100$ kg/h; (b) E10 - perturbação $\Delta m_p = +100$ kg/h.



(a)



(b)

Figura B. 1.5 – Ensaio da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol:
 (a) E11 - perturbação $\Delta V_{pp} = -934$ L/h; (b) E12 - perturbação $\Delta V_{pp} = +934$ L/h.

B. 2 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM DAS PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DA SOLUÇÃO DE SACAROSE 8%.

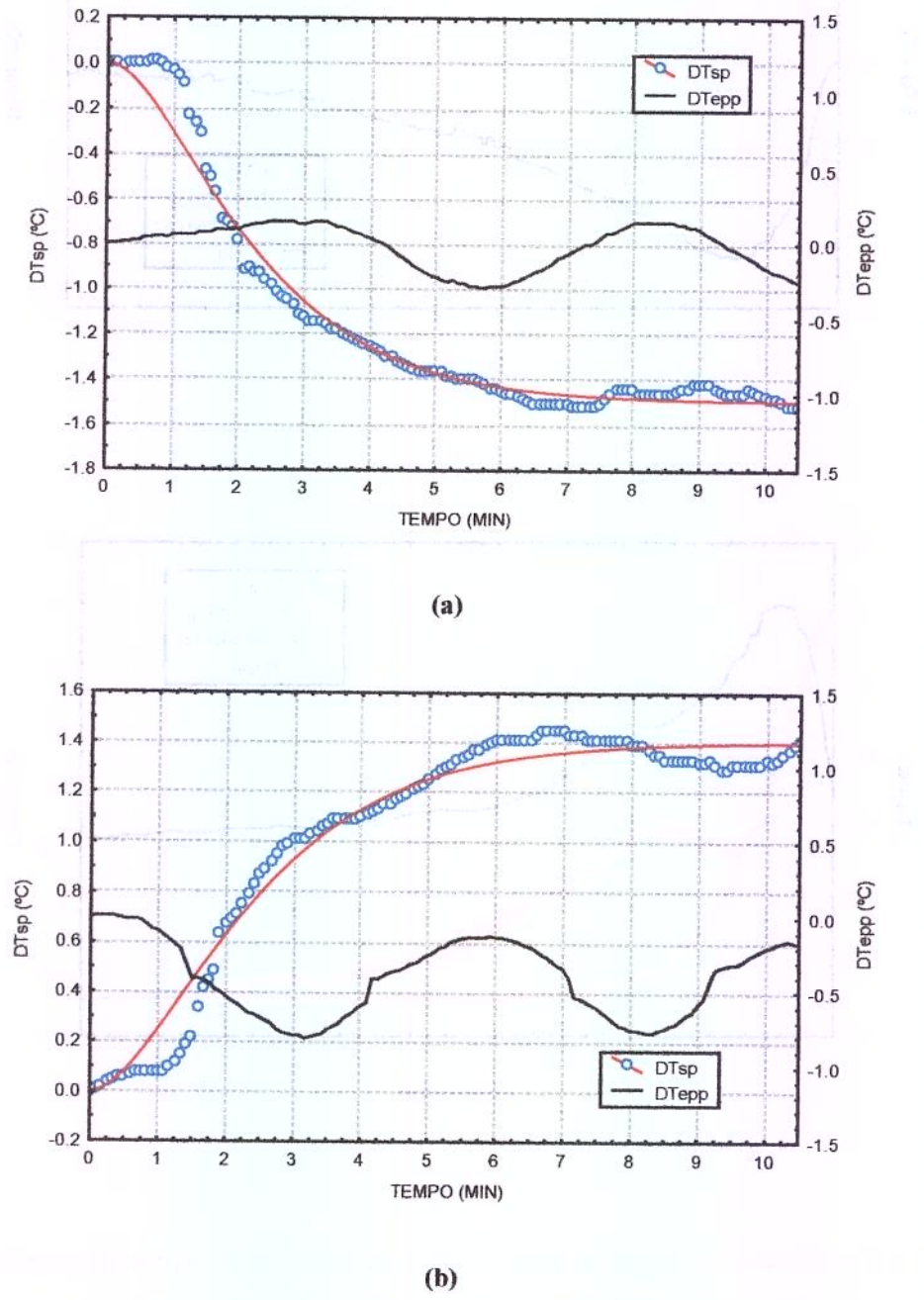
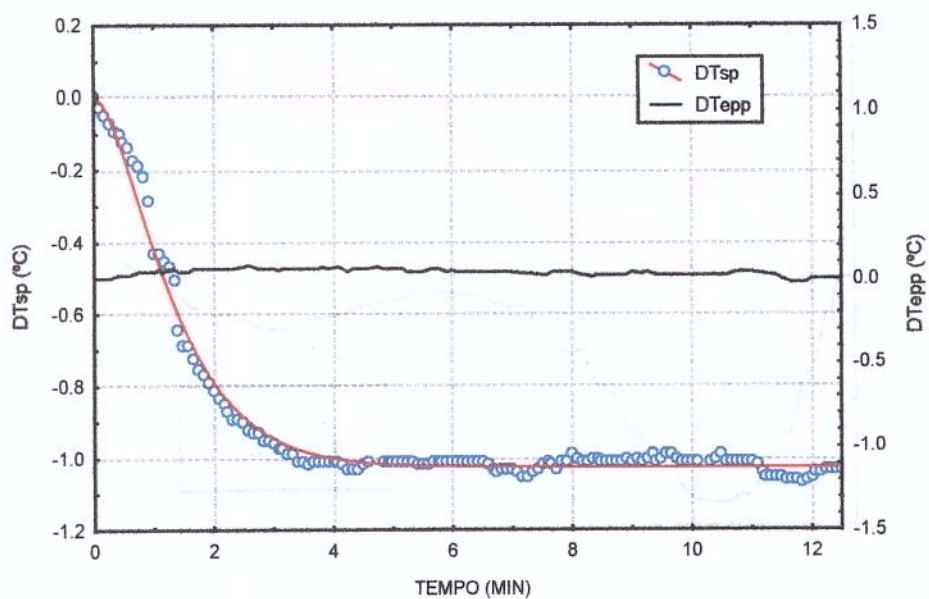
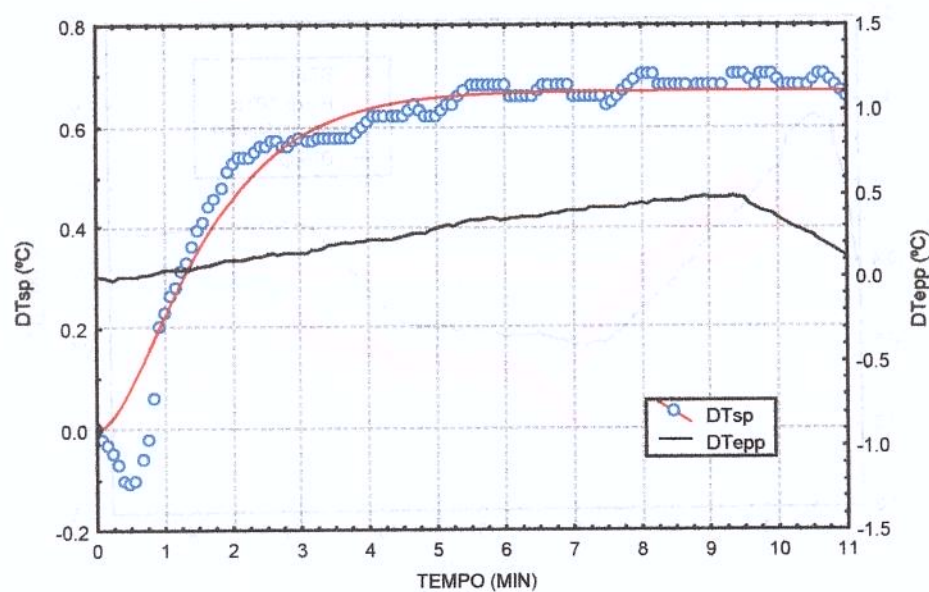


Figura B. 2. 1 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada a solução de sacarose 8%: (a) E01 – perturbação $\Delta T_{ep} = -4^{\circ}\text{C}$; (b); E02 - perturbação $\Delta T_{ep} = +4^{\circ}\text{C}$.

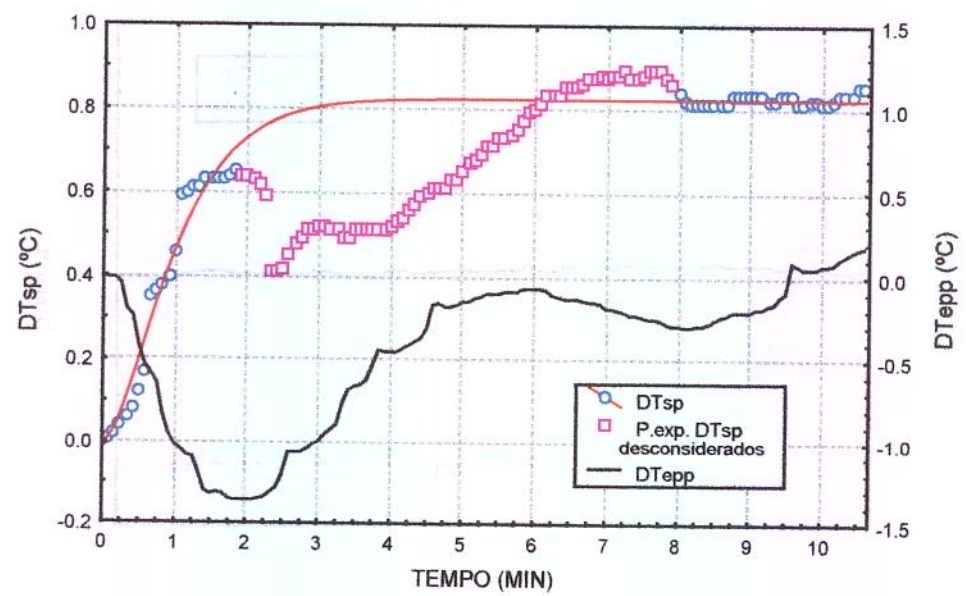


(a)

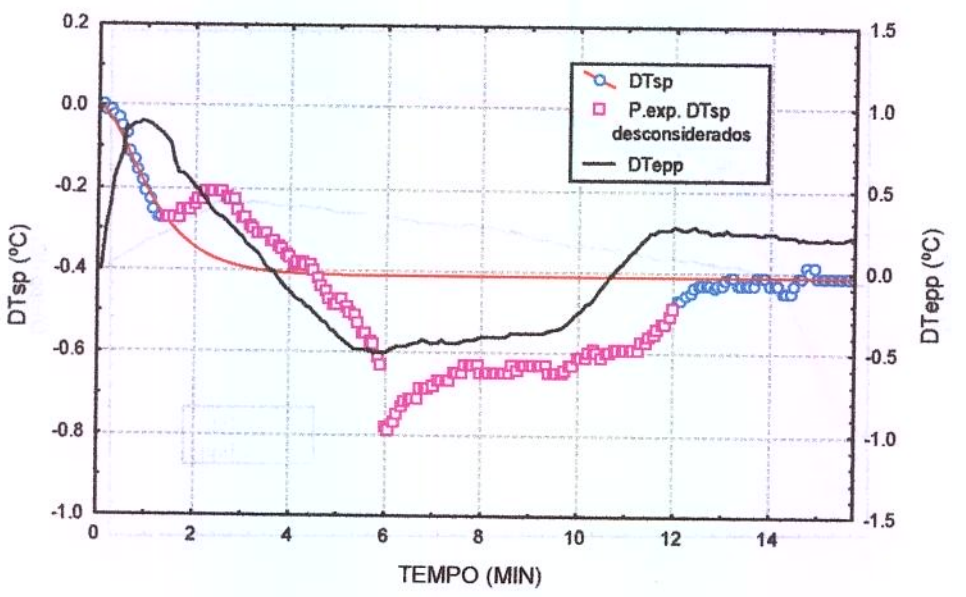


(b)

Figura B. 2. 2 – Ensaio de perturbações individuais de vazão solução de sacarose 8%: (a) E03 – perturbação $\Delta mp = -50$ kg/h; (b) E04 – perturbação $\Delta mp = +50$ kg/h.

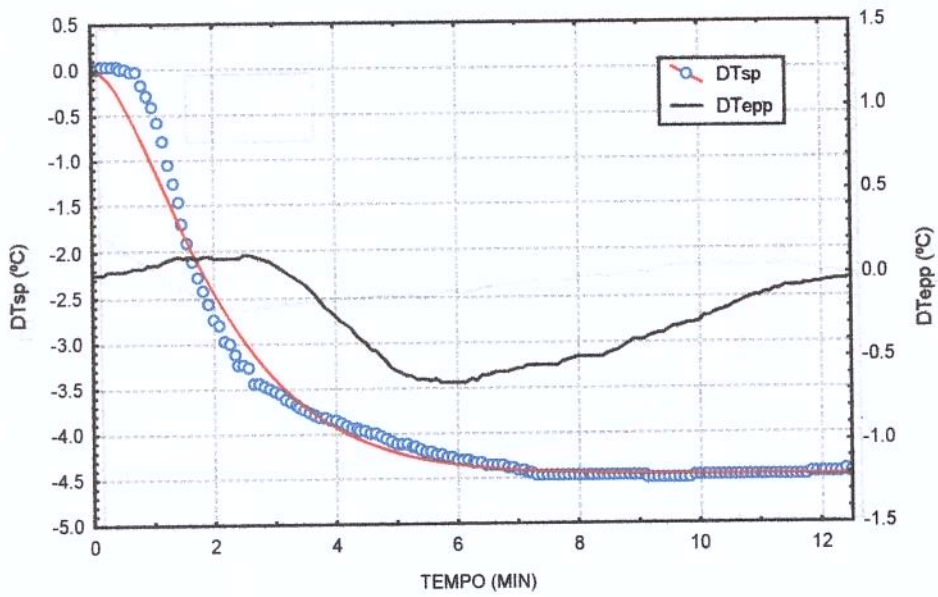


(a)

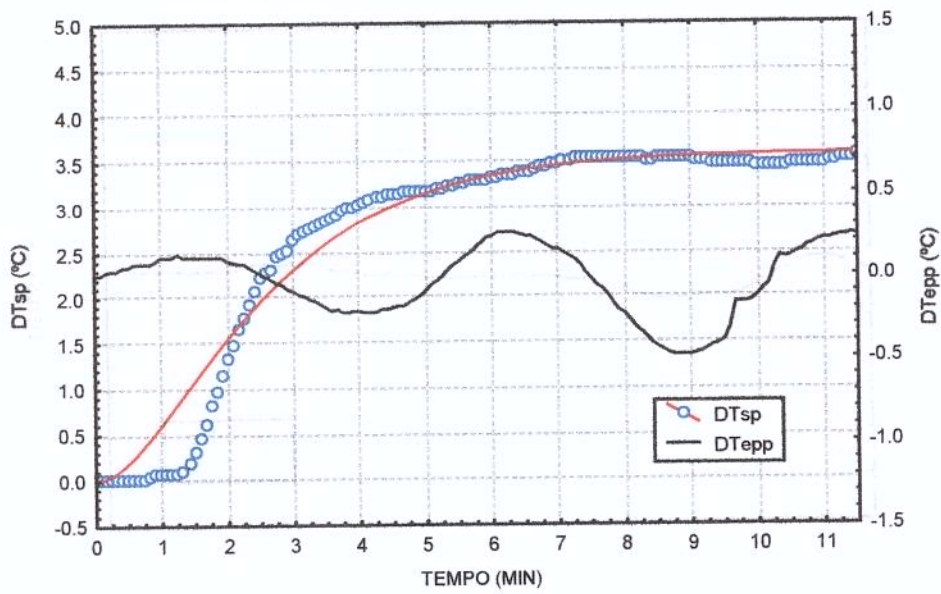


(b)

Figura B. 2. 3 – Ensaio de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 8%: (a) E05 – perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h; (b) E06 - perturbação $\Delta m_p= +467$ L/h.

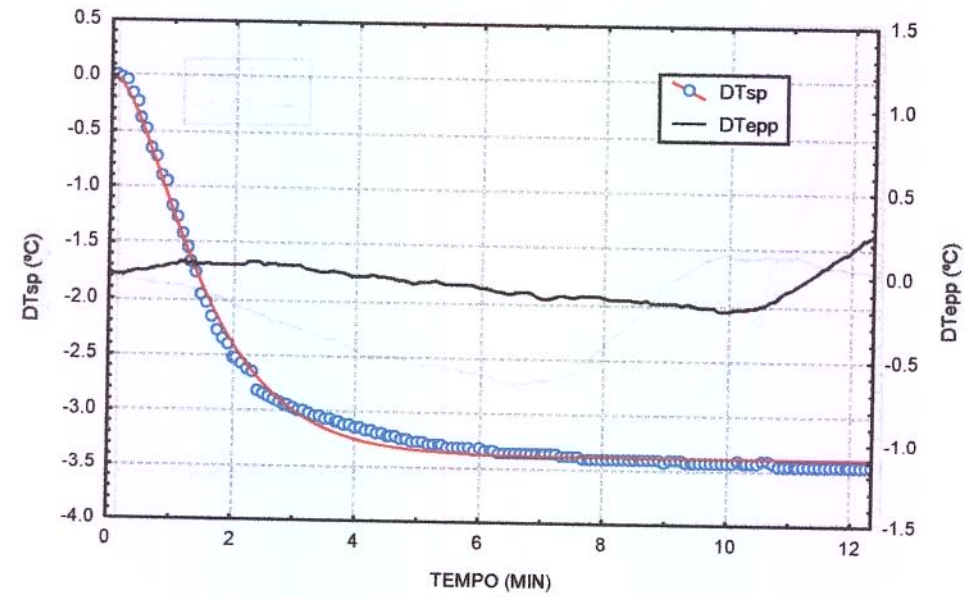


(a)

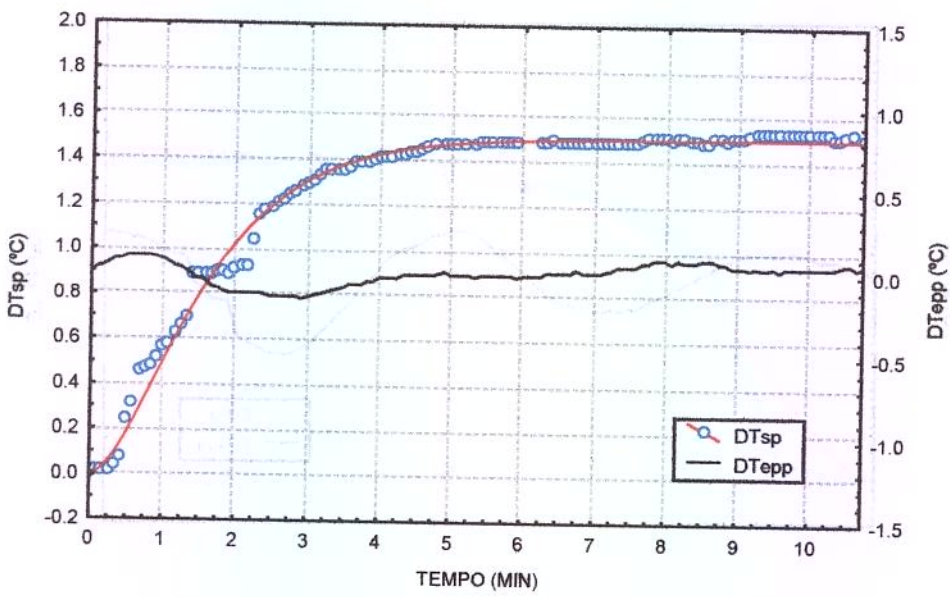


(b)

Figura B. 2. 4 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada da solução de sacarose 8%: (a) E07 – perturbação $\Delta T_{ep} = -8^{\circ}\text{C}$; (b); E08 - perturbação $\Delta T_{ep} = +8^{\circ}\text{C}$.

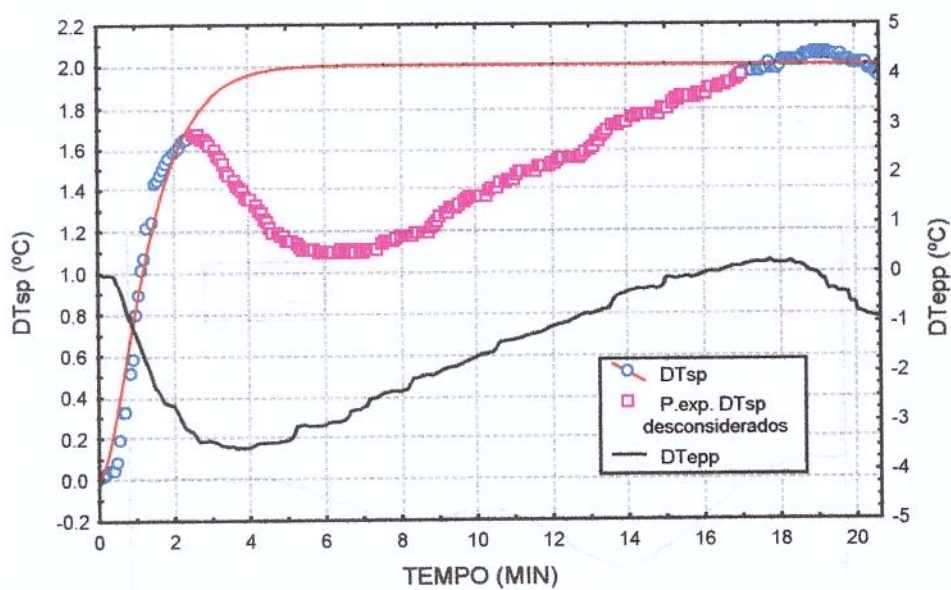


(a)

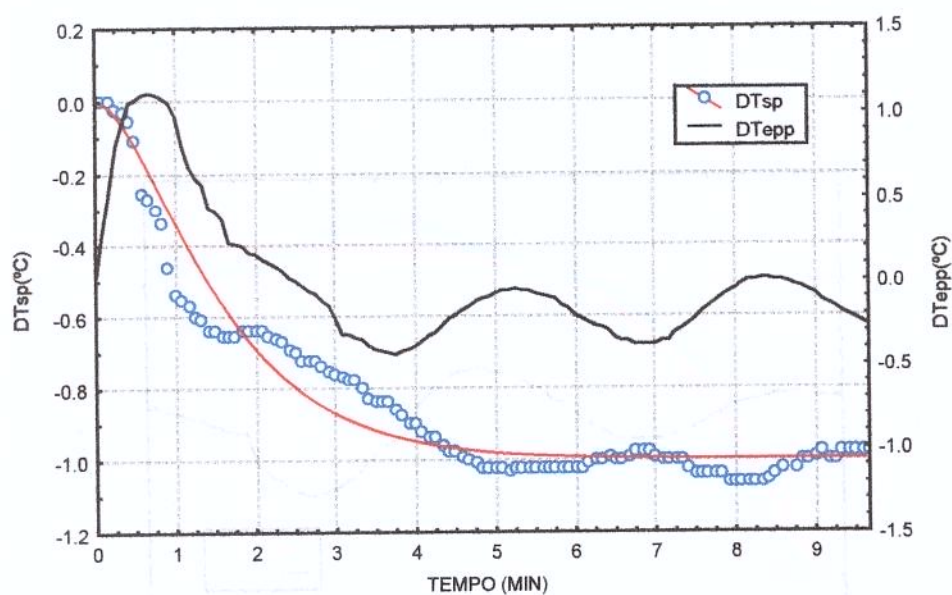


(b)

Figura B. 2. 5 – Ensaio de perturbações individuais de vazão da solução de sacarose 8%:
(a) E09 – perturbação $\Delta mp = -100$ kg/h; (b) E10 - perturbação $\Delta mp = +100$ kg/h.



(a)



(b)

Figura B. 2. 6 – Ensaio da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 8%: (a) E11- perturbação $\Delta V_{pp} = -934$ L/h; (b) E12 - perturbação $\Delta V_{pp} = +934$ L/h.

B. 3 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DA SOLUÇÃO DE SACAROSE 18%

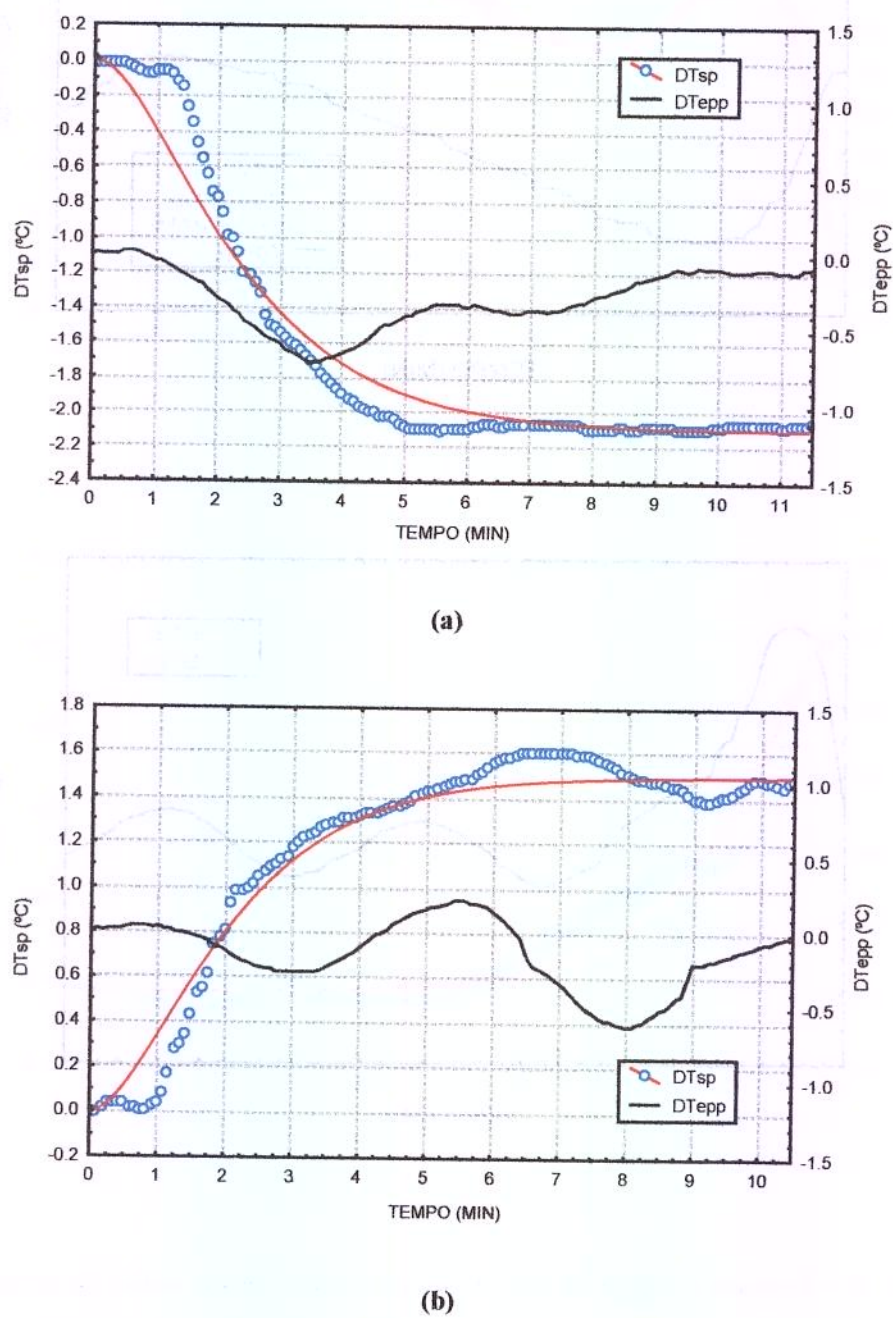
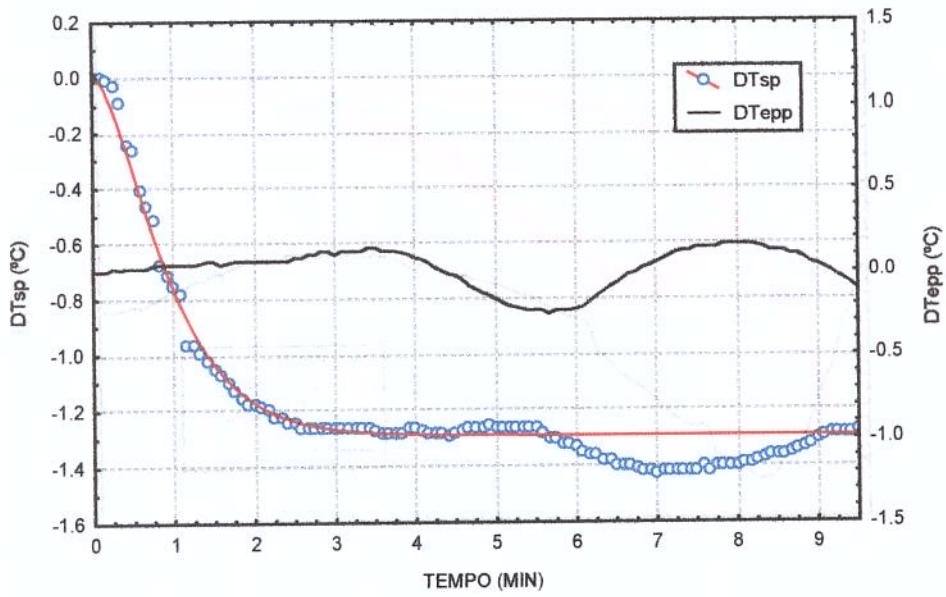
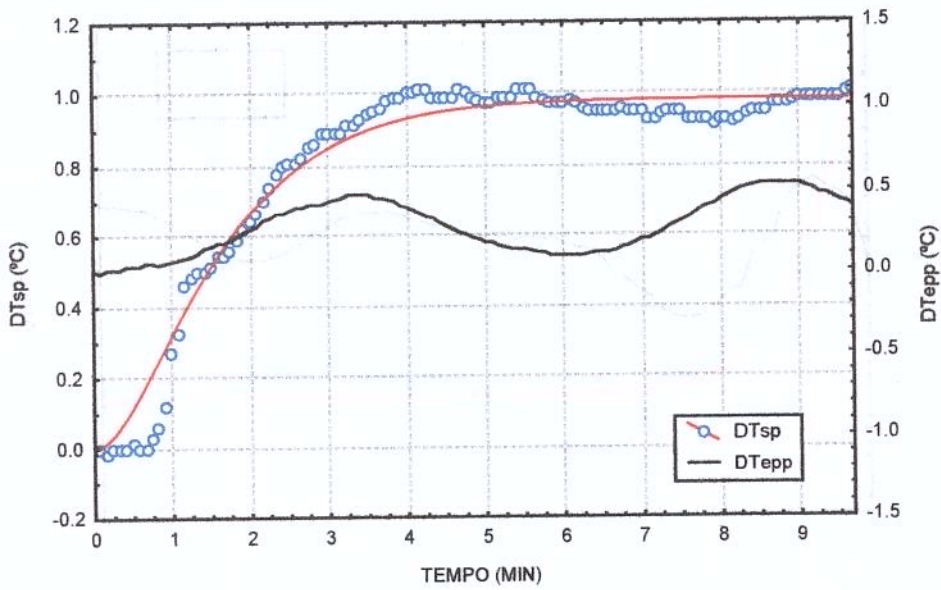


Figura B. 3. 1 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada a solução de sacarose 18%: (a) E01 – perturbação $\Delta T_{ep} = -4^{\circ}C$; (b); E02 - perturbação $\Delta T_{ep} = +4^{\circ}C$.

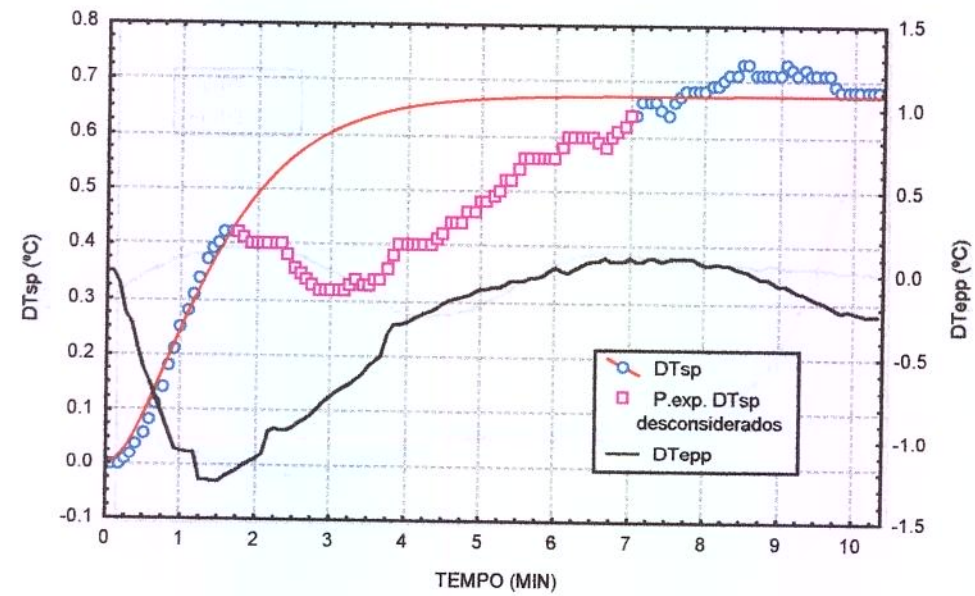


(a)

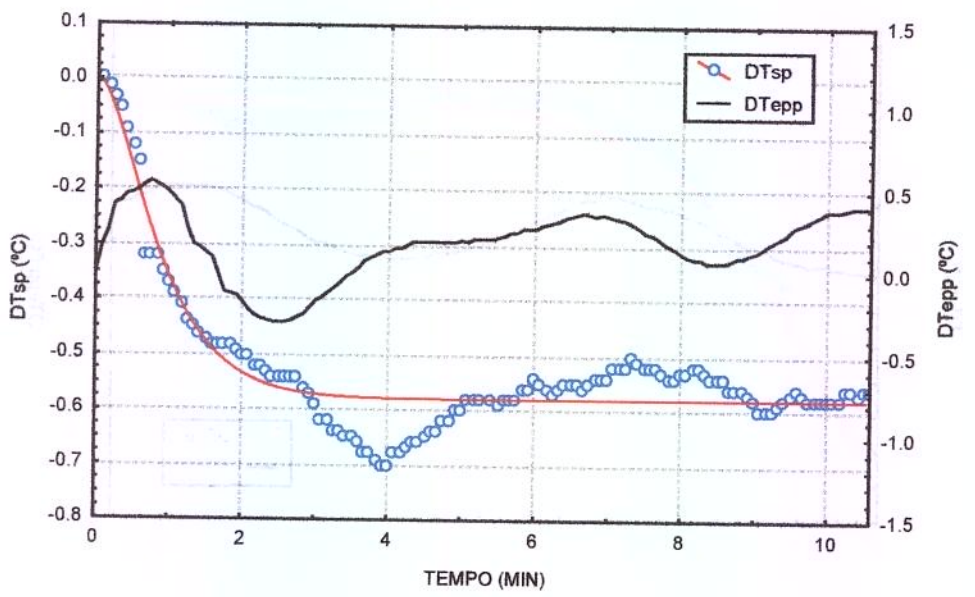


(b)

Figura B. 3. 2 – Ensaios de perturbações individuais de vazão solução de sacarose 18%: (a) E03 – perturbação $\Delta mp = -50$ kg/h; (b) E04 - perturbação $\Delta mp = +50$ kg/h.

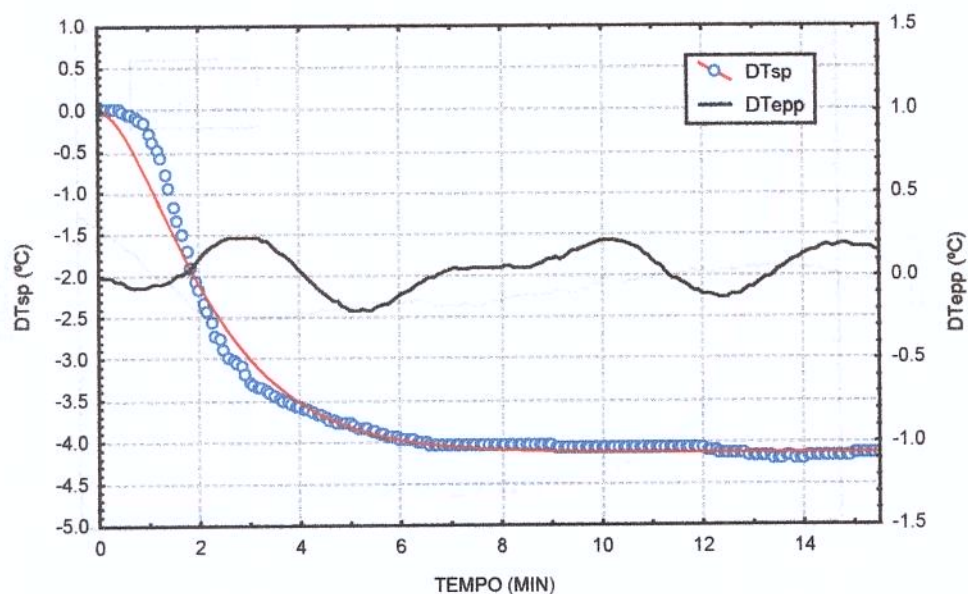


(a)

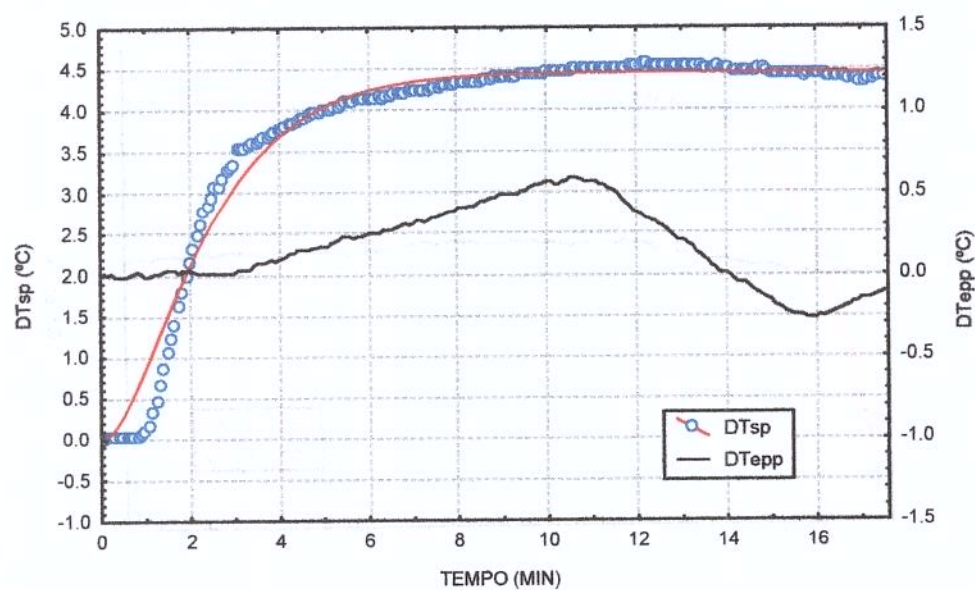


(b)

Figura B. 3. 3 – Ensaios de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 18%: (a) E05 – perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h; (b) E06 - perturbação $\Delta V_{pp}=+467$ L/h.

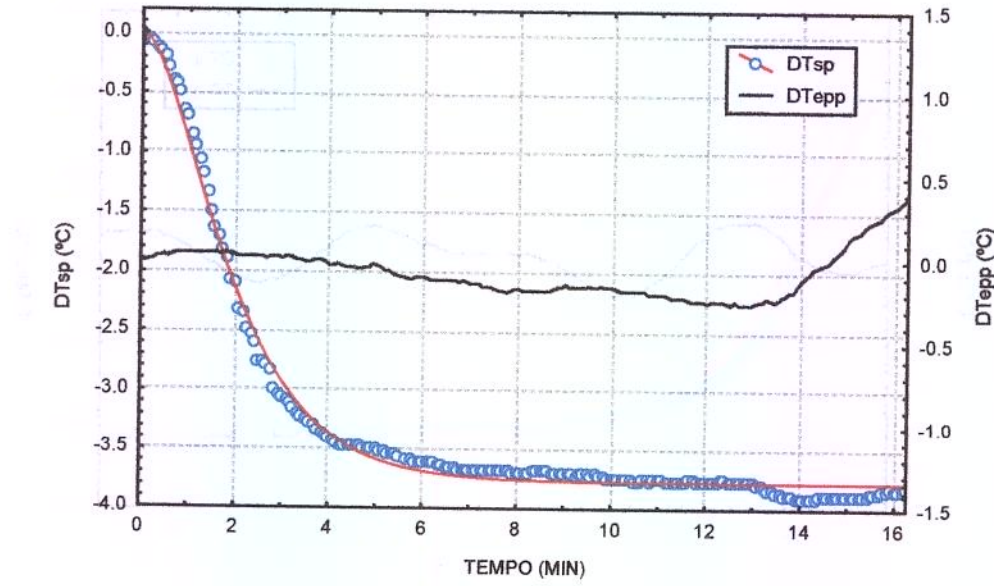


(a)

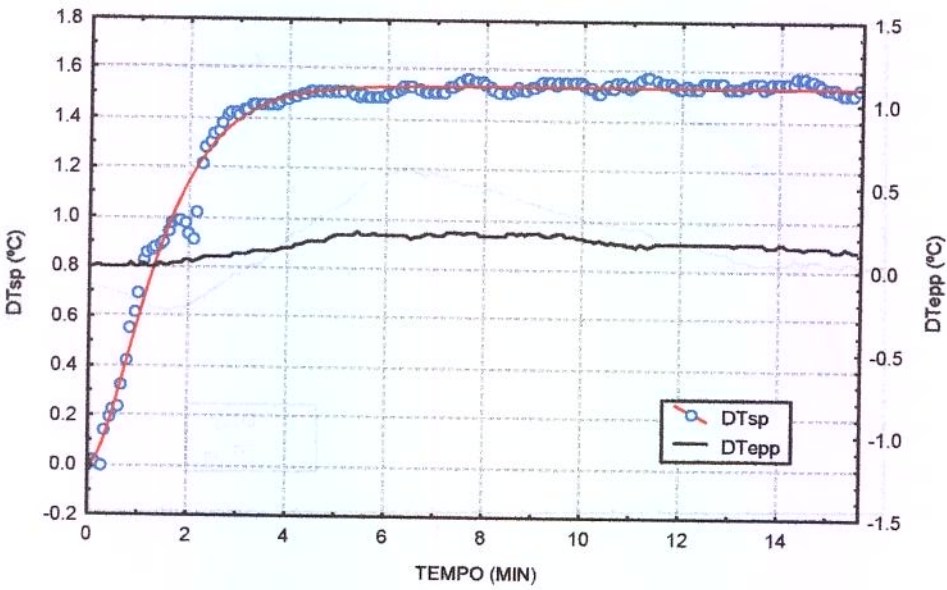


(b)

Figura B. 3. 4 – Ensaio de perturbações individuais de temperatura de entrada da solução de sacarose 18%: (a) E07 – perturbação $\Delta T_{ep} = -8^{\circ}\text{C}$; (b); E08 - perturbação $\Delta T_{ep} = +8^{\circ}\text{C}$.

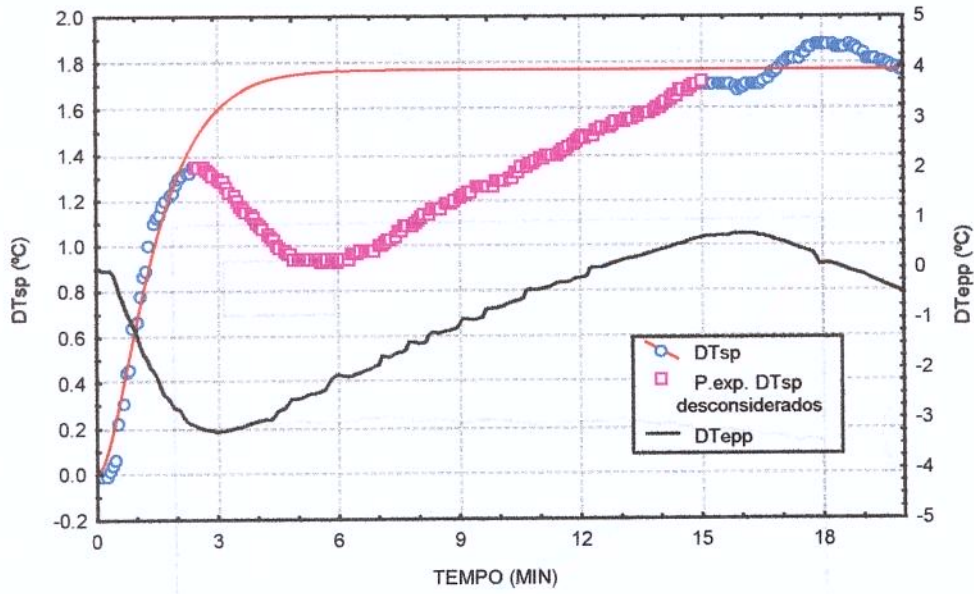


(a)

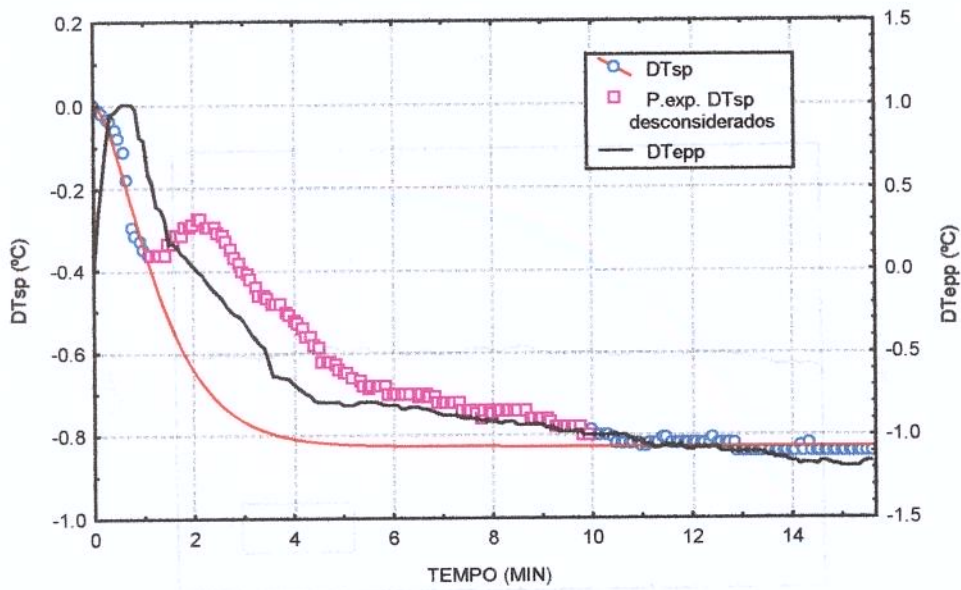


(b)

Figura B. 3. 5 – Ensaio de perturbações individuais de vazão da solução de sacarose 18%:
(a) E09 - perturbação $\Delta mp = -100$ kg/h; (b) E10 - perturbação $\Delta mp = +100$ kg/h..



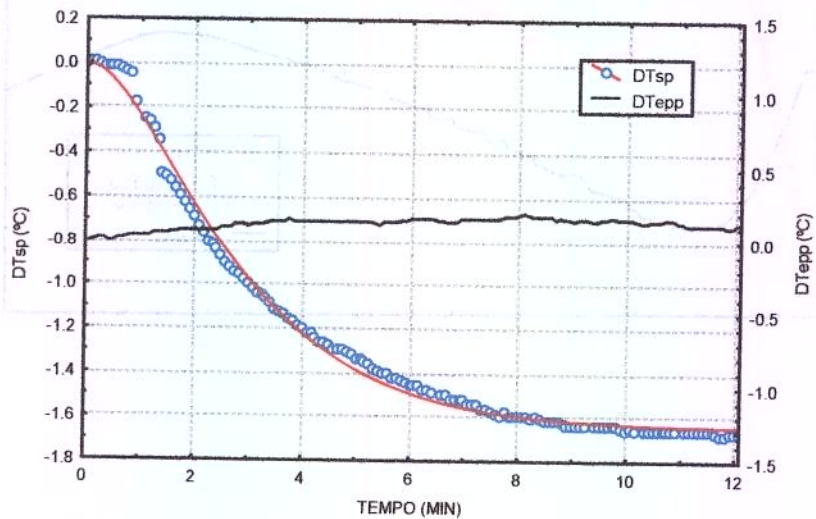
(a)



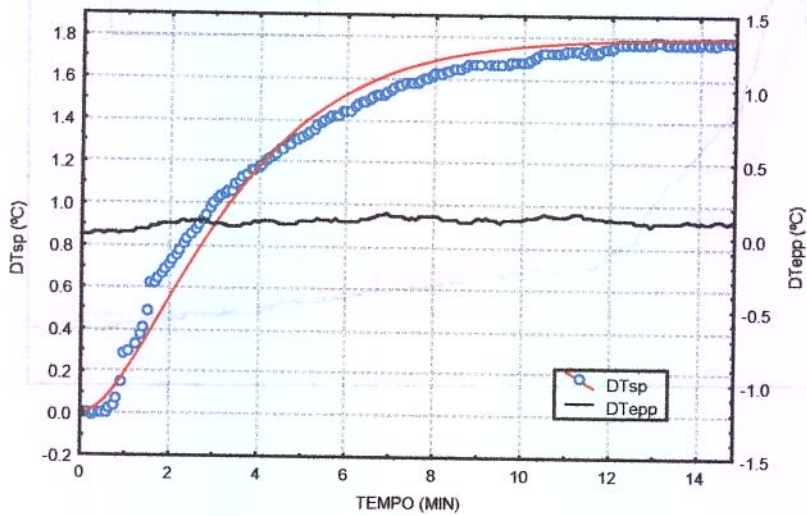
(b)

Figura B. 3. 6 – Ensaios da água de perturbações individuais de vazão de propileno glicol para a solução de sacarose 18%: (a) E11 – perturbação $\Delta V_{pp} = -934$ L/h; (b) E12 - perturbação $\Delta V_{pp} = +934$ L/h.

B. 4 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES INDIVIDUAIS DO AÇÚCAR INVERTIDO.

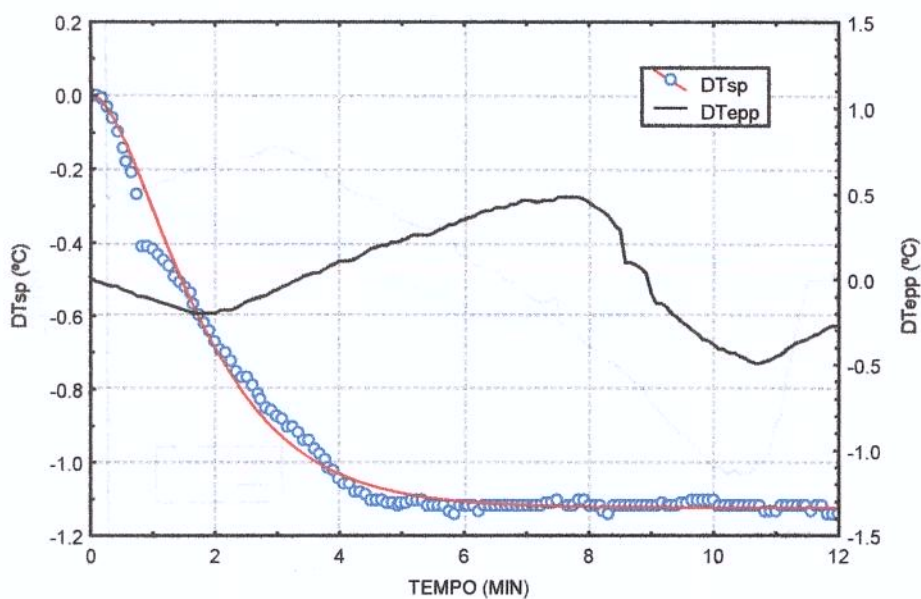


(a)

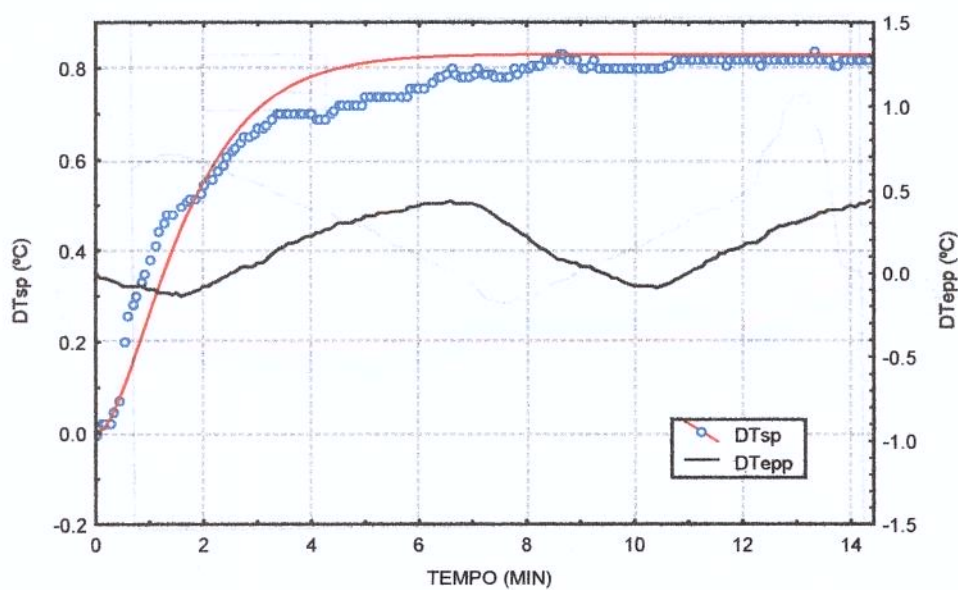


(b)

Figura B. 4. 1 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada do açúcar invertido na C I-1: (a) E01 – perturbação $\Delta T_{ep} = -3\text{ °C}$, (b) E02 - perturbação $\Delta T_{ep} = +3\text{ °C}$.

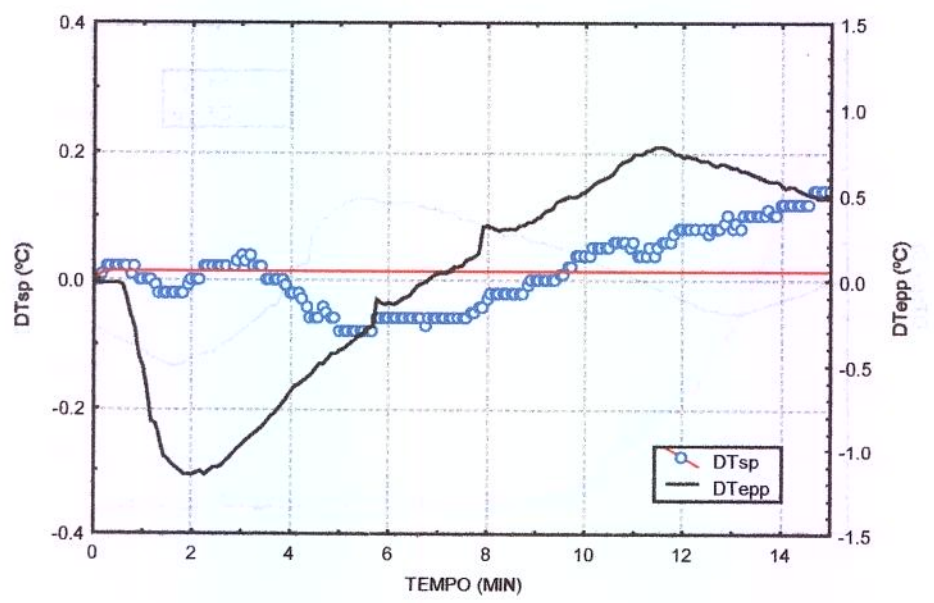


(a)

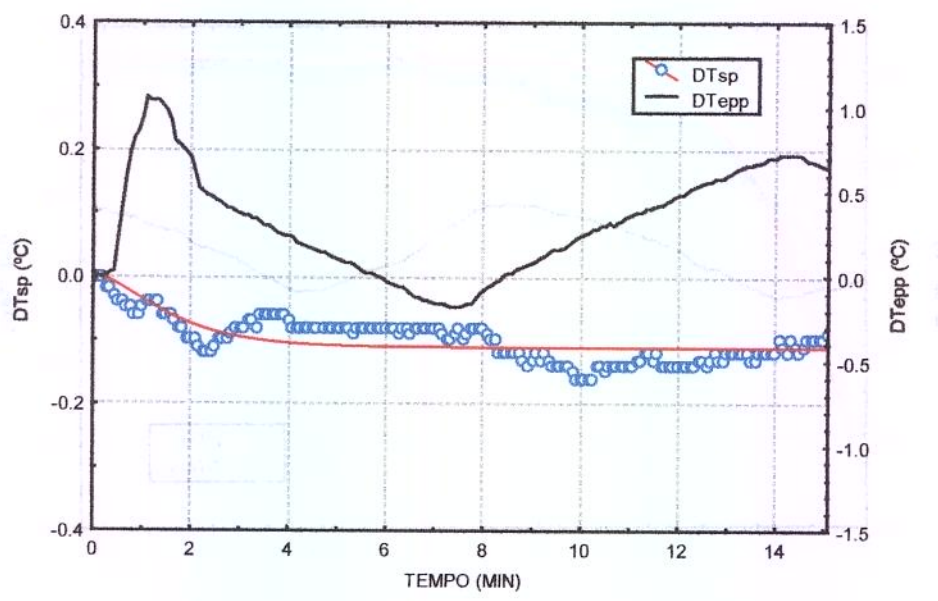


(b)

Figura B. 4. 2 – Ensaio de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-1:
 (a) E03 - perturbação $\Delta mp = -50$ kg/h, (b) E04 - perturbação $\Delta mp = +50$ kg/h.

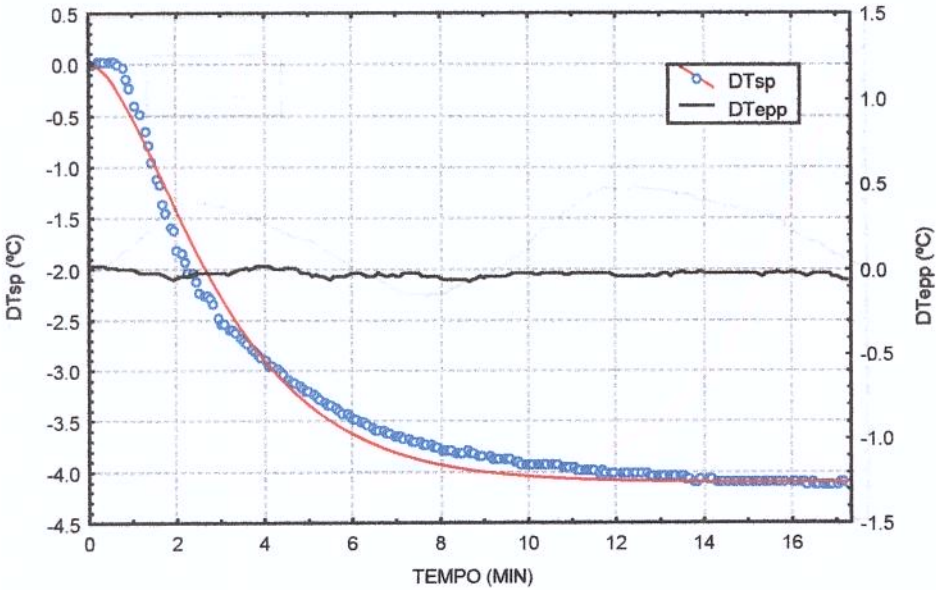


(a)

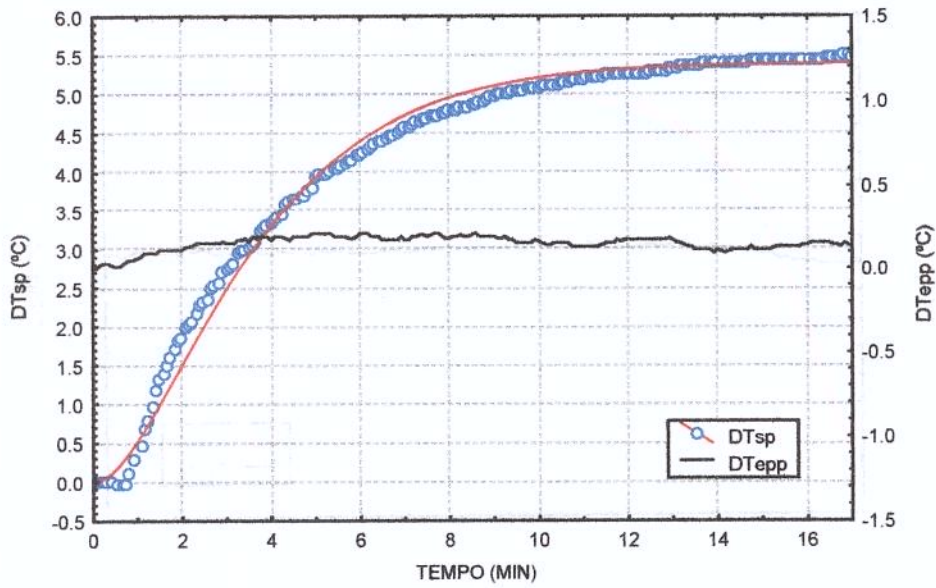


(b)

Figura B. 4. 3 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-1: (a) E05 - perturbação $\Delta V_{pp}=-467$ L/h, (b) E06 - perturbação $\Delta V_{pp}=+467$ L/h.

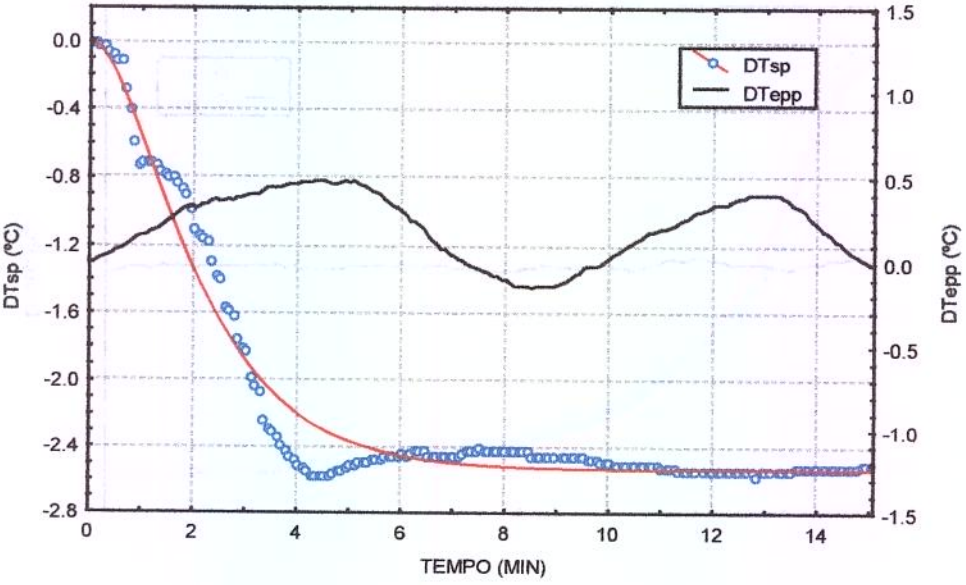


(a)

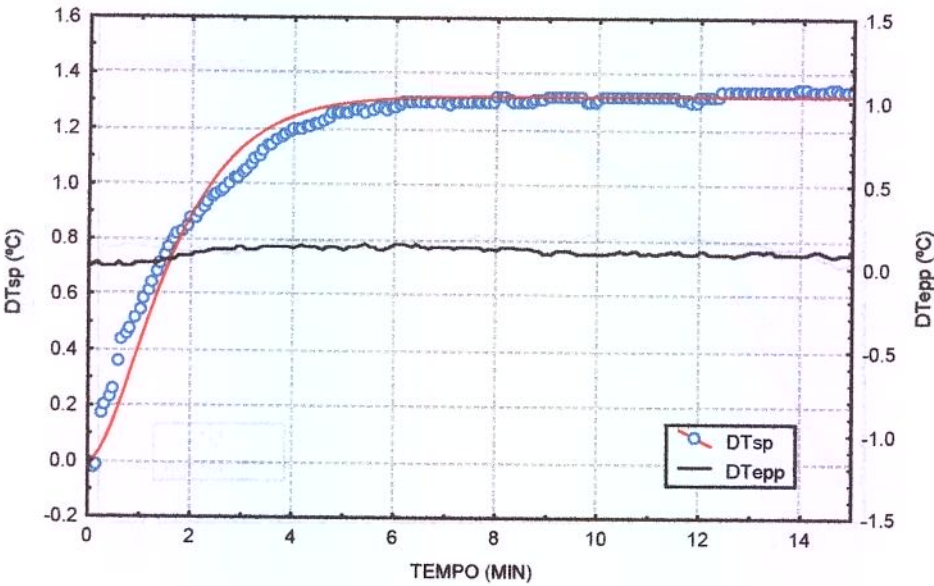


(b)

Figura B. 4. 4 – Ensaios de perturbações individuais de temperatura de entrada do açúcar invertido na C I-1: (a) E07 - perturbação $\Delta T_{ep} = -6^\circ\text{C}$, (b) E08 - perturbação $\Delta T_{ep} = +6^\circ\text{C}$.

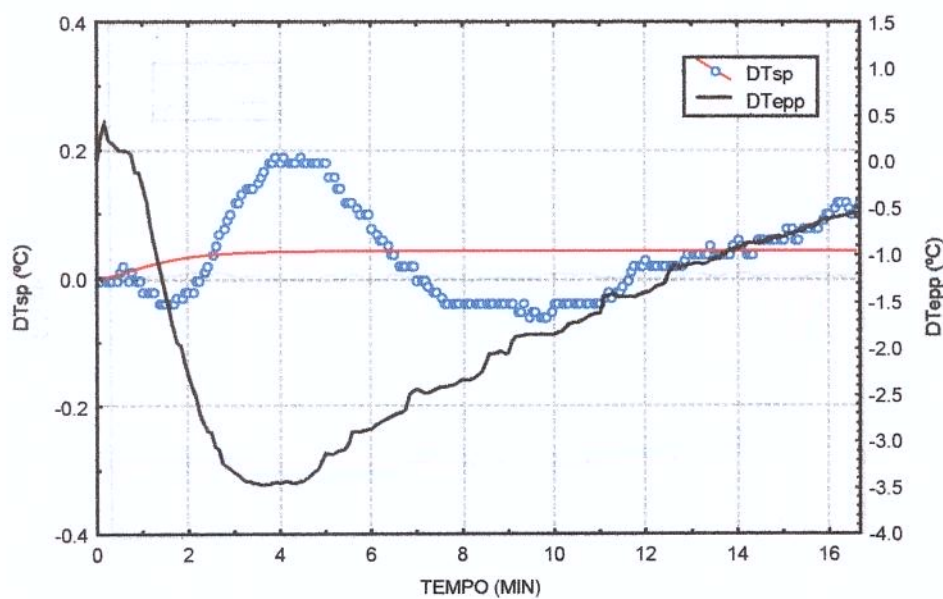


(a)

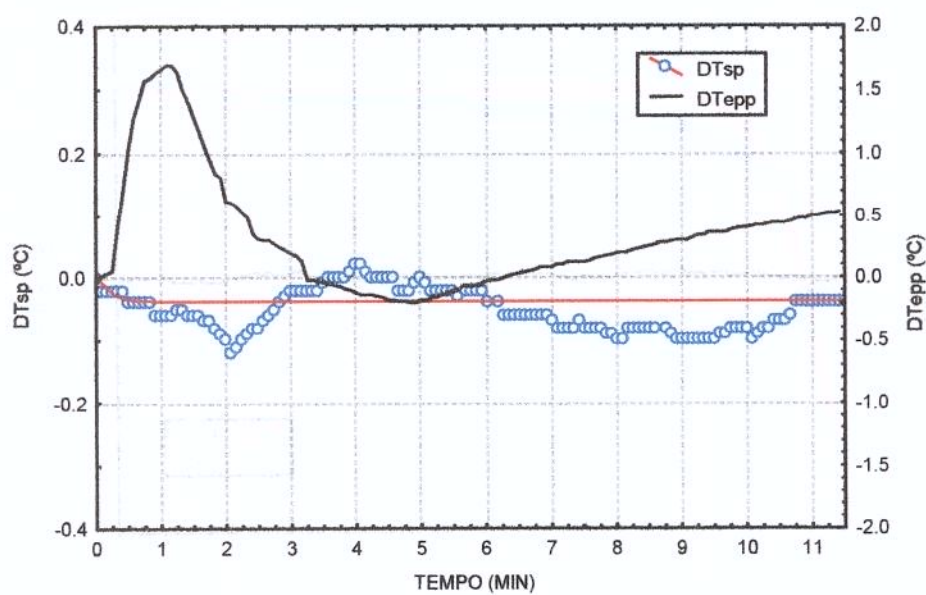


(b)

Figura B. 4. 5 – Ensaio de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-1:
(a) E09 - perturbação $\Delta mp = -83$ kg/h, (b) E10 - perturbação $\Delta mp = +83$ kg/h.

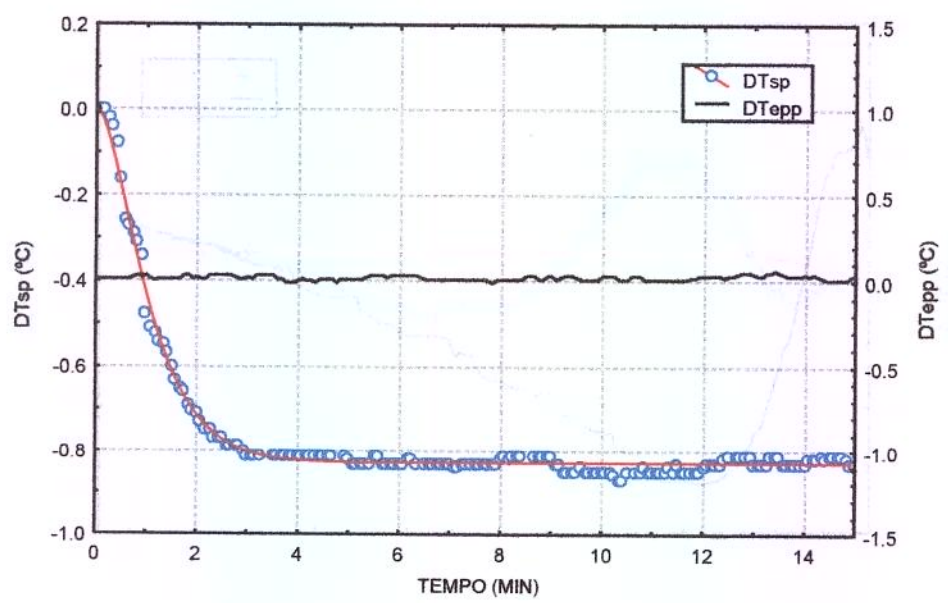


(a)

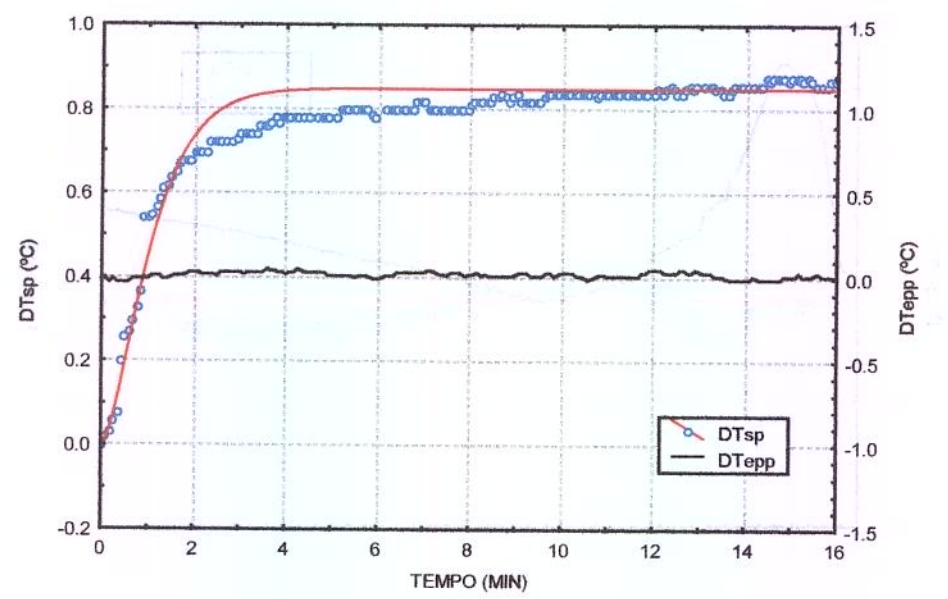


(b)

Figura B. 4. 6 – Ensaio de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-1: (a) E11 - perturbação $\Delta V_{pp}=-934$ L/h, (b) E12 - perturbação $\Delta V_{pp}=+934$ L/h.

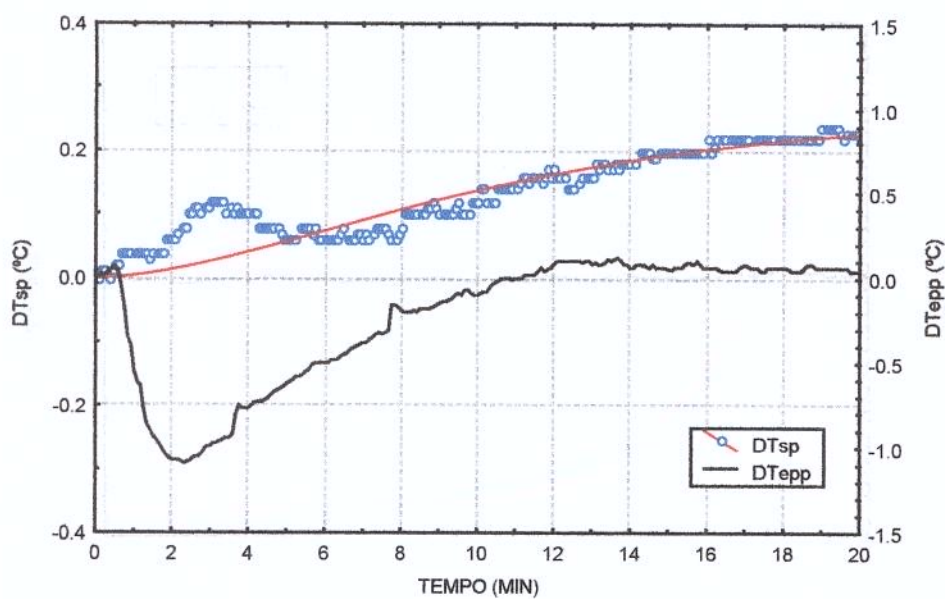


(a)

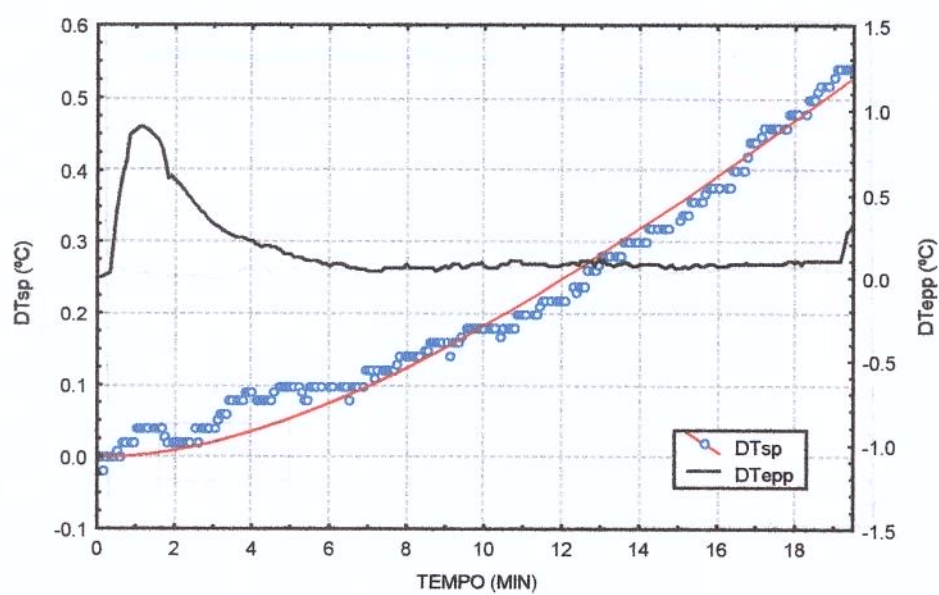


(b)

Figura B. 4. 7 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-2:
(a) E13 - perturbação $\Delta mp = -50$ kg/h, (b) E14 - perturbação $\Delta mp = +50$ kg/h.

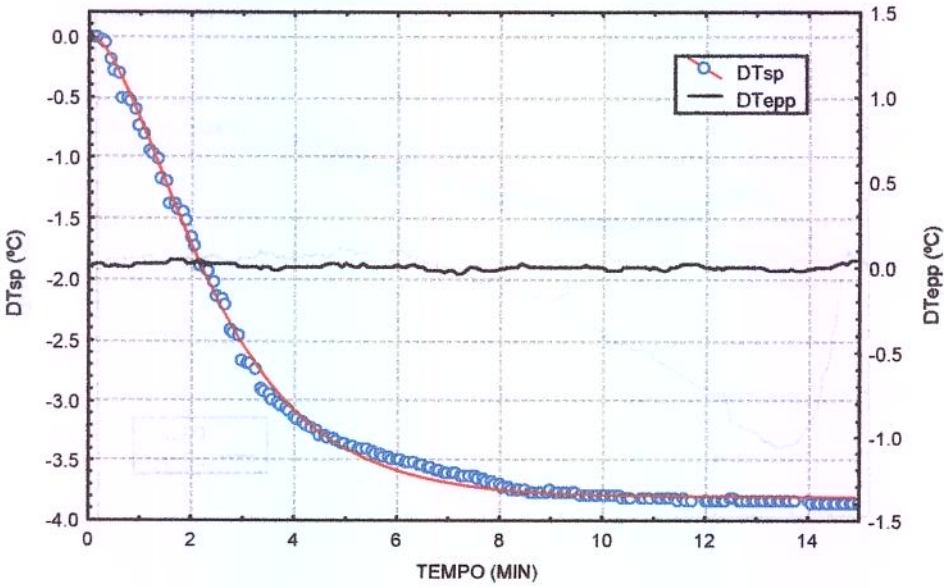


(a)

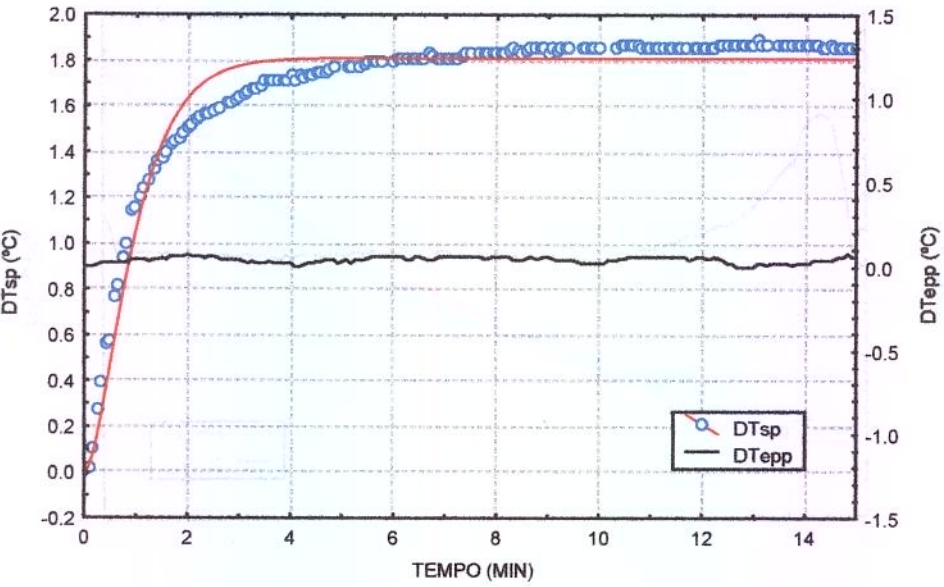


(b)

Figura B. 4. 8 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-2: (a) E15 - perturbação $\Delta V_{pp} = -467$ L/h, (b) E16 - perturbação $\Delta V_{pp} = +467$ L/h.

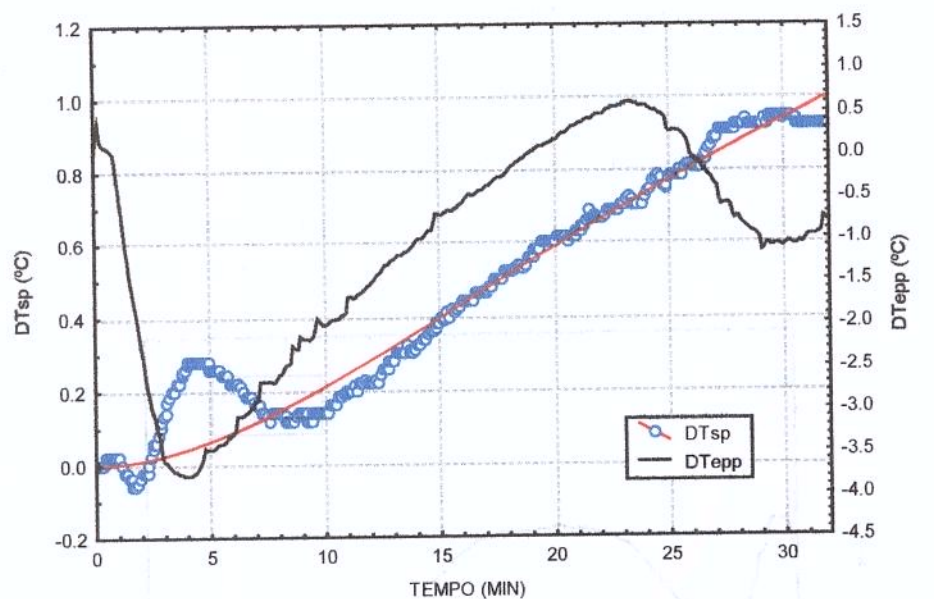


(a)

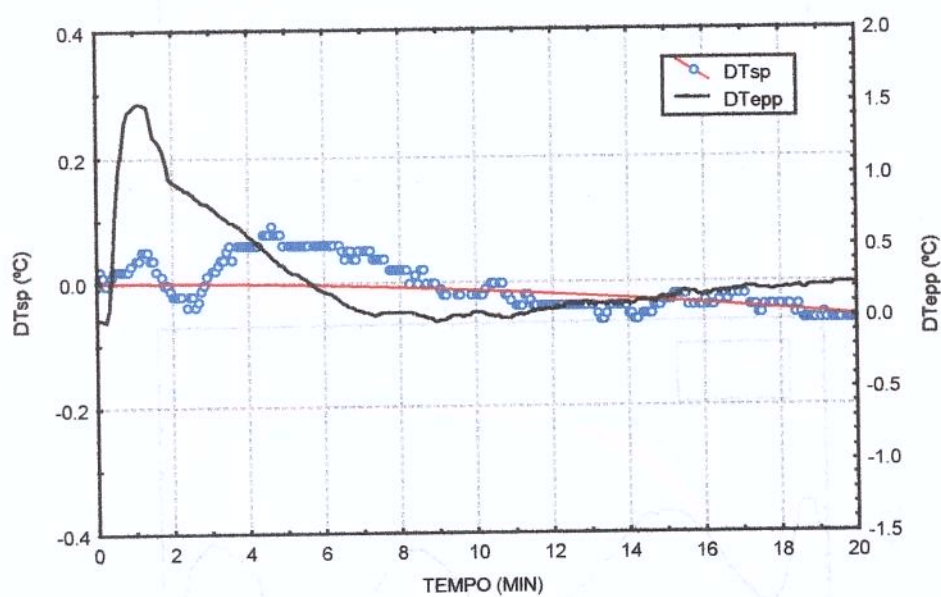


(b)

Figura B. 4. 9 – Ensaio de perturbações individuais de vazão do açúcar invertido na C I-3:
(a) E17 - perturbação $\Delta mp = -83$ kg/h, (b) E18 - perturbação $\Delta mp = +83$ kg/h.



(a)



(b)

Figura B. 4. 10 – Ensaios de perturbações individuais de vazão do propileno glicol para o açúcar invertido na C I-3: (a) E19 - perturbação $\Delta V_{pp} = -934$ L/h, (b) E20 - perturbação $\Delta V_{pp} = +934$ L/h.

APÊNDICE C

C. 1 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTES AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES SIMULTÂNEAS DA SOLUÇÃO DE SACAROSE 18%.

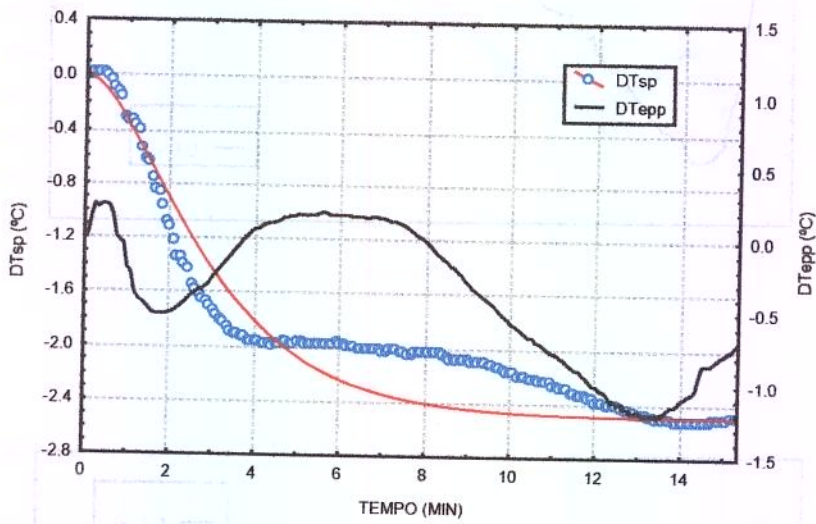


Figura C. 1. 1 - Ensaio 01 de perturbação simultânea da sacarose 18%: pert. [(-3 °C) Tep, (-50 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].

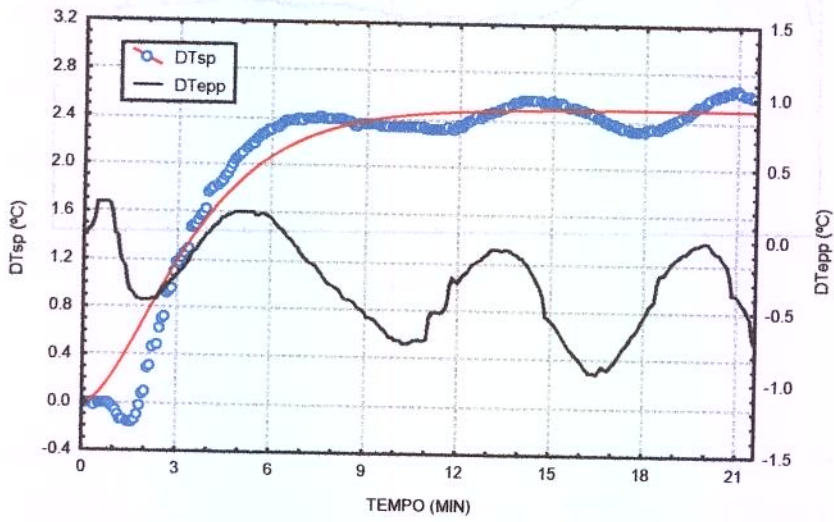


Figura C. 1. 2 - Ensaio 02 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+9°C) Tep, (-50 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].

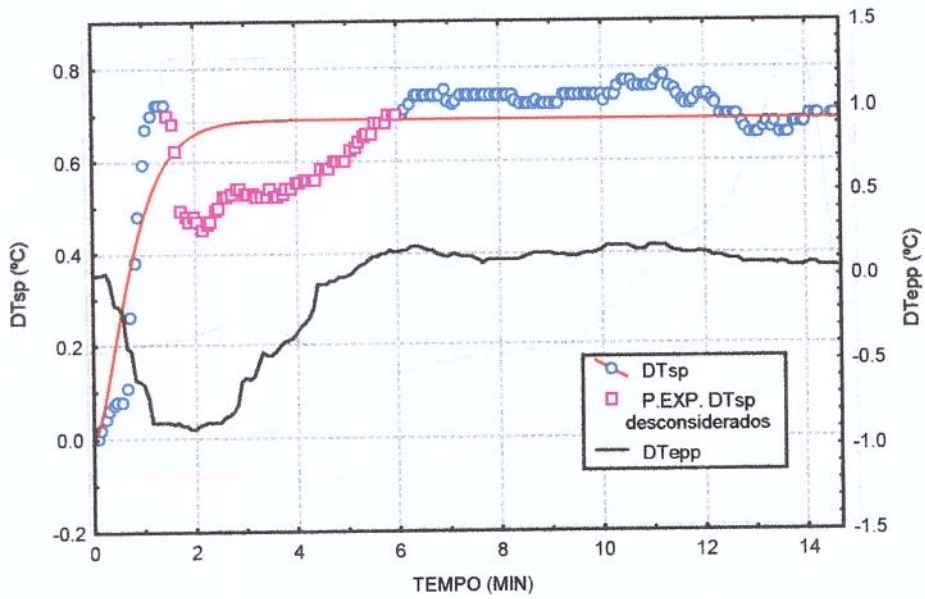


Figura C. 1. 3 - Ensaio 03 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação $[(-3^{\circ}\text{C}) \text{ Tep}, (+150 \text{ kg/h}) \text{ mp}, (-385\text{L/h}) \text{ Vpp}]$.

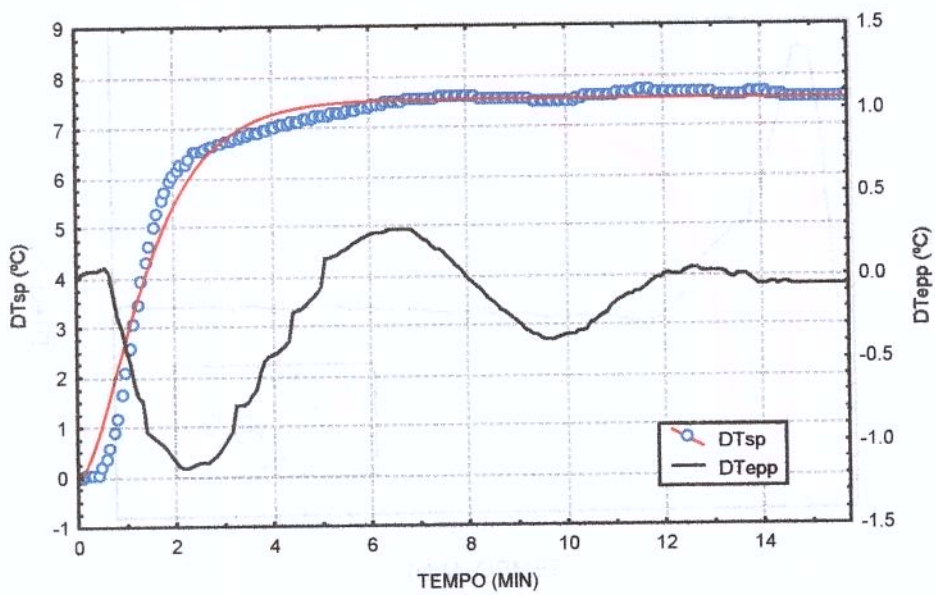


Figura C. 1. 4 - Ensaio 04 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação $[(+9^{\circ}\text{C}) \text{ Tep}, (+150 \text{ kg/h}) \text{ mp}, (-385\text{L/h}) \text{ Vpp}]$.

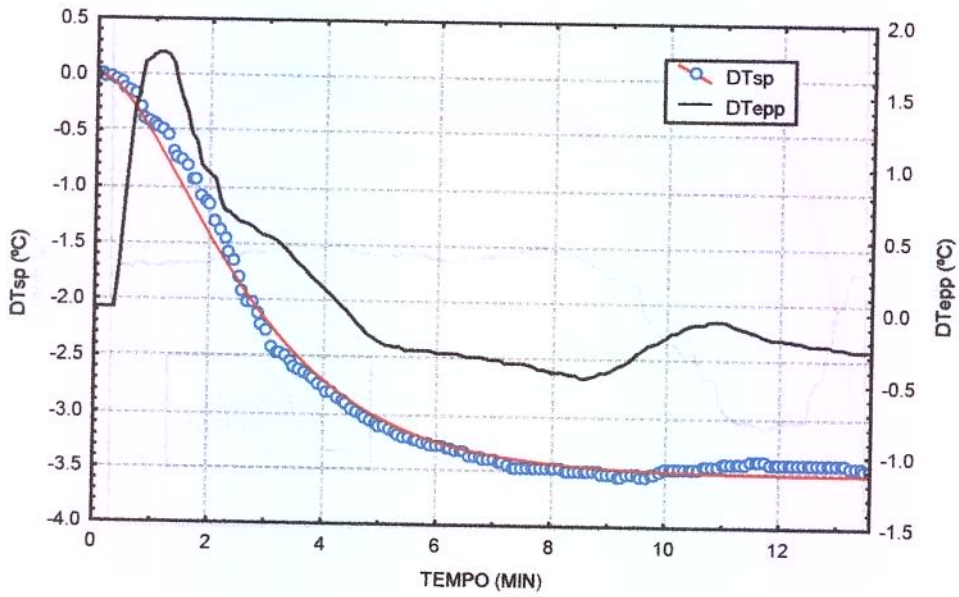


Figura C. 1. 5 - Ensaio 05 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(-3°C) Tep, (-50 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].

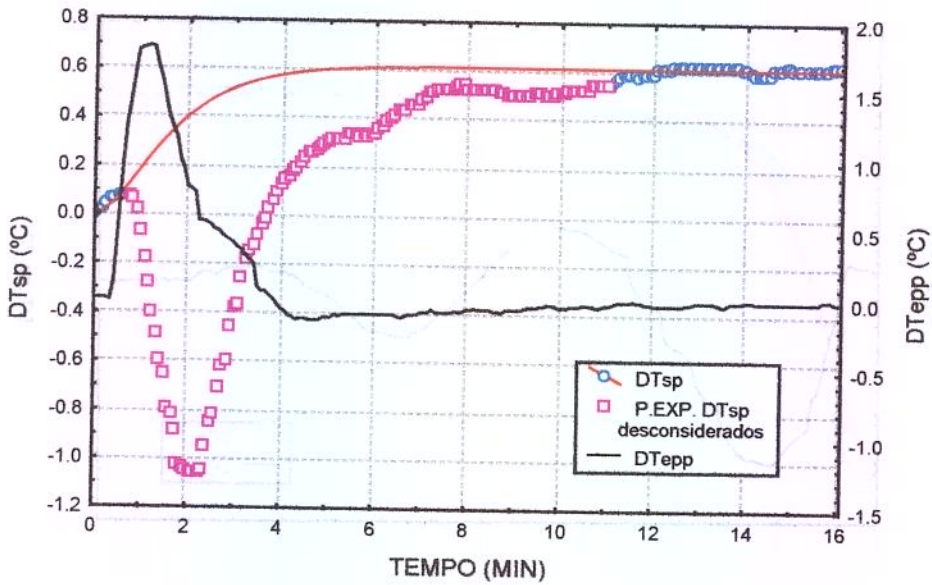


Figura C. 1. 6 - Ensaio 06 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+9 °C) Tep, (-50 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].

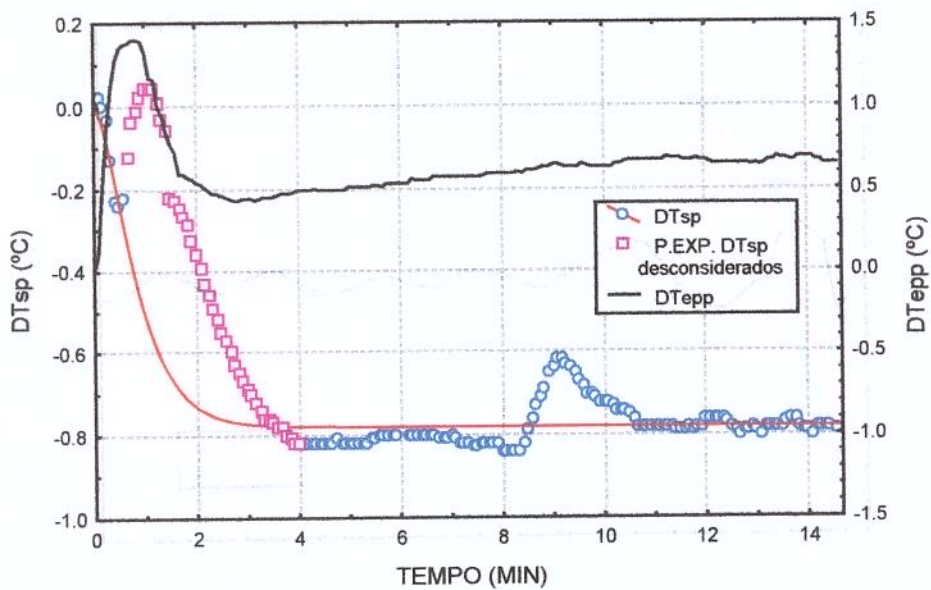


Figura C. 1. 7 - Ensaio 07 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação $[(-3^{\circ}\text{C}) \text{ Tep}, (+150 \text{ kg/h}) \text{ mp}, (+1155 \text{ L/h}) \text{ Vpp}]$.

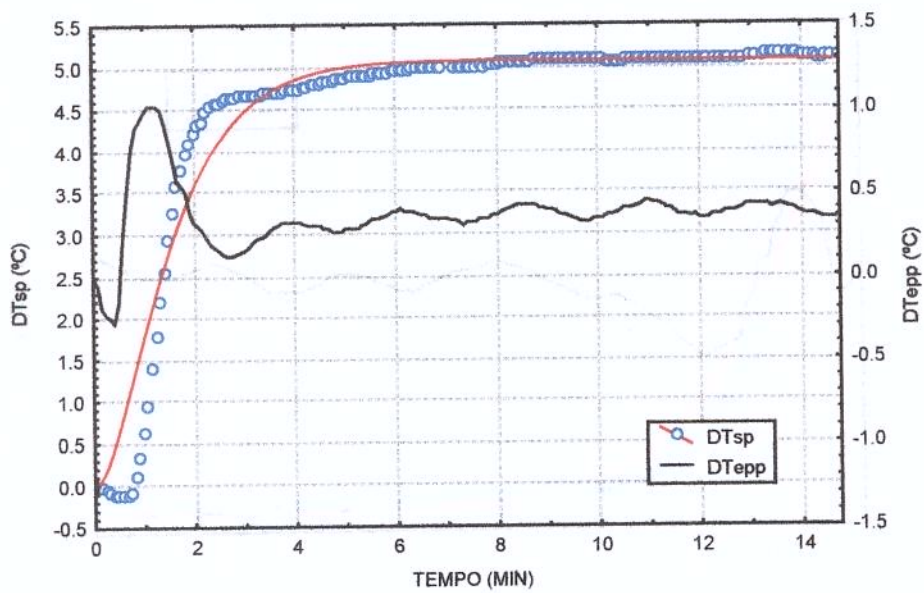


Figura C. 1. 8 - Ensaio 08 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação $[(+9^{\circ}\text{C}) \text{ Tep}, (+150 \text{ kg/h}) \text{ mp}, (+1155 \text{ L/h}) \text{ Vpp}]$.

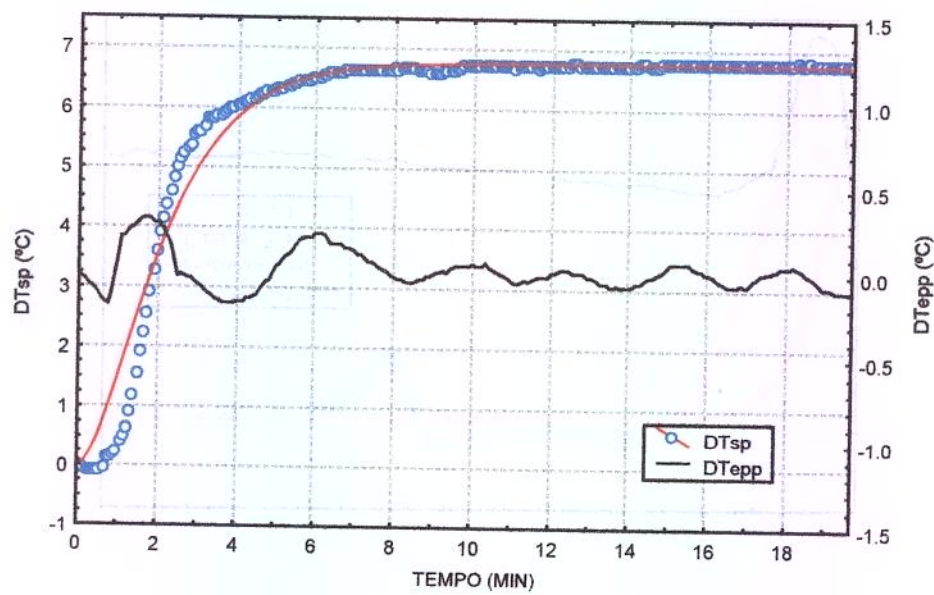


Figura C. 1. 9 - Ensaio 09 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+13,1 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

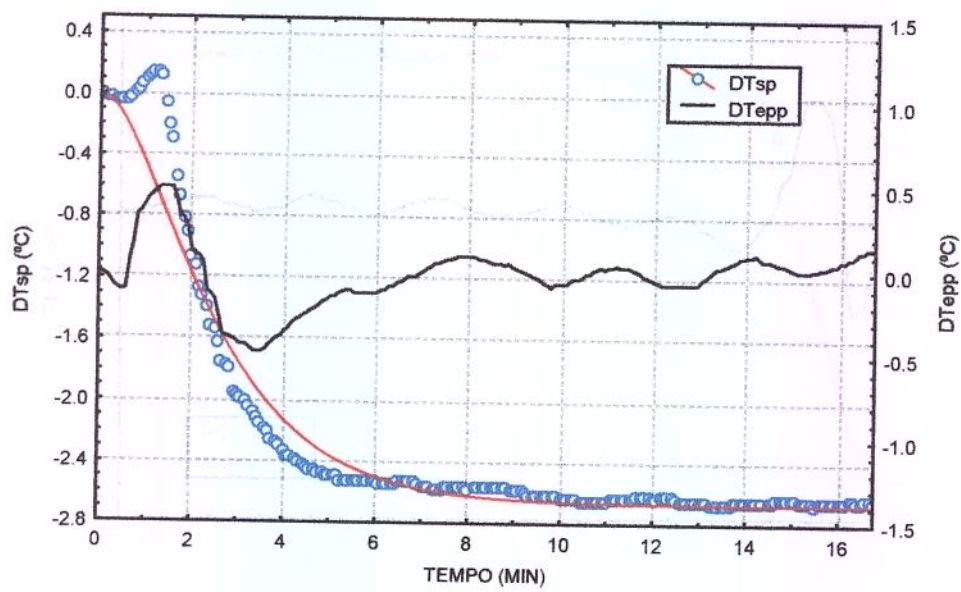


Figura C. 1. 10 - Ensaio 10 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(-7,1 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

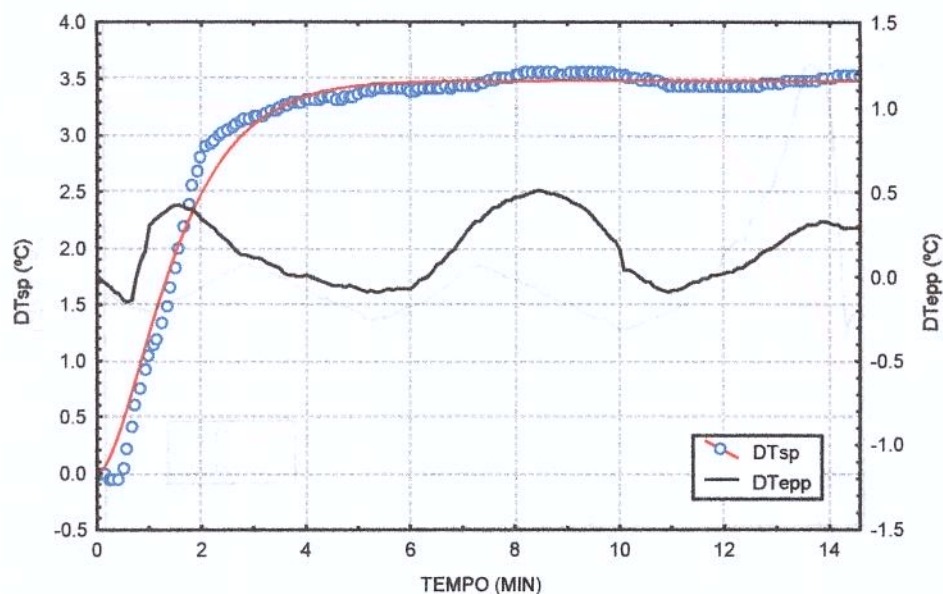


Figura C. 1. 11 - Ensaio 11 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+218,2 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].

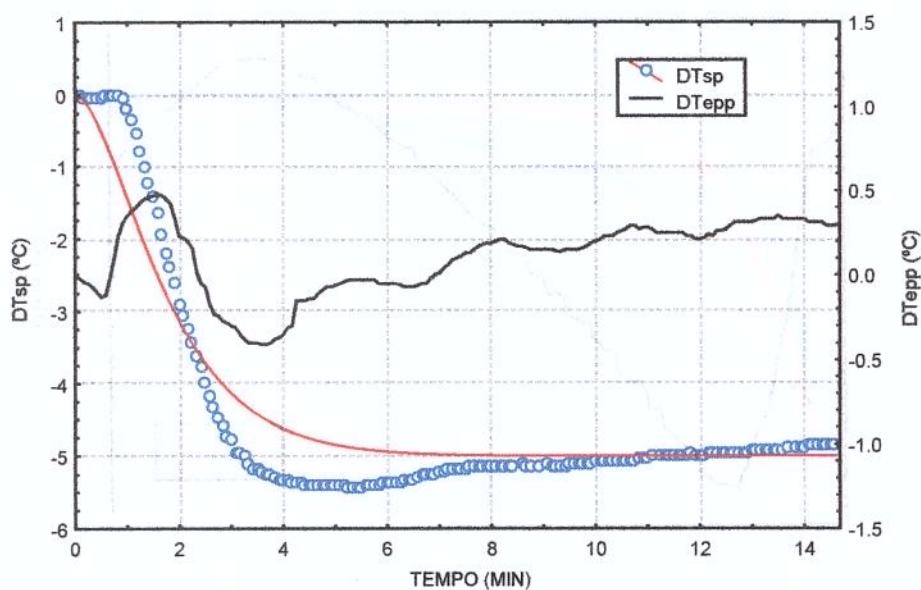


Figura C. 1. 12 - Ensaio 12 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (-118,2 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].

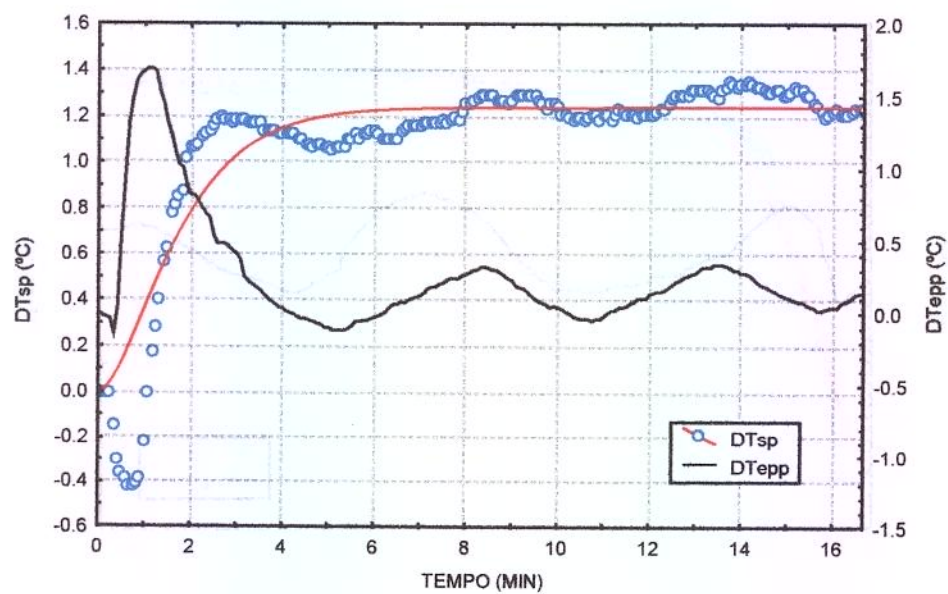


Figura C. 1. 13 - Ensaio 13 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+1689,9 L/h) Vpp].

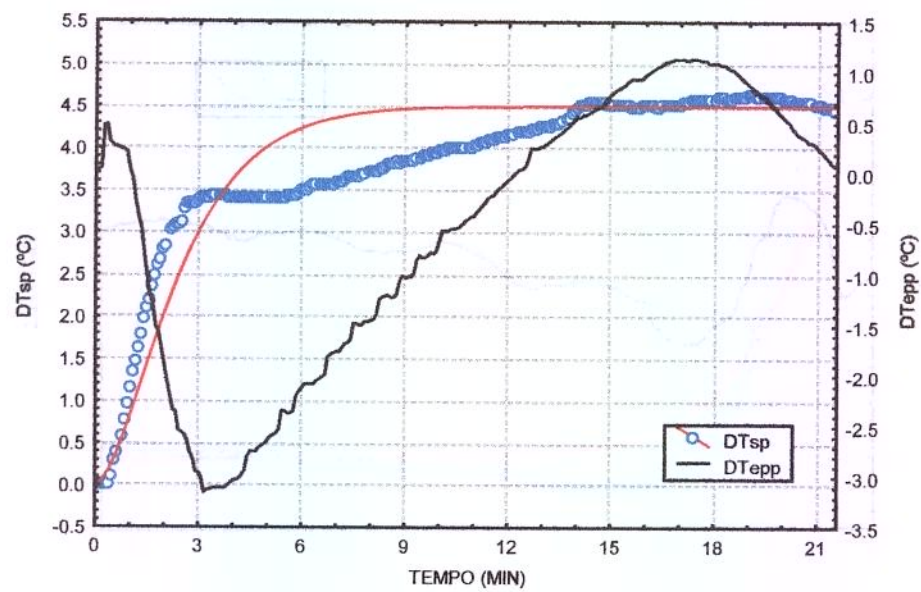


Figura C. 1. 14 - Ensaio 14 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (-909,8 L/h) Vpp].

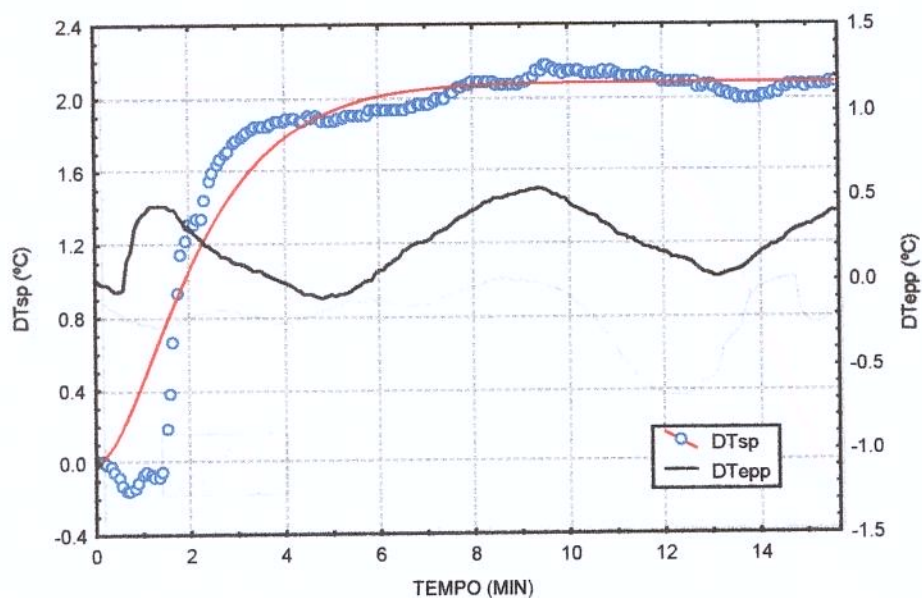


Figura C. 1. 15 - Ensaio 15 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

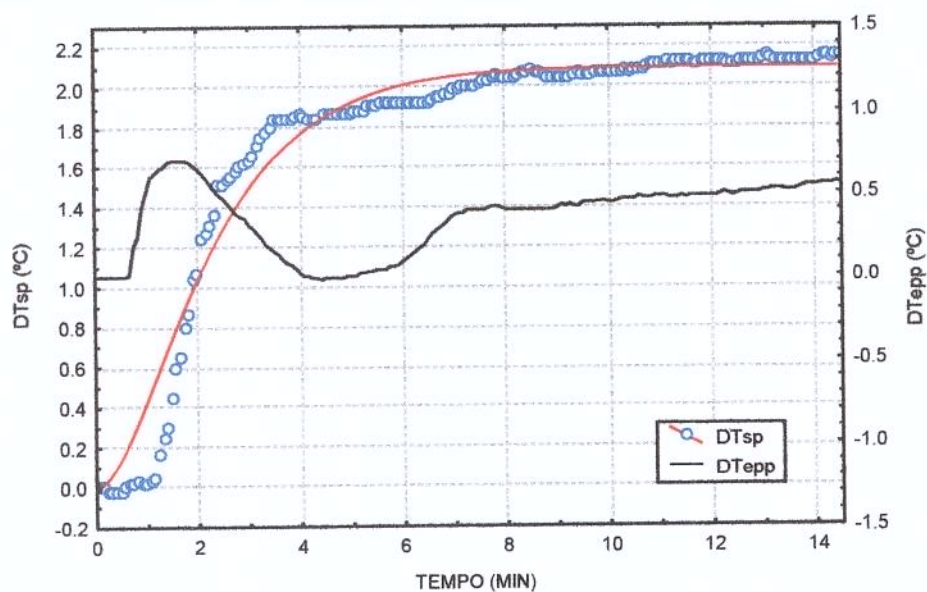


Figura C. 1. 16 - Ensaio 16 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

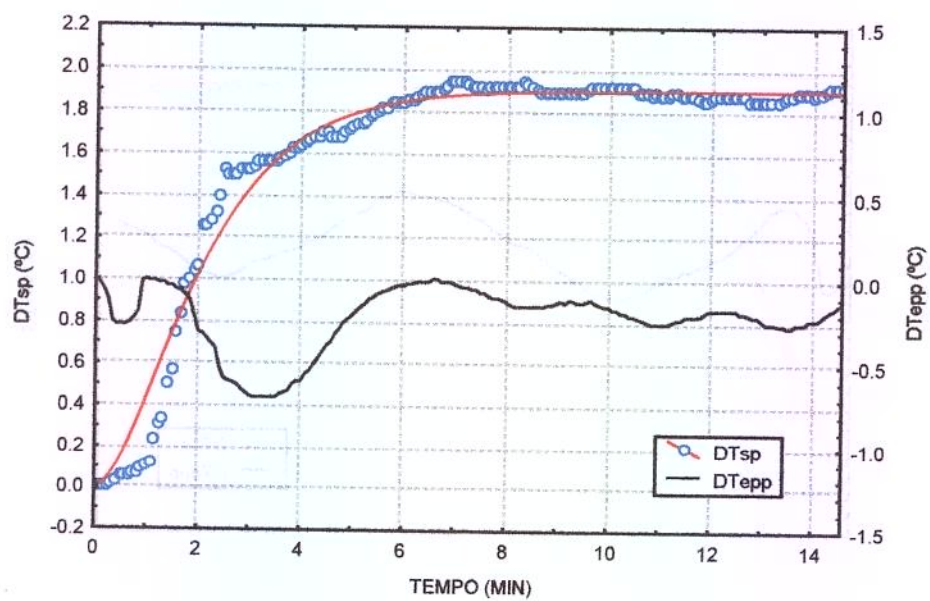


Figura C. 1. 17 - Ensaio 17 de perturbação simultânea da sacarose 18%: perturbação [(+3 °C) Tep, (+50 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].



C. 2 – HISTÓRICOS EXPERIMENTAIS DOS AJUSTES DE SEGUNDA ORDEM REFERENTE AOS ENSAIOS DE PERTURBAÇÕES SIMULTÂNEAS DO AÇÚCAR INVERTIDO.

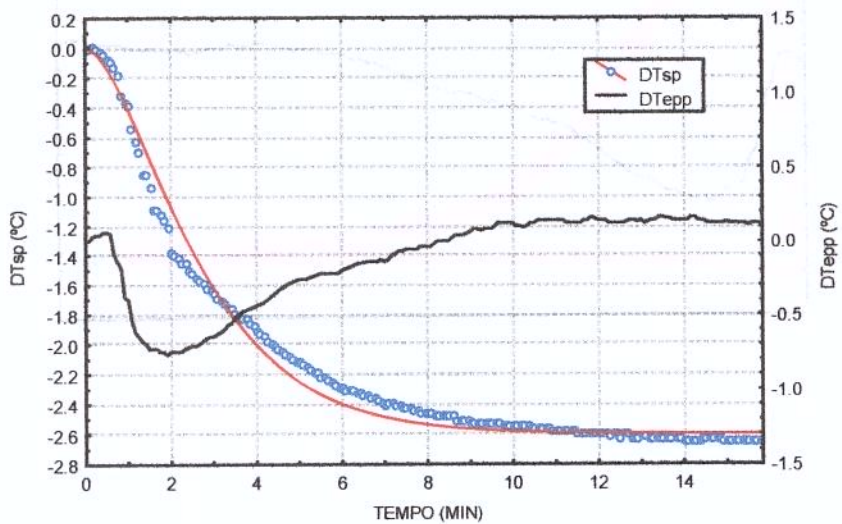


Figura C. 2. 1 - Ensaio 01 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-3 °C) Tep, (-35 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].

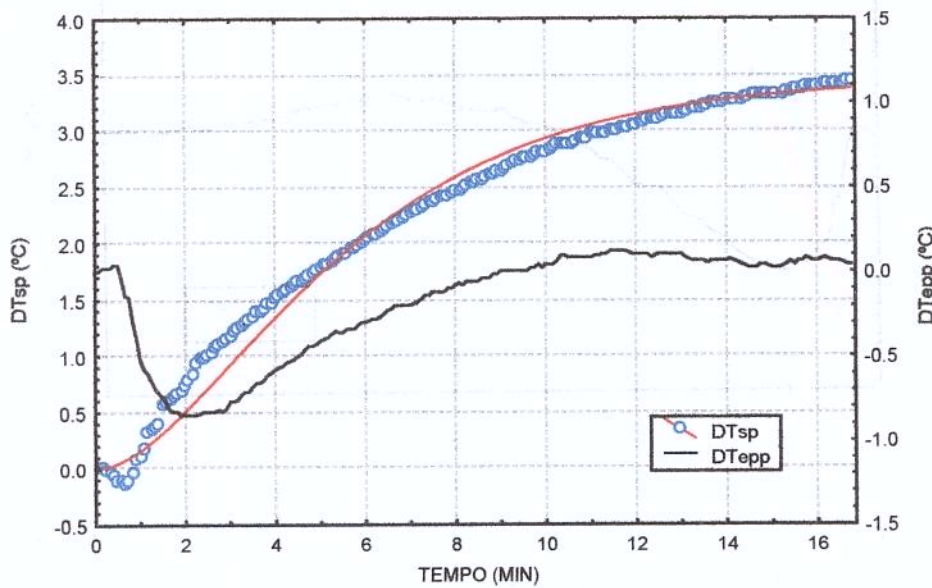


Figura C. 2. 2 - Ensaio 02 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9°C) Tep, (-35 kg/h) mp, (-385 L/h) Vpp].

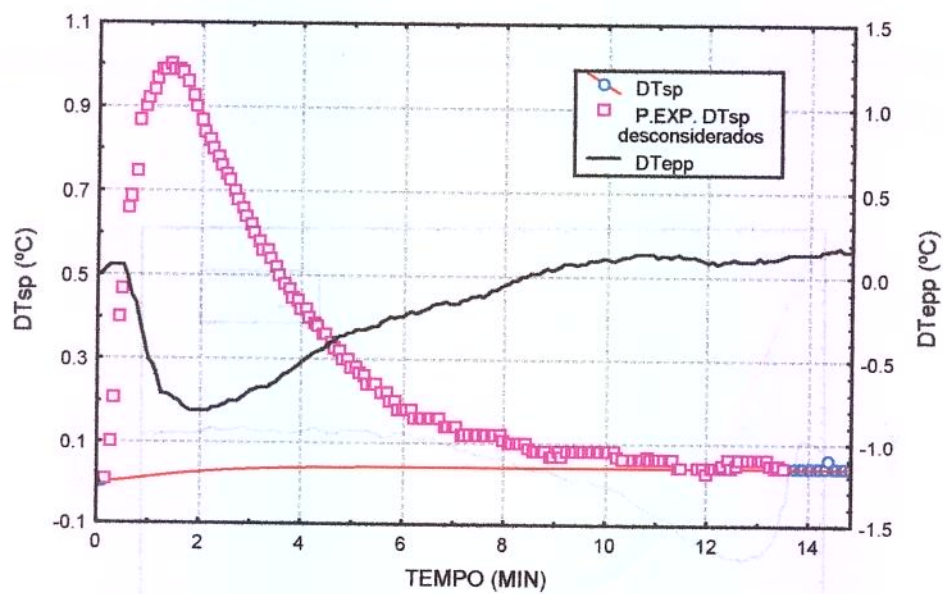


Figura C. 2. 3 - Ensaio 03 de perturbação simultânea do açúcar invertido: [(-3°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (-385L/h) Vpp].

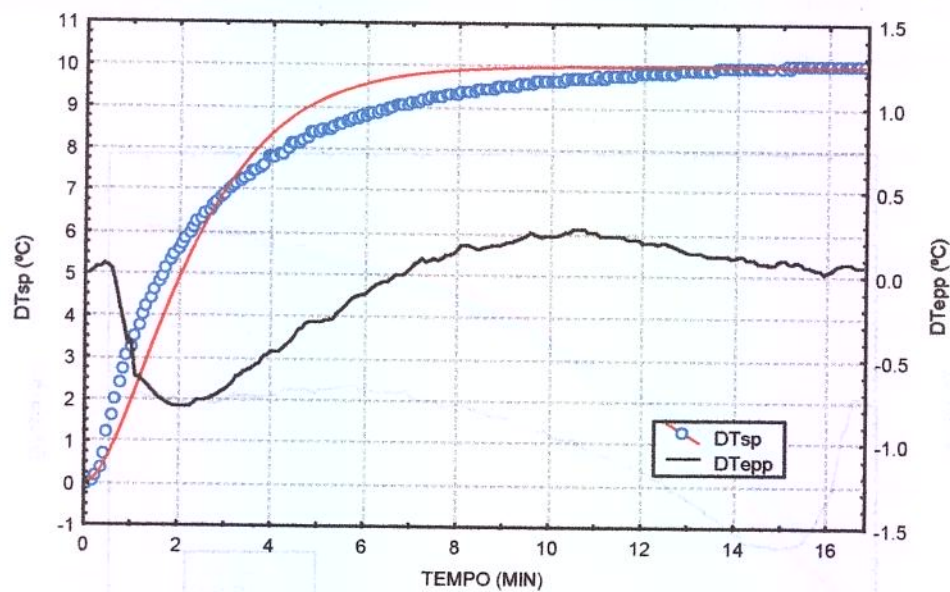


Figura C. 2. 4 - Ensaio 04 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (-385L/h) Vpp].

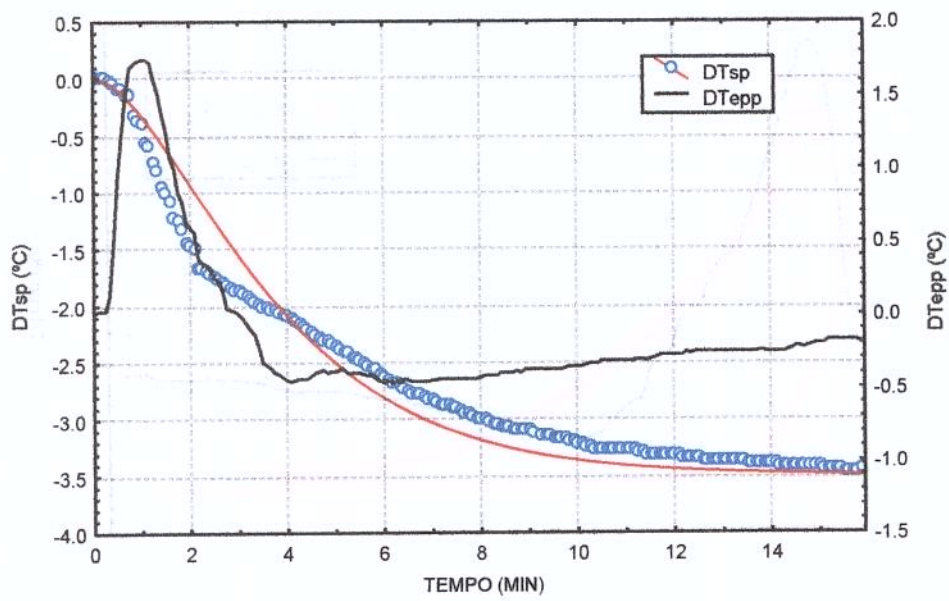


Figura C. 2. 5 - Ensaio 05 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-3°C) Tep, (-35 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].

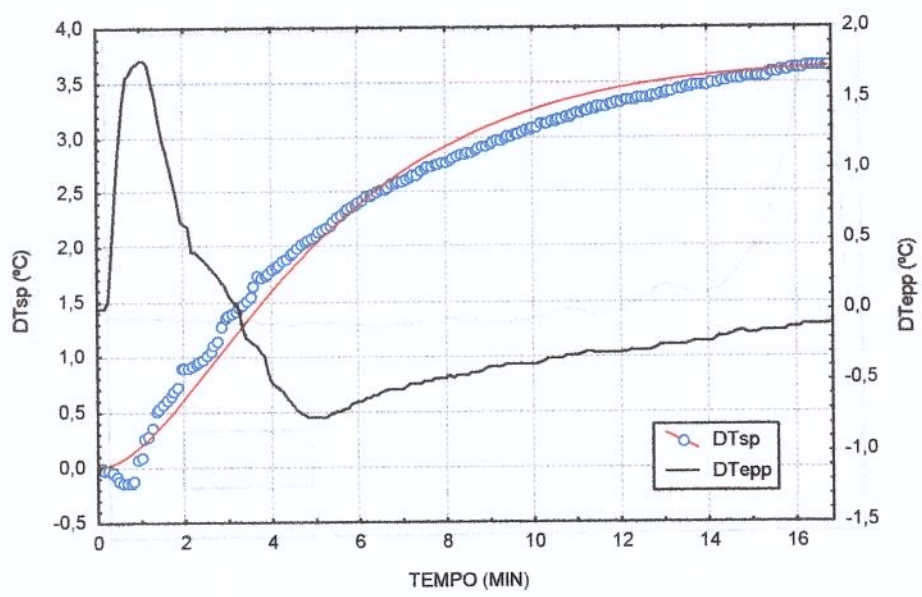


Figura C. 2. 6 - Ensaio 06 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9°C) Tep, (-35 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].

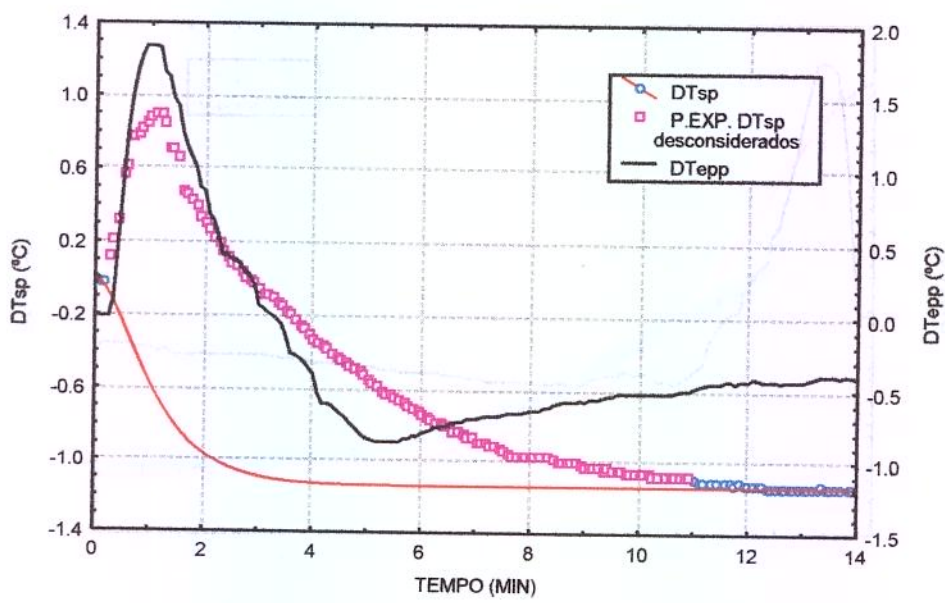


Figura C. 2. 7 - Ensaio 07 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-3°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].

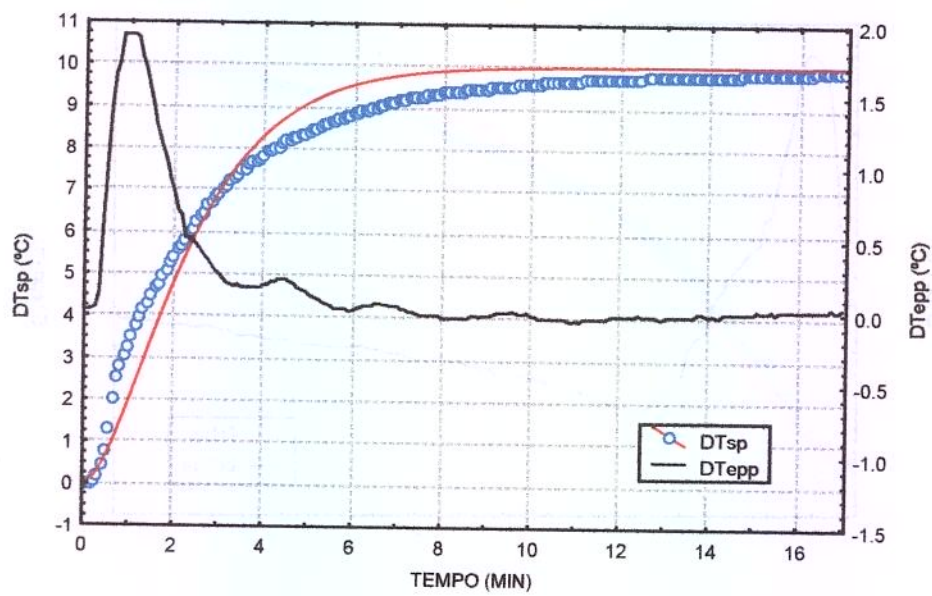


Figura C. 2. 8 - Ensaio 08 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+9°C) Tep, (+105 kg/h) mp, (+1155 L/h) Vpp].

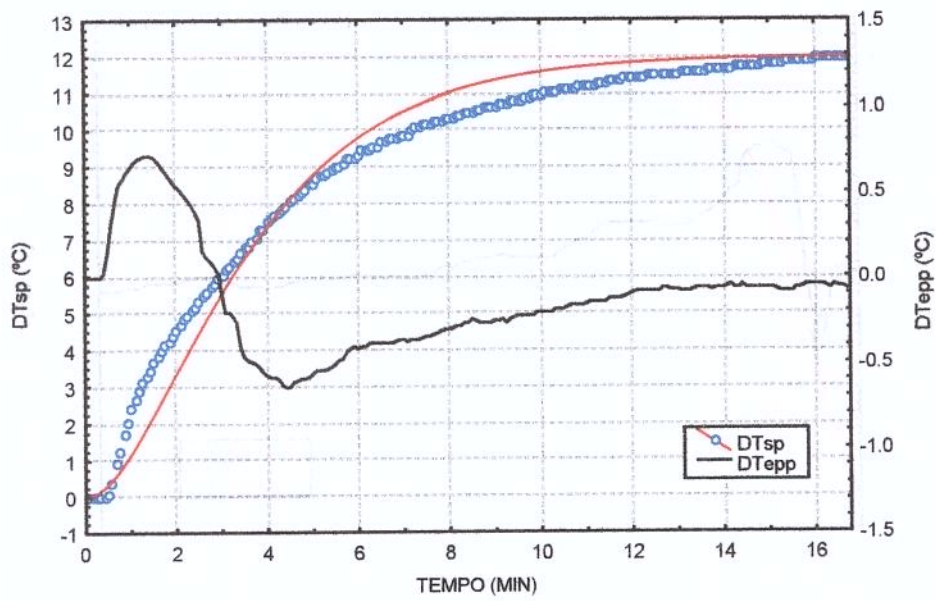


Figura C. 2. 9 - Ensaio 09 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+13,1 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

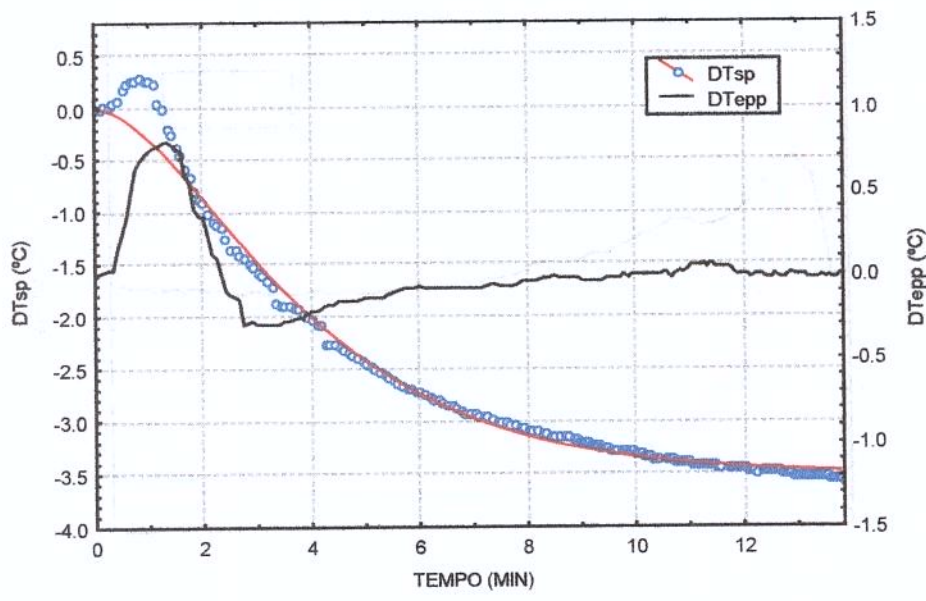


Figura C. 2. 10 - Ensaio 10 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(-7,1 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

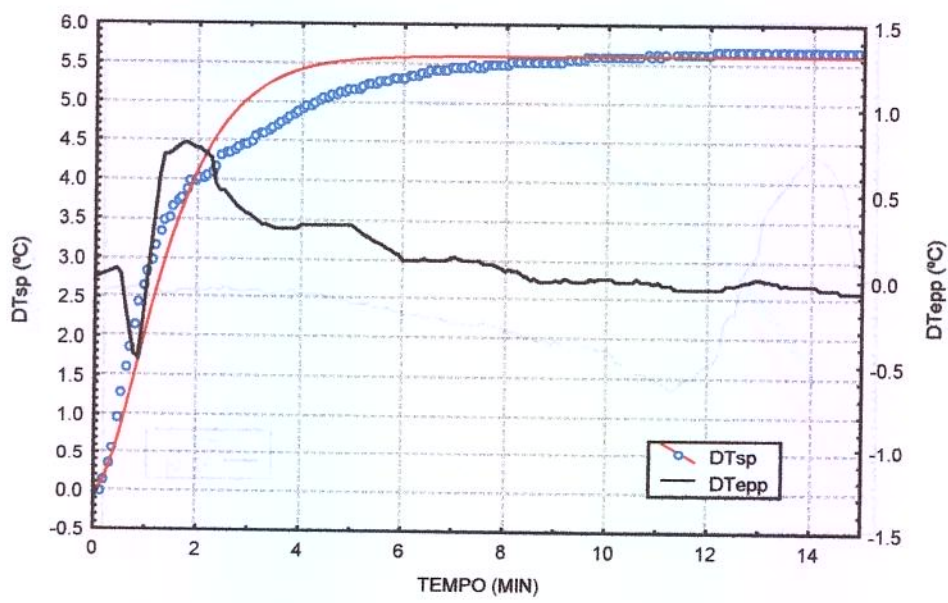


Figura C. 2. 11 - Ensaio 11 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+152,7 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].

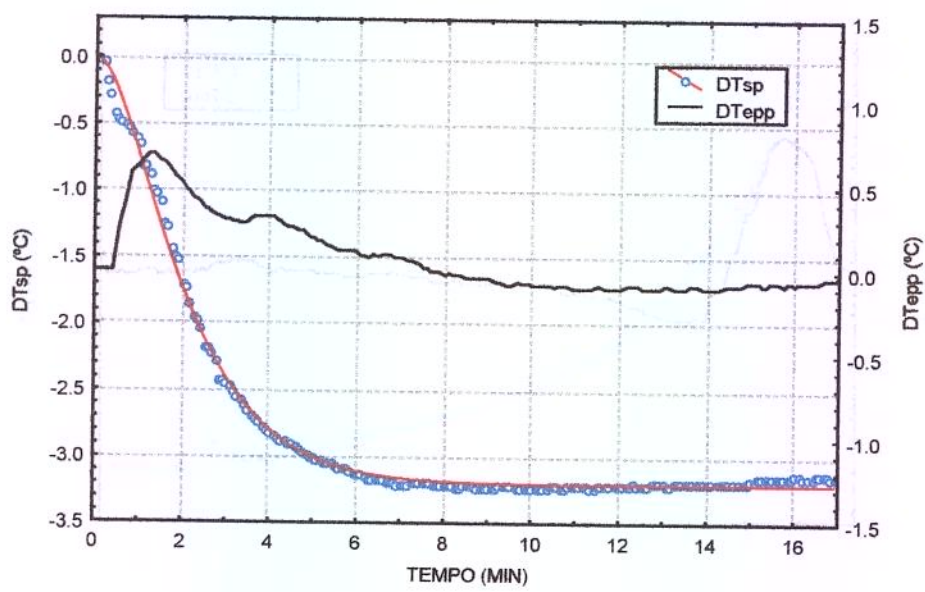


Figura C. 2. 12 - Ensaio 12 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (-82,7 kg/h) mp, (+385L/h) Vpp].

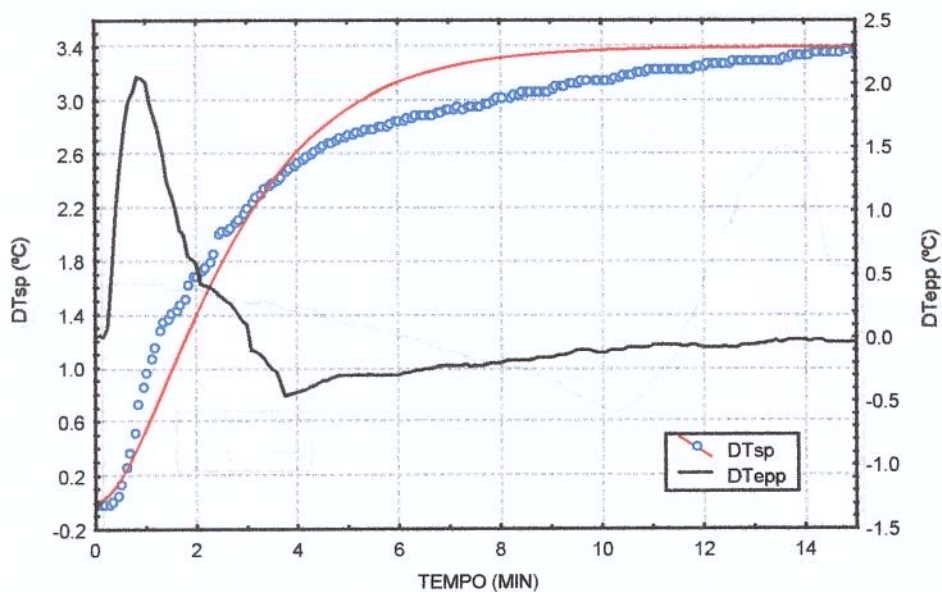


Figura C. 2. 13 - Ensaio 13 de perturbação simultânea do açúcar invertido: [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+1689,9 L/h) Vpp].

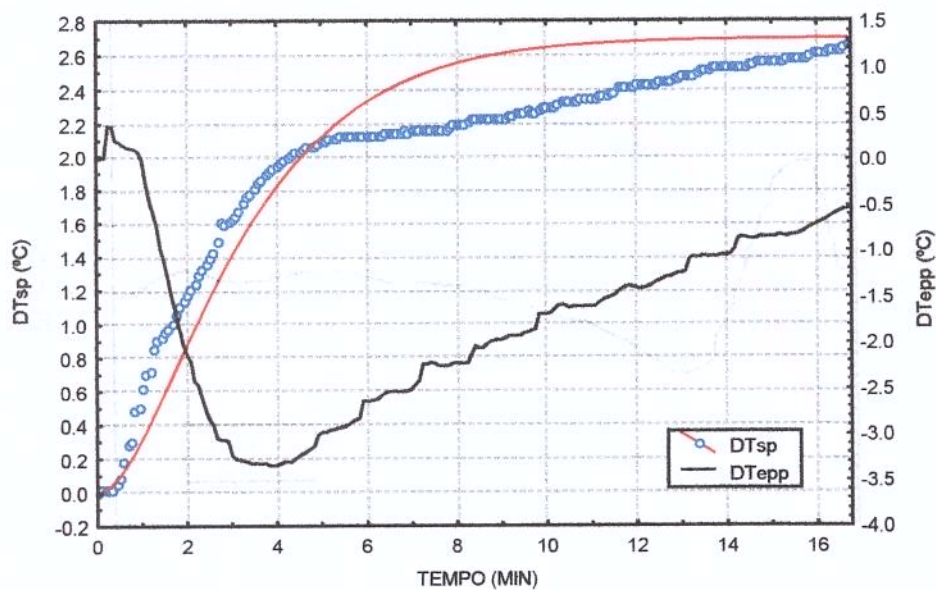


Figura C. 2. 14 - Ensaio 14 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (-909,8 L/h) Vpp].

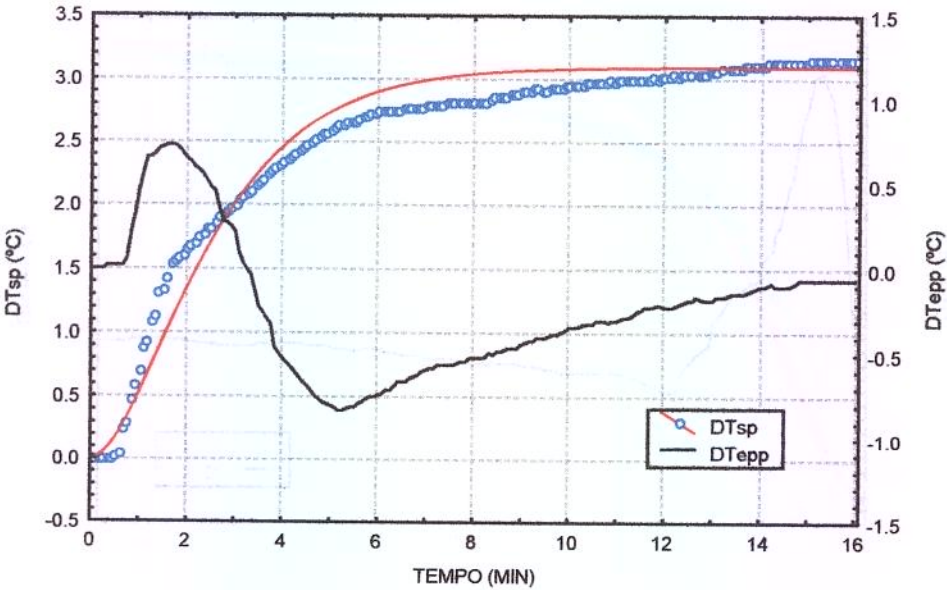


Figura C. 2. 15 - Ensaio 15 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

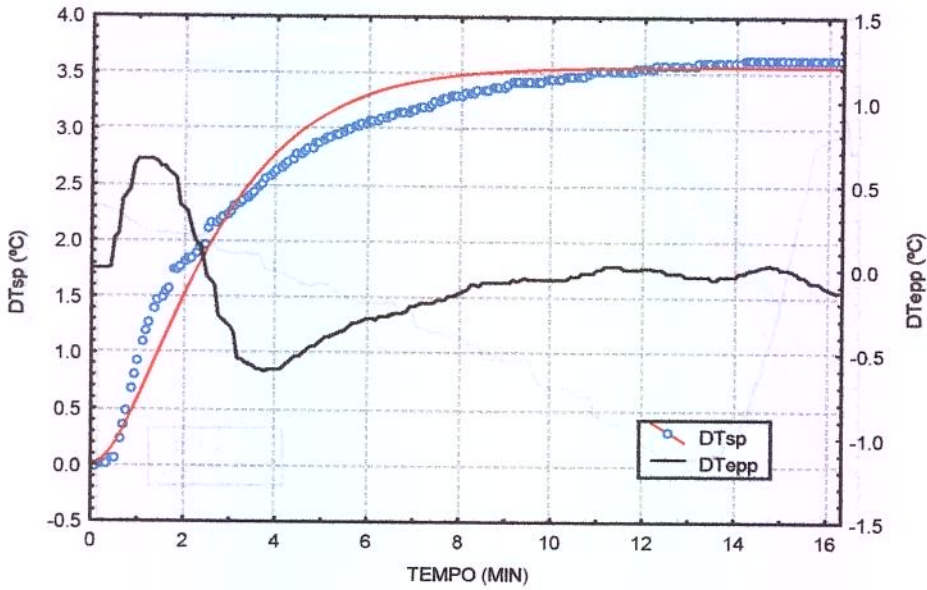


Figura C. 2. 16 - Ensaio 16 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) Tep, (+35 kg/h) mp, (+385 L/h) Vpp].

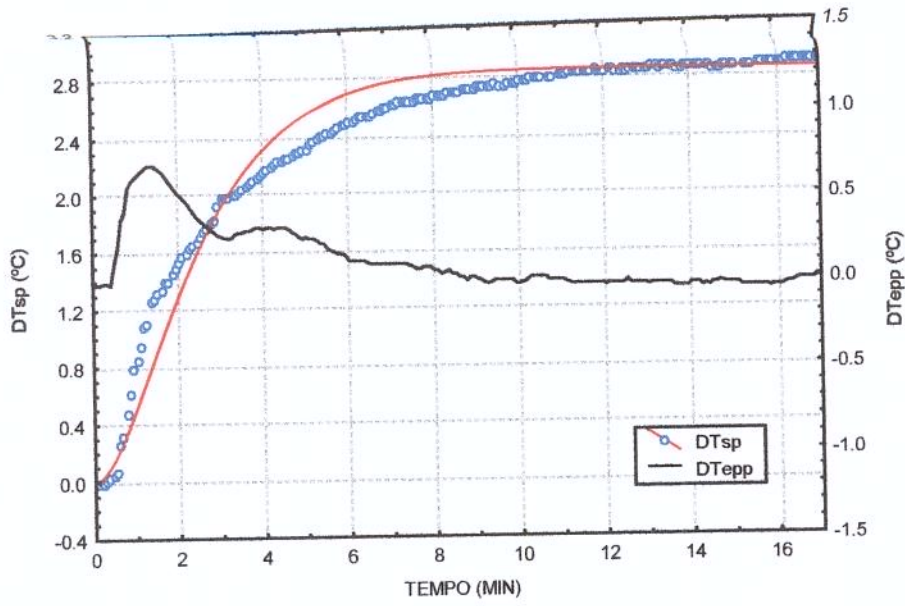


Figura C. 2. 17 - Ensaio 17 de perturbação simultânea do açúcar invertido: perturbação [(+3 °C) T_{ep} , (+35 kg/h) m_p , (+385 L/h) V_{pp}].

