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

AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DOS CONTROLES PID E *FUZZY/*PID NO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO DE FLUIDOS NEWTONIANOS E NÃO-NEWTONIANOS

Armando Castelini Neto Engenheiro de Alimentos

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Junior Orientador

> Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia de Alimentos da Universidade Estadual de Campinas para obtenção de título de mestre em Engenharia de Alimentos

Campinas, março de 2006

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA DA FEA – UNICAMP

Castelini Neto, Armando

C275a Avaliação experimental dos controles PID e Fuzzy/PID no processo de pasteurização de fluidos newtonianos e nãonewtonianos / Armando Castelini Neto. -- Campinas, SP: [s.n.], 2006.

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

1. Pasteurização. 2. Controle PID. 3. Fluido newtoniano. 4. Fluido não-newtoniano. 5. Fuzzy. I. Silveira Junior, Vivaldo. II. Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III. Título.

(cars/fea)

Titulo em inglês: Experimental avaliation of the PID and Fuzzy/PID controls on pasteurization process of newtonian and non newtonian fluids Palavras-chave em inglês (Keywords): Pasteurization, PID control, Newtonian fluids Non-newtonian fluids, Fuzzy Titulação: Mestre em Engenharia de Alimentos Banca examinadora: Vivaldo Silveira Junior Ana Maria Frattini Fileti Maria Isabel Berto Eduardo Augusto Caldas Batista

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior (Orientador – DEA/FEA/UNICAMP)

Prof^a. Dr^a. Ana Maria Frattini Fileti (FEQ/UNICAMP)

> Dr^a. Maria Isabel Berto (GEPC/ITAL)

Prof. Dr. Eduardo A. C. Batista (DEA/FEA/UNICAMP DEA/FEA/UNICAMP)

DEDICATÓRIA

Dedico esta dissertação a minha fantástica mãe Terezinha, pessoa responsável pelo meu sucesso.

Ao meu pai Ademar, por ter sido sempre tão coruja e ter acreditado em mim.

A minha avó Elza e a minha irmã Jamile, pessoas que mais amo neste mundo!

A minha futura esposa que amo muito, Adriana Freitas, pessoa com a qual pretendo viver o resto de minhas vidas

Aos meus verdaderos amigos, irmãos verdadeiros: Bruno, Thiago, Rafael, Ricardo, Aline e Rodrigos, imprescindíveis em minha vida!

A Deus.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Vivaldo, por tudo que fez por mim durante e após o período em que estive na UNICAMP.

A Eveline, pessoa responsável por me fazer largar tudo e vir fazer o mestrado em Campinas. Devo a você a vida que tenho hoje!

A UNICAMP e ao Departamento de Engenharia de Alimentos por ter acreditado em meu potencial e propiciar a oportunidade de realizar essa dissertação de mestrado.

A CAPES, por ter dado todo subsídio para a realização do projeto.

Aos membros da banca, pela disponibilidade e enriquecimento deste trabalho!

Ao pessoal da casa G-9 da moradia da UNICAMP, que me acolheram no momento que mais precisei.

Ao Silmar (Xirú) e Marcio, companheiros inseparáveis de baia e planta piloto, por terem propiciado momentos de descontração e companheirismo ao longo do meu mestrado.

Aos amigos que aqui fiz e tornaram possível momentos inesquecíveis de felicidade que aqui tive.

Ao amigo Izaías (Zazá), que me ajudou muito com os problemas que tive durante a execução da minha parte experimental e pelo companheirismo.

A Patrícia Maki e a Bel Berto, pela ajuda fundamental que tive ao longo do meu desgastante período experimental e de tratamento dos dados.

A Karla, pelos momentos de desabafo (BLHÈÉÈ)!

A todos os colegas do laboratório ao longo desses dois anos, companheiros do cafezinho do LACPA

A Marina, pessoa que tornou possível eu estar trabalhando hoje na Nestlé!

A todas as pessoas que me ajudaram ao longo desses dois maravilhosos anos em que estive no LACPA, que me ajudaram e me incentivaram.

ÍNDICE GERAL

ÍNDIO	CE DE TABELAS	XI
<u>ÍNDI(</u>	CE DE FIGURAS	XIII
<u>NOM</u>	ENCLATURA GERAL	XVIII
<u>RESU</u>	МО	<u> </u>
<u>ABST</u>	RACT	XXII
<u>INTR</u>	ODUÇÃO GERAL	1
<u>REVI</u>	SÃO BIBLIOGRÁFICA E TEÓRICA GERAL	5
1.	O PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO	5
2.	SOLUÇÕES MODELO DE FLUIDOS ALIMENTÍCIOS	6
3.	CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRANSIE	NTE DOS
PROC	CESSOS	7
3.1.	ORDEM DO PROCESSO	7
3.2.	LINEARIDADE DO PROCESSO	8
4.	LÓGICAS DE CONTROLES CONVENCIONAIS	10
4.1.	CONTROLE DE DUAS POSIÇÕES	10
4.2.	CONTROLE PID	10
5.	LÓGICA DE CONTROLE NÃO CONVENCIONAL – CO	ONTROLE
FUZZ	Y	13
6.	ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS CONTROLADORES	19
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	21

<u>CAPÍTU</u>	JLO I. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROCESSO	DE
<u>PASTEU</u>	URIZAÇÃO E DOS FLUIDOS	23
I.1.	RESUMO	23
I.2.	INTRODUÇÃO	24
I.3.	MATERIAL E MÉTODOS	26
I.3.1.	MATERIAL	26
I.3.1.1.	Condições iniciais de processo	26
I.3.1.2.	Escolha do fluido não-newtoniano	28
I.3.2.	Métodos	29
I.3.2.1.	Condições iniciais de processo	29
I.3.2.2.	Escolha do fluido não newtoniano	30
I.4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	31
I.4.1.	Escolha do fluido não newtoniano	31
I.5.	CONCLUSÕES	36
I.5.1.	ESCOLHA DO FLUIDO NÃO NEWTONIANO ENVOLVIDO NO PROCESSO	36
I.5.2.	CARACTERIZAÇÃO DO PROCESSO	36
I.6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	37
,	~	
CAPITU	JLO II. AVALIAÇAO QUALITATIVA DA LINEARIDADE	<u>DO</u>
<u>PROCE</u>	<u>SSO DE PASTEURIZAÇÃO</u>	39
II.1.	RESUMO	39
II.2.	INTRODUÇÃO	40
II.3.	MATERIAL E MÉTODOS	42
II.3.1.	Material	42
II.3.2.	Métodos	43
II.3.2.1.	Obtenção das curvas de reação experimentais do processo	43
II.3.2.2.	Caracterização do sistema quanto à ordem e linearidade	45
Ii.3.2.3.	Análise da sensibilidade do processo de pasteurização	46
II.4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	47
II.4.1.	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA QUANTO À ORDEM E LINEARIDADE	E —
PASTEUR	IZAÇÃO DA ÁGUA	47

II.6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	70
II.5.	CONCLUSÕES	69
II.4.4.	ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO	67
ENVOLVE	ENDO ÁGUA E SOLUÇÃO DE CMC SÓDICA	62
II.4.3.	Comparação da linearidade do processo de pasteuriza	4ÇÃO
PASTEUR	ização da solução de CMC sódica	54
II.4.2.	CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA QUANTO À ORDEM E LINEARIDAD)E –

CAPÍTULO III. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE CONVENCIONAL NOPROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO73

III.1.	RESUMO	73
III.2.	INTRODUÇÃO	74
III.3.	MATERIAL E MÉTODOS	75
III.3.1.	MATERIAL	75
III.3.2.	Métodos	75
III.3.2.1.	Sintonia do controlador PID/feedback	. 76
III.3.2.2.	Avaliação do desempenho do controlador	. 77
III.4.	RESULTADOS E DISCUSSÕES	79
III.4.1.	SINTONIA DO CONTROLADOR PID/FEEDBACK - ÁGUA	79
III.4.2.	SINTONIA DO CONTROLADOR PID/FEEDBACK – SOLUÇÃO DE CMC SÓDICA	80
III.4.3.	ANÁLISE DO DESEMPENHO DOS CONTROLADORES	82
III.4.3.1.	Avaliação do controlador no regime permanente	82
III.4.3.2.	Avaliação do controlador no teste de desempenho de sintonia de malha	83
III.4.3.3.	Avaliação do controlador sob perturbações de carga	90
III.5.	CONCLUSÕES	98
III.6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	99

IV.2.	INTRODUÇÃO			102
IV.3.	MATERIAL E MÉTOR	OOS		103
IV.3.1.	MATERIAL			103
IV.3.2.	Métodos			103
IV.3.2.1.	Implementação	do	controlador	fuzzy
	103			
IV.3.2.2.	Sintonia do controlado	r <i>fuzzy</i> /PID		105
IV.3.2.3.	Avaliação do desemper	nho do control	ador	105
IV.4.	RESULTADOS E DISC	CUSSÕES		106
IV.4.1.	SINTONIA DO CONTROLAD	or Fuzzy/PII	D/FEEDBACK – ÁGUA	106
IV.4.2.	SINTONIA DO CONTROLA	dor Fuzzy/I	PID/Feedback – solução de	CMC
SÓDICA				
107				
IV.4.3.	ANÁLISE DO DESEMPENHO	DOS CONTROL	LADORES	108
IV.4.3.1.	Avaliação do controlac	lor no regime	permanente	108
IV.4.3.2.	Avaliação do controlad	lor no teste de	eficiência de sintonia de malha	110
IV.4.3.IV	4.3.3 AVALIAÇÃO I	DO CONTRO	LADOR SOB PERTURBAÇÕE	S DE
CARGA	116			
IV.5.	CONCLUSÕES			123
IV.6.	REFERÊNCIAS BIBLI	OGRÁFICAS	S	124
<u>CAPÍTU</u>	LO V. COMPARAÇÃO	<u>) ENTRE OS</u>	S CONTROLES PID E FUZZ	<u>Y/PID</u>
NO PRO	CESSO DE PASTEURI	ZAÇÃO		127
V.1.	RESUMO			127
V.2.	INTRODUÇÃO			128
V.3 .	MATERIAL E MÉTOR	OOS		128
V.3.1.	MATERIAL			128
V.3.2.	Métodos			129
V.4 .	RESULTADOS E DISC	CUSSÕES		129
V.4.1.	Comparação do desem	PENHO DOS C	ONTROLADORES – PASTEURIZAÇ.	ÃO DA
ÁGUA				
129				

V.4.2.	Comparação do desempenho dos controladores -	- PASTEURIZAÇÃO DA
SOLUÇÃO	DE CMC SÓDICA	132
V.5.	CONCLUSÕES	138
V.6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

CONCLUSÕES GERAIS	141

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS	143
	175

ANEXOS	145
--------	-----

ANEXO I : PARÂMETROS DO AJUSTE DAS CURVAS DE REAÇÃO DA TEMPERATURA DE
PASTEURIZAÇÃO PARA A ÁGUA E PARA A SOLUÇÃO DE CMC SÓDICA 145
ANEXO II : VALORES ABSOLUTOS E RELATIVOS DOS GANHOS PARA CADA
INTENSIDADE DE PERTURBAÇÃO DA VAZÃO DE ÁGUA QUENTE - PASTEURIZAÇÃO DA
ÁGUA E SOLUÇÃO DE CMC SÓDICA 149
ANEXO III : DADOS DAS PROPRIEDADES TERMOFISICAS E REOLÓGICAS E NÚMEROS
ADIMENSIONAIS PARA A ÁGUA E SOLUÇÃO DE CMC SÓDICA 150
ANEXO IV : PROGRAMA DE IMPLEMENTAÇÃO DO FUZZY NO AIMAX

ÍNDICE DE TABELAS

CAPÍTULO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tabela 1	- Parâmetros sugeridos por Ziegler-Nichols para sintonia do controlador PI	$D - 2^{\circ} m \acute{e} to do. 13$
Tabela 2	– Base de regras proposta por Li (1997) para ação direta do controlador	17

CAPÍTULO I

Tabela I.1	–Aferição da bomba de água quente*.	32
Tabela I.2	- Características do regime permanente da pasteurização da água.	33
Tabela I.3	- Características do regime permanente da pasteurização da solução de CMC sódica.	33
Tabela I.4	– Especificações do tubo de retenção	35

CAPÍTULO II

Tabela II.1	– Perturbações de vazão de água quente realizadas na pasteurização da água	43
Tabela II.2	- Perturbações de vazão de água quente realizadas na pasteurização da solução de CM	1C
sódica		44
Tabela II.3	- Perturbações de carga na temperatura da água realizadas na seção de aquecimento	44
Tabela II.4	- Perturbações de carga na temperatura da solução de CMC sódica realizadas na se	eção
de aquecimen	to	44

CAPÍTULO III

Tabela III.1	- Intensidade de perturbações de carga na seção de aquecimento para	avaliação do
desempenho d	do controle PID/feedback.	78
Tabela III.2	- Valores obtidos dos parâmetros de sintonia pelo método de Aström e Ha	ugglund (1984)
para a pasteruzação da água. 80		
Tabela III.3	- Valores obtidos dos parâmetros de sintonia pelo método de Aström e Ha	ugglund (1984)
para a pasteu	ırização da soluçao de CMC sódica.	81
Tabela III.4	- Parâmetros de re-sintonia para a malha de controle da temperatura de pa	steurização da
água		86
Tabela III.5	– Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbaç	ão de set point
na temperatu	ra de pasteurização da água.	87
Tabela III.6	– Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbaç	ão de set point
na temperatu	ra de pasteurização da solução de CMC sódica.	90
Tabela III.7	– Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbaç	ão de carga na
temperatura d	da água e da solução de CMC sódica.	95

CAPÍTULO IV

Tabela IV.1	- Base de regras proposta por Li (1997) para ação direta do controlador.	104
Tabela IV.2	- Intensidade de perturbações de carga na seção de aquecimento para	avaliação do
desempenho	do controle fuzzy/PID/feedback.	105
Tabela IV.3	– Parâmetros de sintonia e re-sintonia dos fatores de escala para o controlad	dor fuzzy/PID
obtidos a par	tir da sintonia do controle PID na temperatura de pasteurização da água	107
Tabela IV.4	– Parâmetros de sintonia dos fatores de escala obtidos para o controlador j	fuzzy a partir
da sintonia d	o controle PID na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.	108
Tabela IV.5	– Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação	o de set point
na temperatu	ra de pasteurzação da água	113
Tabela IV.6	– Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação	o de set-point
na temperatu	ra de pasteurzação da solução de CMC sódica.	116
Tabela IV.7	– Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação	o de carga na
temperatura	de produto	121
Tabela IV.8	– Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação	o de carga na
concentração	o da solução de CMC sódica.	123

CAPÍTULO V

Tabela V.1– Indices de erro e desempenho dos controladores sob perturbações de carga positivas e
negativas na temperatura de entrada da água.132Tabela V.2– Indices de erro e desempenho dos controladores sob perturbação de carga na
temperatura de entrada da solução de CMC sódica.135Tabela V.3– Indices de erro e desempenho dos controladores sob perturbações de carga positiva e
negativa na concentração de entrada da solução de CMC sódica.138

ANEXOS

Tabela 1	- Valores de densidade, viscosidade e do número de Prandtl para água	150
Tabela 2	- Valores de densidade para a solução de CMC sódica	151
Tabela 3	– Especificações da placa e valor do Diâmetro Hidráulico D_T	151
Tabela 4	- Valores de densidade, viscosidade e calor específico para a solução de CMC sódica	152
Tabela 5	– Valores de número de Prandtl para a solução de CMC sódica	152
Tabela 6	– Valores de Reynolds a diferentes temperaturas para água	153
Tabela 7–	Valores de Reynolds a diferentes temperaturas e concentrações para a solução de	СМС
sódica, a u	ma vazão de 250 kg/h.	154

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO DE REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Figura 1	- Curva de reação generalizada de um processo.	11
Figura 2	– Curva de reação do processo sob perturbação chaveada da variável manipulada.	12
Figura 3	- Esquema de funcionamento de um controlador Fuzzy	14
Figura 4	- Fuzzificação do valor de erro para as funções de pertinência triangulares de	entrada
definidas p	para o processo de aquecimento de água.	15
Figura 5	- Defuzzificação do valor de erro para as funções de pertinência triangulares d	le saída
definidas p	para o processo de aquecimento de água.	16
Figura 6	– Esquema do controle Fuzzy/PID proposto por Li (1997)	17

CAPÍTULO I

Figura I.1	– Estrutura da planta piloto do LACPA	27
Figura I.2	–Estrutura básica de uma rede híbrida analógica.	28

CAPÍTULO II

Figura II.1 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T0 = 53,7^{\circ}C$). 48 Figura II.2 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 58, 7^{\circ}C$). 48 Figura II.3 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 63, 7^{\circ}C$). 49 Figura II.4 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação no 1º nível de intensidade de vazão de água quente (±65,4 L/h).. 50 Figura II.5 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação no 2º nível de intensidade de vazão de água quente(±130,6 L/h). 50 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de Figura II.6 aquecimento após perturbação no 3° nível de intensidade de vazão de água quente(±195,7 L/h). 51 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de Figura II.7 aquecimento após perturbações de carga na temperatura de entrada de produto. 52 Figura II.8 - Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor da água na 52 seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 53,7^{\circ}C$). Figura II.9 - Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 58, 7^{\circ}C$). 53 Figura II.10 - Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 63,7^{\circ}C$). 53

Figura II.11- Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor na seção deaquecimento após perturbação de carga na temperatura de entada de produto.54

Figura II.12 - *Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente (T_0 = 35,6^{\circ}C).* 55

Figura II.13 - *Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente (T_0 = 40,6^{\circ}C).* 55

Figura II.14 - *Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente (T_0 = 45,6^{\circ}C).* 56

Figura II.15 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação no 1º nível de intensidade da vazão de água quente. (±65,5 L/h). 57

Figura II.16 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação no 2º nível de intensidade na vazão de água quente (±130,9 L/h). 57

Figura II.17 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação no 3º nível de intensidade da vazão de água quente (±196,2 L/h). 58

Figura II.18- Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódicada seção de aquecimento após perturbações de carga na temperatura de entrada de produto.59

Figura II.19 - Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 35,6^{\circ}$ C). 60

Figura II.20- Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferênciade calor sódica na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 40,6^{\circ}$ C).60Figura II.21- Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferênciade calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 45,6^{\circ}$ C).61

Figura II.22- Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferênciana seção de aquecimento após perturbação de carga na temperatura de entada de produto.61

Figura II.23- Ganho relativizado da temperatura de pasteurização da água em função dasintensidades de perturbação na vazão de água quente.62

Figura II.24Valores da constante de tempo das curvas de reação da temperatura de pasteurizaçãoda água em função das intensidades de perturbação na vazão de água quente.63

Figura II.25Ganho relativizado da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica emfunção das intensidades de perturbação na vazão de água quente.64

Figura II.26Valores da constante de tempo das curvas de reação da temperatura de pasteurização
da solução de CMC sódica em função das intensidades de perturbação na vazão de água quente.65Figura II.27Valores do ganho relativoda constante de tempo das curvas de reação da temperatura
de pasteurização da solução de CMC sódica e da água em função das intensidades de perturbação na
vazão de água quente.66

Figura II.28 – Variação do Número de Prandtl da água e da solução de CMC sódica em função da temperatura.
67

Figura II.29– Variação do Número de Reynolds para a água a diferentes velocidades de
escoamento em função da temperatura.68Figura II.30– Variação do Número de Reynolds para a solução de CMC sódica a diferentes
concentrações para uma vazão de 250 L/h, em função da temperatura.69

CAPÍTULO III

Figura III.1 – Comportamento da oscilação sustentada da temperatura da água após chaveamento da
vazão de água quente com tempo de chaveamento de 18 segundos. 79
Figura III.2 - Comportamento da oscilação sustentada da temperatura da solução de CMC sódica
após chaveamento da vazão de água quente com tempo de chaveamento de 9 segundos. 81
Figura III.3 – Comportamento do controlador PID/ feedback sob regime permanente para a
pasteurização da água. 82
Figura III.4 – Comportamento do controlador PID/ feedback sob regime permanente para a
pasteurização da solução de CMC sódica. 83
Figura III.5 – Comportamento do controlador PID/ feedback antes da re-sintonia após perturbação de
+1,5°C na temperatura de pasteurização da água. 84
Figura III.6 – Comportamento do controlador PID/ feedback re-sintonizado após perturbação de
+1,5°C na temperatura de pasteurização da água. 85
Figura III.7 – Comportamento do controlador PID/ feedback re-sintonizado após perturbação de -
1,5°C na temperatura de pasteurização da água. 86
Figura III.8 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de 1,5°C na
temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica. 88
Figura III.9 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de -1,5°C na
temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica. 89
Figura III.10 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de +3,4°C
na temperatura de entrada da água. 91
Figura III.11 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de -3,3°C
na temperatura de entrada da água. 92
Figura III.12 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de +4,0°C
na temperatura de entrada da solução de CMC sódica. 93
Figura III.13 – Comportamento do controlador PID/ feedback após perturbação de carga de -3,9°C
na temperatura de entrada da solução de CMC sódica. 94
Figura III.14 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de +0,2%
m/m na concentração de entrada de produto. 96
Figura III.15 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de -0,2%
m/m na concentração de entrada de produto. 97

CAPÍTULO IV

Figura IV.1 - Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback sob regime permanente para a
pasteurização da água. 109
Figura IV.2 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback sob regime permanente para a
pasteurização da solução de CMC sódica 110
Figura IV.3 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de +1,5°C na
temperatura de pasteurização da água. 111
Figura IV.4 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de -1,5°C na
temperatura de pasteurização da água. 112
Figura IV.5 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de +1,5°C na
temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica. 114
Figura IV.6 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de -1,5°C na
temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica. 115
Figura IV.7 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de carga de
2,9°C na temperatura de entrada da água. 117
Figura IV.8 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de carga de -
3,0°C na temperatura de entrada da água. 118
Figura IV.9 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de carga de
3,8°C na temperatura de entrada da solução de CMC sódica. 119
Figura IV.10 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/ feedback após perturbação de carga de -
3,8°C na temperatura de entrada da solução de CMC sódica 120
Figura IV.11 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de carga de
+0,2% m/m na concentração de entrada da solução de CMC sódica. 122
Figura IV.12 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/feedback após perturbação de carga de -
0,2% m/m na concentração de entrada da solução de CMC sódica. 122

CAPÍTULO V

Figura V.1	- Comportamento dos controladores após perturbação de carga positiva na temperatur	а
de entrada da	n água. 13	0
Figura V.2	- Comportamento dos controladores após perturbação de carga negativa na temperatur	а
de entrada da	n água. 13	1
Figura V.3	- Comportamento dos controladores após perturbação de carga positiva na temperatur	а
de entrada da	a solução de CMC sódica 13	3
Figura V.4	– Comportamento dos controladores após perturbação de carga negativa na temperatur	а
de entrada da	a solução de CMC sódica.	4
Figura V.5	. – Comportamento dos controladores após perturbação de carga positiva n	а
concentração	o de entrada da solução de CMC sódica. 13	6

Figura V.6– Comportamento dos controladores após perturbação de carga negativa na concentraçãode entrada da solução de CMC sódica.137

NOMENCLATURA GERAL

А	Magnitude ou intensidade de perturbação da variável manipulada
A _{TR}	Área transversal de troca de calor
Bu	Ganho estático do processo (K.A)
С	Concentração (%m/m)
c _p	Calor específico (KJ/Kg.K)
CMC	Polímero Carboximetilcelulose
D	Diâmetro da tubulação (m)
D _T	Diâmetro hidráulico (m)
e	Erro de uma variável de processo monitorada
Δe	Variação do erro de uma variável de processo monitorada
es	erro de sobressinal
Feedback	estratégia de controle: controle realimentado
$\mathbf{f}_{\mathbf{z}}$	valor posicional da saída do controle fuzzy
G(s)	Função de transferência no domínio Laplaciano
HTST	Processo de pasteurização High Temperature Short Time
Ι	Amplitude de resposta, pico a pico, de um sistema em oscilação sustentada
IAE	Índice do valor absoluto do erro (°C)
ISE	Índice do valor absoluto do erro ao quadrado (°C ²)
ITAE	Índice do valor absoluto ponderado do erro (°C.min)
К	Ganho estático do processo
K ₀ ,K _e ,K ₁ ,K _d	Fatores de escala do controlador Fuzzy, proposto por Li (1998)
K _c	Parâmetro do ganho proporcional proporcional do controle PID

K _{cr}	Ganho crítico de um sistema em malha aberta
m	Índice de consistência de um fluido pseudoplástico (Pa.s ⁿ)
n	Índice de comportamento de um fluido pseudoplástico (adimensional)
nRPN	Número de desempenho robusto não-linear
Nu	Número de Nusselt
P _{cr}	Período crítico de um sistema em oscilação sustentada
PID	Controle convencional Proporcional, Integral, Derivativo
PME	Enzima Pectinametilesterase
Pr	Número de Prandtl
Re	Número de Reynolds
SISO	Estratégia de controle: single input, single output
Т	Temperatura
t _{ac}	Tempo de acomodação (s)
ТСР	Trocador de Calor a Placas
T _D	Tempo de atraso da estratégia feedback (s)
t _{res}	Tempo de residência de produto no tubo de retenção (s)
ts	Tempo de sobressinal (s)
U	Coeficiente global de transferência de calor (W/m ² .K)
u(s)	Função de perturbação do sistema no domínio Laplaciano
u _f	Velocidade média de escoamento do produto (m/s)
y(s)	Função de saída no domínio Laplaciano
y(t)	Comportamento temporal da saída do sistema
y _{sp}	Valor de set point

Símbolos Gregos

$ au_{ m i}$	Tempo integral – Parâmetro do controlador PID (s)
$ au_{d}$	Tempo derivativo – Parâmetro do controlador PID (s)
يح	Fator de amortecimento
τ	Constante de tempo – coeficiente da função de transferência (s)
ρ	Densidade (kg/m ³)
θ	Ângulo formado pela reta tangente ao ponto de inflexão da curva de reação do processo
μ	Viscosidade da solução (Pa.s)

RESUMO

O trabalho consistiu em avaliar a linearidade do processo de pasteurização HTST na seção de aquecimento, verificar a diferença de sintonia entre as estratégias de controles convencionais (PID) e não convencionais (fuzzy/PID) e avaliar e comparar a eficiência desses controladores quando processados em fluidos newtoniano e não-newtoniano. O pasteurizador utilizado foi a placas de 3 seções (regeneração, aquecimento com retenção e resfriamento). O fluido newtoniano utilizado foi água e o não-newtoniano uma solução aquosa de 0,5% m/m de Carboximetilcelulose (CMC) sódica. Os binômios tempo/temperatura foram aferidos para cada fluido envolvido no processo com base nas limitações do trocador de calor e do controle das utilidades. Para a avaliação qualitativa da linearidade, as curvas de reação do processo foram analisadas pelo método da superposição sugeridos por Ogata (1985), subsidiado pela análise do fator de sensibilidade do coeficiente global de transferência de calor "U", avaliando a variação das propriedades termofísicas da água e solução aquosa de CMC frente às mudanças das temperaturas de entrada e de saída desses fluidos na seção de aquecimento. Ambos os processos apresentaram comportamento não linear; porém, o processo é mais nãolinear quando utilizada a solução de CMC sódica. A partir das curvas de resposta, foram obtidos os parâmetros de sintonia do PID/feedback pelo método de Aström e Hägglund (1984) e com esses foram obtidos os parâmetros de sintonia do controle *fuzzy*/PID pelo método de Li (1997). A variável controlada foi a temperatura de pasteurização na saída do tubo de retenção e a manipulada a vazão de água quente no trocador. Os controles foram testados, avaliados e comparados através dos índices de erros absolutos IAE, ITAE e ISE, fazendo-se perturbações de *set-point* na temperatura de saída da seção de aquecimento, com a seção de regeneração desativada para teste de eficiência de sintonia; e perturbações de carga na temperatura de entrada dos produtos no pasteurizador com as seções de regeneração e aquecimento integradas. Especificamente para o fluido não-newtoniano, também foi alterada sua concentração de entrada. Os valores obtidos dos parâmetros da sintonia foram diferentes para cada um dos fluidos pasteurizados. O controle PID teve bom desempenho para ambas as perturbações de setpoint e de carga no caso da água, o que não aconteceu quando se utilizou a solução de CMC sódica, principalmente no caso da perturbação da sua concentração.de entrada. Este desempenho inferior foi superado pelo uso do controle Fuzzy/PID que mostrou melhor desempenho perante às perturbações de carga e set-point.

ABSTRACT

The goal of this work was to evaluate the pasteurization process linearity in heat and cooling sections, to check if it would have tuning differences between conventional (PID) and non-conventional (fuzzy) control strategies and evaluate and compare these controllers performance when processed a Newtonian and a non-Newtonian fluid. A Plate Heat Exchanger with three sections (regeneration, heating with retention and cooling) was used. The Newtonian fluid used was water and the non-Newtonian fluid was a 0,5% w/w water based solution of Sodium Carboxymethyl cellulose (CMC). The temperature/time residence was achieved to both fluids based on the limitations of the heat exchange and the utilities control. To qualitative linearity evaluation, the gain curves were analyzed by the superposition method suggested by Ogata (1985), subsided by the sensibility factor analysis of the heat transfer global coefficient "U", evaluating the thermo physical properties variation in addiction to inlet and outlet temperature changes of this fluids in the heating section. The analysis showed that both systems presented nonlinear behavior; however, the most non-linear process was the one that sodium CMC was used. The PID/feedback tuning parameters were obtained from the gain curves, using Aström e Hägglund (1984) method and these parameters were used to obtain the *fuzzy*/PID/feedback tuning parameters by Li (1997) method. The controlled variable was the pasteurization temperature and the manipulated variable was the hot water flow. The controls were evaluated and compared through the absolute errors indexes IAE, ITAE e ISE indexes, by doing *set point* disturbances in the outlet heating section temperature, with the regenaration section turned off to tuning efficiency test and changing the inlet fluid temperature with both regeneration and heating section turned on. In the non-newtonian fluid case, the inlet concentration was also modified. The presented tuning parameters were different to both pasteurized fluids. The PID/feedback strategy had good performance after disturbances in the inlet temperature in the case of water, what did not happened when CMC water based solution was used. This lower performance was supplied by the use of the PID/Fuzzy/feedback strategy, that showed better performances after *set-point* and charge disturbances.

INTRODUÇÃO GERAL

A constante busca na melhoria da qualidade dos alimentos pela indústria é conseqüência da exigência que, tanto o mercado consumidor quanto a legislação vigente fazem atualmente e da busca pela minimização de erros em processos, que aumenta em decorrência desses fatos. Uma alternativa adotada nos últimos anos tem sido a automação e a implementação de estratégias de controle nas linhas industriais com a finalidade de se obter produtos sujeitos a menor variabilidade de processo e, conseqüentemente, a um elevado valor agregado final.

Processos de transformação de alimentos, da matéria-prima ao produto final, são um tanto quanto complexos, e dificilmente ocorrem em regime estacionário. Plantas integradas, alta escala de produção e, principalmente, o uso humano como atuador do controle do processo contribuem para que estes processos estejam susceptíveis a falhas que causam sérias conseqüências, tanto de ordem econômica como de qualidade e integridade do produto. A implantação de um bom sistema de supervisão do processo pode ser uma boa alternativa, aliado a estratégias de controle adequadas.

Estratégias convencionais, como o controle Proporcional, Integral e Derivativo (PID) tem sido amplamente utilizadas nos processos de tratamento térmico de sucos (pasteurização). A lógica não-convencional *fuzzy* tem sido aplicada em alguns processos industriais apesar de ter sido pouco explorada. Alguns dos prováveis motivos podem ser ainda a falta de conhecimento desta lógica, custo de implementação e a pequena quantidade de estudos que comprovem a eficiência de seu uso em processos industriais.

A sintonia dos controladores é dependente do grau de linearidade do processo, que é função das propriedades termofísicas e reológicas de escoamento do fluido, dependentes da sua composição centesimal e principalmente da presença ou não de elementos que induzem à formação de suspensões. Dependendo do grau de nãolinearidade do processo, o uso do controle convencional (PID) pode não ser satisfatório. Mesmo assim, este é utilizado na indústria com a mesma sintonia para a pasteurização de diferentes fluidos. Este arriscado prognóstico pode não garantir a uniformidade de inativações microbiológicas e enzimáticas do produto e ser responsável pela degradação nutrientes e compostos responsáveis pelo sabor e aroma, comprometendo definitivamente a sua qualidade e a integridade final.

Diante do exposto, coloca-se a seguinte hipótese a ser confirmada: os processos de pasteurização de fluidos newtonianos e não-newtonianos são melhores controlados com lógica *fuzzy*/PID/*feedback* do que com lógica PID/*feedback*

Assim sendo, o presente trabalho apresenta os seguintes objetivos:

- Avaliar e comparar a linearidade do processo de pasteurização de um fluido newtoniano (água) e outro não-newtoniano (solução aquosa de CMC sódica) na seção de aquecimento de um pasteurizador a placas de três seções;
- Verificar a influência da linearidade do processo de pasteurização de cada um dos produtos, na sintonia e desempenho (efetividade) dos controles convencionais (PID/*feedback*) e não convencionais (*fuzzy*/ PID/*Feedback*), apenas na seção de aquecimento sob interferência da seção de regeneração;

Para apresentar os resultados obtidos e facilitar sua compreensão, a dissertação foi dividida em 5 capítulos, a seguir descritos resumidamente:

• Capítulo I: Características gerais do processo de pasteurização dos fluidos newtoniano e não-newtoniano.

Este capítulo apresenta a escolha do fluido newtoniano e não newtoniano a serem pasteurizados, a aferição dos regimes estacionários dos processos envolvendo cada um dos fluidos e a definição dos binômios temperatura/tempo utilizados.

• Capítulo II: Avaliação qualitativa da linearidade no processo de pasteurização.

Neste capítulo, o principal objetivo foi obter as curvas de reação dos processos de pasteurização da água e da solução de CMC sódica na seção de aquecimento e caracterizá-las quanto à ordem e a linearidade qualitativa. Como subsidio, utilizou-se a análise do fator de sensibilidade das propriedades térmicas e reológicas de ambos os fluidos pasteurizados.

• Capítulo III: Implementação do controle convencional no processo de pasteurização.

Este capítulo consistiu em descrever a implementação do controle PID/*Feedback* na seção de aquecimento e avaliar sua eficácia na pasteurização de cada produto após perturbações no sistema. Inicialmente, fez-se perturbações de *set-point* na temperatura de saída do produto da seção de aquecimento com a seção de regeneração desativada, com o objetivo de testar a sintonia da malha. Após, com a seção de regeneração ativada, fez-se perturbações de carga no sistema, com o objetivo de testar a eficiência do controlador. Destaca-se que as sintonias foram realizadas na seção de aquecimento e o processo controlado é a planta integrada, onde a seção de regeneração promove alterações intrínsecas na temperatura de entrada da seção de aquecimento avaliada.

• Capítulo IV: Implementação do controle *Fuzzy* no processo de pasteurização.

Este capítulo consistiu em descrever a implementação do controle *fuzzy*/PID/*Feedback* na seção de aquecimento, utilizando a metodologia proposta por Li (1997), avaliando sua eficácia na pasteurização de cada produto após perturbações no sistema. Inicialmente, fez-se perturbações de *set-point* na temperatura de saída do produto da seção de aquecimento com a seção de regeneração desativada, com o objetivo de testar a sintonia da malha. Após, com a seção de regeneração ativada, fez-se perturbações de carga no sistema, com o objetivo de testar a eficiência do controlador. Destaca-se, mais uma vez, que as sintonias foram realizadas na seção de aquecimento e

o processo controlado é a planta integrada, onde a seção de regeneração promove alterações intrínsecas na temperatura de entrada da seção de aquecimento avaliada.

Capítulo V: Comparação entre os controle PID e *Fuzzy* no processo de pasteurização

Neste capítulo foi avaliada e comparada a eficiência das estratégias de controle PID/*feedback* e *fuzzy*/PID/*feedback* através da comparação dos índices de desempenho. Estes índices foram calculados com base nas oscilações da temperatura efetiva de pasteurização em relação ao *set-point* da mesma.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA E TEÓRICA GERAL

1. O PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO

A pasteurização pode ser caracterizada como um processo cinético de desnaturação de proteínas ou material genético. Seu objetivo é causar uma redução de 99,5% sobre o elemento que se deseja eliminar e/ou inativar. Este elemento, na industria de alimentos, geralmente é uma enzima ou um microrganismo. No caso de sucos cítricos, por exemplo, o principal foco é inativar a enzima pectinametilesterase (PME), ou simplesmente pectinaesterase, que apresenta máximo de atividade por volta de pH 7,0-7,5. Esta é a principal responsável pela instabilidade do suco, caracterizada pela perda da opacidade e contribuição à geleificação no suco não-pasteurizado, juntamente com o amido (Tocchini *et al.*, 1995).

Na pasteurização do leite, o objetivo é eliminar microrganismos patogênicos, e a *Salmonella ssp.* é o microrganismo de referência, impondo-se o binômio de 72-75°C/15s. A pasteurização geralmente é realizada em trocadores de calor. Os mais comumente usados são os de placas (TCP) e os de casca e tubo. Os TCP promovem uma troca mais eficiente, mas a perda de carga pode ser um inconveniente se a viscosidade do fluido for muito alta, pois o espaço para o seu escoamento entre as placas é limitado (5-10 mm).

Para a pasteurização, existem uma série de binômios temperatura/tempo, que dependem da taxa de inativação microbiana e/ou da taxa de inativação enzimática, relacionada com a estabilização do alimento. Em sucos, o binômio deverá ser desenvolvido baseado na inativação da enzima PME, pois sua resistência é superior quando comparada a dos microrganismos presentes. Este é o parâmetro que garante a estabilidade do suco. Uma vez que garantida a inativação enzimática, garante-se também a estabilidade microbiológica (Tocchini *et al.*, 1995).

Segundo Sandi (1998), a inativação de enzimas deve ser considerada como base para o cálculo do tratamento térmico em sucos, com temperaturas mais altas e tempo de exposição menor que os utilizados em seu trabalho, que foi de 85°C durante 27 segundos. Ulgen *et al.* (1993) otimizaram a pasteurização de sucos cítricos em função da inativação enzimática e microbiológica e degradação de vitamina C, sendo que o binômio 75°C/12 segundos seria o mais adequado. Tchango *et al.* (1997) estudaram a resistência térmica das leveduras *Candida pelliculosa* e *Kloeckera apis* no suco de maracujá sob vários binômios e chegaram a conclusão que seriam necessários 114 segundos a 94°C para que a inativação de ambos os microrganismos e da enzima PME fosse eficiente.

2. SOLUÇÕES MODELO DE FLUIDOS ALIMENTÍCIOS

A utilização de soluções modelo tem se tornado uma alternativa em trabalhos científicos. O objetivo de seu uso é aproximar suas características a de um fluido alimentício, de forma que este pudesse ser simulado em função das suas propriedades termofísicas e reológicas. O uso das soluções modelo apresenta facilidades em relação ao uso do fluido alimentício, tais como: custo da aquisição da matéria-prima, conservação, características fisico-químicas e reológicas, dentre outros.

Alguns trabalhos vem sendo realizados com soluções modelo. Berto (2004) utilizou uma solução modelo de suco de laranja para a avaliar o processo e o controle da pasteurização de uma planta integrada HTST.

Escudier et al. (2001) verificaram se as propriedades reológicas de uma solução aquosa de CMC se alteravam frente a agitação mecânica, mudança e/ou adição de compostos e de fabricante da CMC.

Outros trabalhos, como o de Yassen et al. (2004) e de Abdelrahim & Ramaswamy (1995) utilizaram soluções modelo de fluidos não-newtonianos e caracterizou-as reologicamente frente a alterações de concentração e/ou temperatura.

3. CARACTERIZAÇÃO DO COMPORTAMENTO TRANSIENTE DOS PROCESSOS

3.1. Ordem do processo

O conhecimento do comportamento das variáveis de processo em regime transiente é de fundamental importância para a caracterização do processo e para auxiliar na configuração do controle a ser integrado em uma planta de processos. Este comportamento pode ser obtido perturbando-se uma ou mais variável(eis) manipulada(s) a partir do processo em estado estacionário desejado.

A perturbação degrau causada em uma variável manipulável ou externa do processo gera sua "curva de reação" ou "curva de resposta", que também é subsídio para obtenção de parâmetros de controladores, os quais são utilizados, por exemplo, na configuração dos controles convencionais PID com os parâmetros (K_c , τ_i e τ_d) pela metodologia proposta por Ziegler-Nichols (Stephanopolous, 1984; Ogata, 1985).

O comportamento da curva de reação geralmente é aproximado matematicamente a uma função genérica (eq. 1) do tipo:

$$y(t) = K.A.u(t) \tag{1}$$

onde K é o ganho estático do processo, "A" é a intensdade do processo e u(t) a função do processo.

O comportamento de um processo pode ser representado pela função de transferência (eq. 2), definida pela relação das transformadas de Laplace da saída (y(s)) e de entrada (u(s)):

$$G(s) = \frac{y(s)}{u(s)} \tag{2}$$

A utilização da transformada de Laplace permite representar processos dinâmicos de uma forma simples e conveniente, sendo expressa apenas em função da

variável complexa "s". Proporciona relação direta entre o distúrbio e as respostas do sistema.

A equação 3 representa a função de transferência padrão no domínio do tempo, para um sistema de 1ª ordem sem tempo morto e a equação 4 com tempo morto.

$$y(t) = KA \left(1 - e^{-t/\tau} \right)$$
(3)

$$y(t) = KA\left(1 - e^{\left(-t - T_D\right)/\tau}\right)$$
(4)

Essas funções são caracterizadas pelos parâmetros K, ganho estático do processo e " τ ", constante de tempo. "A" representa a amplitude da perturbação degrau imposta. A eq. 4 inclui o termo T_D, que é o tempo de atraso do sistema

No caso de sistemas de 2^a ordem, seus comportamentos se diferenciam pela localização dos pólos em relação à malha fechada, sendo que ξ pode assumir valores entre 0 e 1 (sistema sub-amortecido), igual a 1 (sistema criticamente amortecido) e maior que 1 (sistema sobre-amortecido), conforme a equação 5:

$$y(s) = \frac{K}{\left(\tau^2 s^2 + 2\xi s + 1\right)} \frac{A}{s}$$
(5)

Para o caso de $\xi = 1$, a equação no domínio do tempo fica:

$$y(t) = K.A.\left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau}e^{\frac{-t}{\tau}}\right)\right]$$
(6)

3.2. Linearidade do processo

Para sistemas lineares, segundo Ogata (1985), se as respostas do processo para perturbações de amplitude A_1 e A_2 são respectivamente R_1 e R_2 , de acordo com o

princípio da superposição, a resposta a uma amplitude de perturbação $(A_1 + A_2)$ é $(R_1 + R_2)$.

Este princípio determina que, para um sistema linear, a soma de N perturbações de entrada é a mesma que a soma das respostas de cada perturbação individual. Como resultado, a resposta de um sistema linear (y(t)) à uma perturbação degrau de amplitude "A" é a mesma que para qualquer múltiplo da perturbação degrau de amplitude "A".

A análise da linearidade do processo é de fundamental importância como um dos parâmetros para a escolha do tipo de controle a ser utilizado. Farenzena & Trierweiler (2004) propõem uma metodologia para a quantificação da não-linearidade do processo, o cálculo do número de desempenho robusto não linear (nRPN). Através desse método, é possível predizer que tipo de lógica de controlador será melhor aplicável ao processo. Processos que possuem valores de nRPN inferiores a 1 são considerados aproximadamente lineares. Nesse caso, a perda de desempenho de um controlador linear é irrisória (por exemplo, PID). Valores de nRPN entre 1 e 2 acarretam visível perda de desempenho no controlador linear, mas este ainda pode ser aplicado. Para valores de nRPN maiores que 2, o sistema é totalmente não-linear, o que implicará no uso de um controlador não-linear (por exemplo, Fuzzy). Helbig et al. (2000) também apresenta um método de quantificação de não linearidade tanto em regime transitório como em regime estacionário.

A análise de sensibilidade do processo é um subsídio para a explicação da linearidade de um processo. Sua explicação é de fundamental importância, pois são analisadas as mudanças das propriedades termofísicas em função das variações das condições de processo e suas influências na transferência de calor, dentre elas, temperatura e vazão dos fluidos envolvidos.

Abdelrahim & Ramaswamy (1995), estudaram a influência da concentração e da temperatura de uma solução aquosa de CMC em sua reologia. A temperaturas mais brandas (60-80°C), a solução tem comportamento expresso pela lei da potência. O modelo de Bingham se aplica melhor a temperaturas mais altas (>100°C)

Semmar et al. (2003) estudou o efeito da concentração e da temperatura de uma solução aquosa de CMC em seu calor específico e verificou que seu comportamento é

não linear. Para baixas concentrações, o efeito da temperatura é maior quando comparado a altas concentrações.

4. LÓGICAS DE CONTROLES CONVENCIONAIS

4.1. Controle de duas posições

Por ser simples e econômico, um dos controles convencionais mais utilizado nas indústrias de diversos segmentos é o de duas posições, mais conhecido como ligadesliga (ou *on-off*). A amplitude de oscilação do processo é reduzida diminuindo-se o intervalo diferencial das ações de ligar e desligar. Porém, a diminuição deste diferencial pode causar um desgaste excessivo do atuador.

4.2. Controle PID

Os controladores PID permitem que o processo seja controlada de forma contínua, possibilitando que a variável de saída seja controlada com maior precisão e submetem o atuador a um desgaste menor.

No controle proporcional (P), a atuação é proporcional ao erro, caracterizada pelo diferencial entre o erro e o *set-point* da variável controlada. A resposta produz um desvio máximo elevado e desvio residual (*off-set*) excessivo. A oscilação do sistema estabiliza somente após um período significativo de atuação.

No controle proporcional integral (PI), as ações são contempladas por bandas do tipo proporcional e do tipo integral. A ação integral (I) é proporcional a integral do erro, o que faz que este tipo de controle não gere desvio residual. Em contrapartida, a eliminação do erro residual é alcançada em um período de tempo longo, apresentada inicialmente com sobressinal (*overshoot*).

O controle proporcional derivativo (PD) atua proporcionalmente à taxa de variação (derivada) do erro. Sua ação é caracterizada por ser rápida, levando a uma menor oscilação e desvio mínimo. Em compensação, apresenta desvio residual significativo, embora menor que no caso do controle proporcional.

O controle PID contempla as ações dos controladores PI e PD. O controle PI reduz o erro estacionário e melhora a desestabilização relativa enquanto que o controle PD reduz o desvio máximo com razoável velocidade.

A metodologia da curva de reação é uma das mais utilizadas para sintonia de controladores contínuos com ajuste de parâmetros (K_c , $\tau_I \in \tau_D$). Cohen e Coon, citados por Stephanopolous (1984), observaram que a maioria dos processos, quando sofrem uma perturbação degrau, têm respostas em forma de S, que pode ser aproximada a um sistema de 1^a ordem com tempo morto. A Figura 1 mostra este comportamento aproximado.



Figura 1 - Curva de reação generalizada de um processo.

Pelo gráfico, T_d representa o tempo morto aparente, Bu a resposta limite e τ , a constante de tempo. A partir desta curva é possível obter os parâmetros de sintonia de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon, baseado na resposta do processo a uma perturbação degrau (Stephanopolous,1984).

Ambos os métodos propõem apenas sugestões iniciais de sintonia para o controle PID, portanto, não se pode tirar conclusões a respeito do mérito dos métodos. Segundo Stephanopoulos (1984), os valores dos ganhos proporcionais, integrais e derivativos são maiores pelo ajuste de Ziegler-Nichols.

Aström & Hägglund (1984) sugerem uma metodologia que consiste em obter uma oscilação sustentada em torno de um valor de referência. Para isto, com o sistema em malha aberta, a variável manipulada é chaveada em dois valores convenientes escolhidos numa freqüência constante (Figura 2).



Figura 2 – Curva de reação do processo sob perturbação chaveada da variável manipulada.

Neste caso, o valor do ganho crítico é apresentado na equação 7, onde 2h é a amplitude de chaveamento e 2I a amplitude de resposta da variável de processo, pico a pico, em oscilação observada. Este método também é conhecido como "bang-bang", adequado para plantas que podem se tornar instáveis.

$$K_{cr} = \frac{4h}{\pi I} \tag{7}$$

O valor dos parâmetros do controlador PID é obtido pelas correlações propostas no 2° método de Ziegler-Nichols.O método de Aström & Hägglund (1984) se assemelha a este , que consiste em manter o sistema em malha fechada, perturbar o *set-point* da variável de saída e incrementar o valor de K_C até que o sinal de saída exiba uma oscilação sustentada. Os valores corrigidos em função do ganho crítico são apresentados na Tabela 1 (P_{cr} representa o período de tempo, pico a pico, da oscilação observada, conforme Figura 2).

	Constantes		
Modos de controle	K _c	$ au_{ m i}$	$ au_{ m d}$
Р	0,5 K _{cr}	∞	0
PI	0,4 K _{cr}	0,8 P _{cr}	0
PID	0,6K _{cr}	0,5P _{cr}	0,125P _{cr}

Tabela 1 - Parâmetros sugeridos por Ziegler-Nichols para sintonia do controlador PID – 2º método.

5. LÓGICA DE CONTROLE NÃO CONVENCIONAL – CONTROLE FUZZY

A essência da lógica *fuzzy* consiste em explorar o conhecimento do operador humano sobre o processo de forma a garantir a configuração do controle com desempenho satisfatório. Essa é uma das vantagens do uso desta lógica, a forma de apresentação mais próxima da linguagem humana, tornando a etapa de aquisição do conhecimento do especialista mais fácil.

Como a lógica *fuzzy* funciona baseada em operações subjetivas, seu funcionamento se dá por duas operações básicas: *fuzzificação* e *defuzzificação*. *Fuzzuficação* é a etapa em que há a conversão de um sinal escalar coletado por um sensor instalado no processo em um valor *fuzzificado* a partir de funções de pertinência atribuídas ao processo. Então, a lógica *fuzzy* é aplicada nesta etapa, utilizando suas regras de inferência. Em seguida, as proposições geradas pelas regras são *defuzzificadas*, se transformando em sinais que são enviados aos atuadores, conforme esquematizado na Figura 3.



Figura 3 - Esquema de funcionamento de um controlador Fuzzy

Para transformar variáveis numéricas em proposições nebulosas de entrada (*fuzzificação*), são utilizadas funções de pertinência que descrevem os adjetivos que serão atribuídos ao processo. Existem vários tipo de funções de pertinência: triangular, trapezoidal, gaussiana e sigmoidal, dentre outras. As funções de pertinência são definidas pelo operador, conforme o número que deseja utilizar no processo (cardinalidade), além de sua linearidade. As funções são associadas a condicionais de multivariáveis do tipo SE/ENTÃO (regras de inferência), que geram uma proposição nebulosa de saída. Esta proposição então é *defuzzificada*, sendo novamente transformada em um valor mensurável que será a resposta da variável manipulada do processo.

Para exemplificar o funcionamento do controle fuzzy, suponha um processo de aquecimento de água num aquecedor, onde a variável manipulada é a vazão de vapor na camisa, e a variável controlada a temperatura da água. Após a obtenção detalhada do comportamento do processo com o operador, pode-se definir 3 funções de pertinências: Negativa (N), Zero (Z) e Positiva(P), triangulares e não lineares, representativas para a *fuzzificação* do valor escalar do erro (Δ T) em relação ao *set-point* da temperatura de aquecimento, conforme apresentado na Figura 4.


Figura 4 - Fuzzificação do valor de erro para as funções de pertinência triangulares de entrada definidas para o processo de aquecimento de água.

Se o processo estiver com um ΔT de -0,5 °C em relação ao *set-point*, tem-se 3 proposições de entrada: N (negativa), Z (zero) e P (positivo). Esses são os valores "*fuzzificados*" da variável de entrada. Para este processo, ficaram fixadas as seguintes base de regras, condicionadas as funções de *defuzzificação* de saída P (pequena), M (médio) e G (grande):

- Se $\Delta T = N$, então saida = P (pequena);
- Se $\Delta T = Z$, então saída = G (grande);
- Se $\Delta T = P$, então saída = M (média);

Neste caso, a transformação da proposição nebulosa em uma variável numérica necessita de um método de "*defuzzificação*", afinal, são 3 saídas nebulosas para apenas uma saída numérica, que no caso, é o valor de vazão de vapor que deve ser incrementado no processo. Para isso, existem vários métodos de *defuzzificação* propostos na literatura, dentre eles, o do centróide, que consiste em obter o centro de área obtido pelas proposições de saída. A Figura 5 mostra como seria a *defuzificação* das proposições de saída.



Figura 5 – *Defuzzificação* do valor de erro para as funções de pertinência triangulares de saída definidas para o processo de aquecimento de água.

Pelo método do valor do centro de área, o valor *defuzzificado* seria aproximadamente 100 m³/h, ou seja, para um erro de *set-point* de -0,5°C, a ação na vazão de vapor deve ser de aproximadamente 100 m³/h.

Há algumas controvérsias em relação a aplicação da lógica *fuzzy*. Driankov *et al.* (1996) cita que a sua aplicação cresceu significativamente a partir dos anos 90, principalmente devido ao sucesso de aplicação no Japão em eletro-eletrônicos e eletrodomésticos. Porém, para alguns especialistas, todo processo controlado por lógica *fuzzy* pode ser controlado convencionalmente tão bem quanto. Porém, subsidiado pelo nRPN, pode-se questionar essa afirmação.

Mesmo assim, o controle *fuzzy* vem sendo estudado e aplicado na indústria como forma de inovação tecnológica e sustentabilidade num mercado que, atualmente, é muito concorrido. Além disso, a eficiência deste controle só poderá ser efetivada ou não após análise e comparação dos resultados obtidos em relação a outros tipos de controles convencionais. Talvez uma das grandes vantagens do controle *fuzzy* frente ao controle convencional seja a capacidade de compensação da não linearidade de processos que pode ser embutida nas funções de pertinência, uma vez que a sintonia deste controle é feita com a isenção de modelos matemáticos, a partir de adjetivos atribuídos do processo decorrente do comportamento deste perante perturbações diversas que podem vir a ocorrer.

Li (1997) sugere uma sintonia para o controlador *fuzzy* adaptada do controle PID. Nesta metodologia, há a necessidade da obtenção dos fatores de escala (K_e, K_d, K₀, K₁) que é baseada nos valores dos parâmetros PID pré-configurados K_c, $\tau_d \in \tau_i$ (Figura 6).



Figura 6 – Esquema do controle Fuzzy/PID proposto por Li (1997)

A metodologia sugere que a aquisição do sinal de desvio de *set-point* seja coletado de duas formas: erro (e) e variação do erro com o tempo ($\Delta e/\Delta t$). Este valor escalar é normalizado numa escala entre [-1,1], obtido pela multiplicação dos fatores de escala K_e e K_d. A *fuzzificação* segue a mesma seqüência do controle *fuzzy*. As funções de pertinência utilizadas pela metodologia são triangulares de cardinalidade 7 e espaçamentos iguais, que variam de grande negativo (GN) à grande positivo (GP). A Tabela 2 mostra a base de regras sugerida para ação direta do controlador.

				$\Delta e / \Delta t$			
0	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
e							
GP	ZR	PP	MP	GP	GP	GP	GP
MP	PN	ZR	PP	MP	GP	GP	GP
PP	MN	PN	ZR	PP	MP	GP	GP
ZR	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GN
PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	MP
MN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP
GN	GN	GN	GN	GN	GN	GN	ZR

Tabela 2– Base de regras proposta por Li (1997) para ação direta do controlador.

A partir do valor *defuzzificado* (f_z), são obtidos dois valores de saída ($f_z^{PI} e f_z^{PD}$) que serão somados e transformados em um só valor real de atuação (f_z^{PID}). O f_z^{PD} é obtido através da multiplicação do valor f_z pelo fator de escala K₁ e o f_z^{PI} é obtido pela soma dos valores obtidos de f_z num tempo de amostragem determinado, multiplicado pelo fator de escala K₀.

O algoritmo para o cálculo dos fatores de escala é dado a seguir:

- Obter os valores dos parâmetros do controlador PID convencional sintonizado;
- Utilizar as equações 8 e 9 para calcular alfa e beta:

$$\circ \quad \alpha + \beta = \tau_i \tag{8}$$

$$\circ \quad \frac{\alpha\beta}{\alpha+\beta} = \tau_d \tag{9}$$

• Calcular K₀ com a equação 10:

$$\circ \quad K_0 = \frac{K_c}{\tau_i} \tag{10}$$

• Calcular K₁ com a equação (11):

$$\circ \quad K_1 = \alpha K_0 \tag{11}$$

- Considere inicialmente K_e=1, referente a situação de entrada.
- Calcular K_d com a equação (12):

$$\circ \quad K_d = \alpha K_e \tag{12}$$

Caso os valores de K_0 e K_e estejam muito altos, o reajuste deve ser feito de acordo com a resposta do processo em relação à perturbação. Pode-se aumentar ou diminuir seus

valores, porém, não há uma regra específica para um segundo ajuste. Este método apenas sugere valores iniciais de sintonia.

Alguns estudos estão presentes na literatura, que objetivam a avaliação da influência da linearidade no controle de processos. Em ensaios experimentais de pasteurização realizados com solução modelo de suco de laranja por Berto (2004), o controlador *fuzzy*/PID foi utilizado. Os valores iniciais dos fatores de escala foram sintonizados e necessitaram apenas de um ajuste fino. O comportamento da variável de saída (temperatura de pasteurização) foi avaliado após perturbações na variável externa (temperatura de entrada do produto), apresentando resultados satisfatórios.

Farenzena (2003) fez um estudo quantificado da linearidade de alguns processos simulados e experimentais e avaliou o desempenho do controle PI e preditivo linear e não-linear em processos de baixa e alta linearidade estática e dinâmica.

6. ANÁLISE DE DESEMPENHO DOS CONTROLADORES

Sistemas de controle estão sujeito a erros no regime estacionário devido a diversos motivos, que dependem tanto do tipo de sinal de referência como do sistema. Segundo Ogata (1985), as características da resposta transitória de um controle para perturbação em degrau unitário no *set-point* podem ser ilustradas por alguns termos, dentre eles:

- Tempo de sobre-sinal, t_s: tempo necessário para resposta alcançar o primeiro valor de sobressinal;
- Erro de sobressinal, e_s: valor de sobressinal alcançado no tempo de sobressinal;
- Tempo de acomodação, t_{ac}: tempo necessário para a curva de acomodação alcançar e permanecer dentro de uma faixa em torno do valor final de tolerância;
- Erro de acomodação, e_{ac}: erro no tempo de acomodação. Este valor pode variar entre 2 a 5% do valor absoluto do valor final estipulado.

A avaliação do desempenho pode ser feita através de índices de erro quando perturbações na carga e no *set-point* da variável controlada são aplicadas. São propostos alguns índices de erro por Ogata (1985), dentre eles:

• Valor absoluto do erro (IAE):

$$IAE = \int_{0}^{\infty} |e(t)| dt$$
(13)

• Valor absoluto do erro ao quadrado (ISE):

$$ISE = \int_{0}^{\infty} \left| e(t) \right|^{2} dt \tag{14}$$

• Valor absoluto do erro ponderado (ITAE):

$$ITAE = \int_{0}^{\infty} t \left| e(t) \right|^{2} dt \tag{15}$$

Segundo Ogata (1985), IAE é o índice de mais fácil aplicação, o ISE fornece grande peso aos erros maiores e pequeno peso aos erros menores e o ITAE pondera um grande erro inicial com pequeno peso enquanto que os erros gerados na resposta transitória tem maiores pesos.

A análise deve ser feita de forma comparativa, entre dois tipos de controle ou entre sintonias diferentes para o mesmo tipo de controle quando aplicado o mesmo degrau unitário. Não há como dizer efetivamente se os valores obtidos para apenas uma perturbação são bons ou não. O melhor controle ou sintonia será aquele que apresentar os menores índices de erros calculados.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAHIN, K. A. e RAMASWAMY, H. S. High temperature/pressure reology of caboxymethyl cellulose (CMC). Food Research International, v.38, n.3, p.285-290, 1995.

ASTRÖM, K. J. e HÄGGLUND, T. Automatic tunning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. **Automatica**, v.20, n.5, p.645-651, 1984.

BERTO, M.I. Avaliação experimental do controle do processo de pasteurização de sucos de laranja. Campinas-SP, 2004. 261p. Doutorado. Departamento de Engenhaira de Alimnetos, UNICAMP.

BERTO, M. I.; GRATÃO, A. C. A; VITALI, A. A. e SILVEIRA JR., V. Rheology of sucrose-CMC model solution. Journal of Texture Studies, v.34, n.4, p.391-400, 2003. DRIANKOV, D.; HELLENDOORN, H. e REINFRANK, M. An introduction to fuzzy control. New York: Springer-Verlag, 1996. 316p.

ESCUDIER, M. P.; GOULDSON, I. W.; PEREIRA, A. S.; PINHO, F. T. e POOLE, R. J. On the reproducibility of the rheology of shear-thinning liquids. Journal of Non-Newtonain Fluid Mechanics, v.97, p.99-124, 2001.

FARENZENA, M. Numero de Desempenho Robusto Não-Linear: uma Nova
Medida do Grau de Não-Linearidade. Porto Alegre, 2003. 155 p.p. Dissertação (mestre em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

FARENZENA, M. e TREIWELLER, J. O. n-RPN - Número do desempenho robusto não-linear. Uma nova medida do grau de não-linearidade. In: XV Congresso Brasileior de Engenharia Química (COBEQ), 2004, p. PQ6 - 2978.

HELBIG, A.; MARQUARDT, W. e ALLGÖWER, F. Nonlinearity measures: definition, computation and applications. **Journal of Process Control**, v.10, p.113-123, 2000.

LI, X.H. A comparative design and tunning for conventional fuzzy control. **IEEE Transactions on systems, man and cybernetics - Part B : Cybernetics**, v.27, n.5, p.884-889, 1997.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. Tradução de André Fabio Kohn e outros. Rio de Janeiro: Prentice & Hall do Brasil, 1985. 929p.

SANDI, D. Efeito do tratamento térmico e do armazenamento sobre a qualidade
sensorial do suco de maracujá amarelo. Viçosa-MG, 1998. 79p. Mestrado.
Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa.

SEMMAR, N.; TANGUER, J. L. e RIGO, M. O. Specific heat of carboxymethil cellulose and Carbopol solutions. **Thermochimica Acta**, v.402, p.225-235, 2003.

STEPHANOPOLOUS, G Chemical process control: an introduction to theory and practice. Englewood clifs: Prentice & Hall Inc., 1984. 696p.

TCHANGO, J. T.; TAILLIEZ, R.; EB, P.; NJINE, J. e HORNEZ, J. P. Heat resistance of the spoilage yeasts Candida pelliculosaand Kloeckera apis and pasteurization values for some tropical fruit juices and nectars. **Food Microbiology**, v.14, p.93-99, 1997.

TOCCHINI, R.P.; NISIDA, A.L.A.C. e MARTIN, Z.J. Industrialização de polpas, sucos e néctares de frutas. Campinas: 1995. p. 44-63p.

ULGEN, N. e OZILGEN, M. Determination of optimum pH and temperature for pasteurization of citrus juices by response-surface methodology. **Zeitschirift für lebensmittel-Untersuchung und-forschung**, v.196, n.1, 1993.

YASSEN, E. I.; HERALD, T. J.; ARAMOUNI, F. M. e ALAVI, S. Rheological properties of selected gums solutions. **Food Research International**, v.38, p.111-119, 2005

<u>CAPÍTULO I. CARACTERÍSTICAS GERAIS DO PROCESSO DE</u> <u>PASTEURIZAÇÃO E DOS FLUIDOS</u>

I.1. RESUMO

Este capítulo apresenta a escolha do fluido newtoniano e não newtoniano a ser pasteurizado, a aferição dos regimes estacionários do processo envolvendo cada um dos fluidos e a definição dos binômios temperatura/tempo a serem utilizados. Os binômios foram definidos com base nas limitações do trocador de calor. O fluido newtoniano escolhido foi a água e o fluido não-newtoniano escolhido, uma solução de 0,5% de Carboximetilcelulose sódica (CMC). Para a água, o binômio estabelecido no regime permanente foi de 89°C/25s e para a solução de CMC 72°C/25s, todos atingidos com vazão do produto e água quente a 250 L/h e 483 L/h, respectivamente.

I.2. INTRODUÇÃO

A pasteurização é um procedimento muito comum empregado na indústria de alimentos. Consiste em um tratamento térmico com o objetivo de aumentar o tempo de vida de prateleira de produtos como sucos, leite, cerveja, molhos e enlatados, dentre outros.

Em escalas de produção contínuas, é necessário que o processo que seja eficiente e rápido. A pasteurização HTST (do inglês *High Temperature Short Time*) tem sido amplamente empregada. Seu binômio temperatura/tempo é desenvolvido com as necessidades de inativações enzimáticas ou microbiológicas do produto. A eficiência do método é de suma importância, visto que pequenas variações podem prejudicar a pasteurização e causar danos a composição centesimal do produto final, devido a degradação de vitaminas, sais, aromas, corantes e outros. Kessler (1989) e Hasting (1992) quantificaram que variações de 1°C na temperatura de pasteurização podem acarretar em uma perda de seu efeito de até 25%. Logo, o emprego de um controle adequado, que resulte em baixa variabilidade de processo, pode vir a agregar mais valor ao produto final.

No caso de fluidos, o processo HTST é geralmente realizado em trocadores de calor. Os mais comumente empregados são os a placas e de casca e tubo. Porém, os trocadores a placas possuem algumas vantagens, como possuir (fornecer) alto coeficiente de transferência de calor, ser compacto, causar baixa turbulência no escoamento em baixas velocidades e ainda oferecer possibilidade de aproveitamento de energia. Normalmente os processos HTST em trocadores de calor ocorrem em 3 seções: regeneração, aquecimento e resfriamento. Devido a dificuldade de controle das utilidades da seção de resfriamento, todos os ensaios deste trabalho foram realizados e analizados apenas nas seções de regeneração e aquecimento.

Inúmeros trabalhos sobre pasteurização de fluidos alimentícios, em especial de sucos cítricos, foram encontrados na literatura. Parish (1998) estudou o efeito da pasteurização a altas temperaturas, combinado com altas pressões e verificou que esta combinação pode melhorar ainda mais a inativação de microrganismos, apesar de o efeito não ser muito significativo sob a inativação da pectinaesterase. Pyiasena et

al.(2003) estudaram o efeito de vários binômios temperatura/tempo na pasteurização de suco de maçã e verificaram que o binômio de 71°C/16s foi suficiente para causar 5 reduções logarítmicas no microrganismo *Pediococcus sp.* Sandi(1998) estudou a estabilidade de vários componentes do suco de maracujá frente a variações de binômios tempo/temperatura e concluiu que o processo causa menores injúrias a composição do suco quando submetido a 85°C por 27 segundos.

Devido ao amplo conhecimento bibliográfico das propriedades termofísicas e reológicas da água, essa foi escolhida como fluido newtoniano. Em virtude da dificuldade de armazenamento de um fluido alimentício e do conhecimento de suas propriedades, optou-se por escolher como fluido não-newtoniano uma solução modelo que tivesse propriedades conhecidas e que apresentasse facilidade de preparo e armazenamento.

Soluções como, por exemplo, as de CMC sódica apresenta comportamento pseudoplástico já a baixas concentrações, a partir de 0,5% m/m. Por ter cadeia longa, a molécula hidrata muito e forma soluções altamente viscosas. Existe um número razoável de estudos acerca da reologia e outras propriedades termofísicas desta solução. Abdelrahim e Ramaswamy (1995) fizeram um estudo aprofundado das características reológicas de uma solução de CMC quando submetidas a condições de escoamento a altas temperaturas (60-140°C). Constataram que o fluido tem comportamento reológico dependente do tempo (tixotropia) quando submetido a temperaturas acima de 100 °C e pseudoplástico abaixo desta temperatura, resultado semelhante constatado por Wanchoo et al. (1996). Outros autores verificaram o comportamento pseudoplástico da solução de CMC, como Díaz et al.(2003), Valenza et al. (2004), Berto et al. (2003) e Togrul e Arslan (2003).

O comportamento reológico de algumas gomas foi estudado por Yaseen (2005). Soluções de goma xantana, carragena, arábica e outras, a uma concentração de 0,05%, apresentaram comportamento não newtoniano do tipo viscoelástico. Todos os ensaios reológicos deste trabalho foram realizados à temperatura de 4°C e uma taxa de deformação de 50 s⁻¹.

Assim sendo, os objetivos definidos para esse capítulo foram:

• Estabelecer o binômio tempo/temperatura da pasteurização HTST para cada fluido a partir do regime permanente, de acordo com a capacidade e limitações do trocador de calor e das utilidades a serem empregadas no processo;

• Definir os fluidos newtoniano e não newtoniano a serem utilizados no processo de pasteurização com base nas facilidades de obtenção das propriedades termofísicas e reológicas, preparação e armazenamento do produto.

I.3. MATERIAL E MÉTODOS

I.3.1. Material

I.3.1.1. CONDIÇÕES INICIAIS DE PROCESSO

Esta etapa foi realizada na planta piloto localizada no Laboratório de Automação e Controle de Processos de Alimentos (LACPA) do Departamento de Engenharia de Alimentos da UNICAMP. A Figura I.1 mostra o *layout* da planta piloto. A estrutura é basicamente composta dos seguintes equipamentos:

- Três tanques encamisados de armazenamento e homogeneização de produto, com capacidade de 450 kg de produto cada;
- Pasteurizador a placas de três seções da empresa GEA Tuchennhagen do Brasil, com 5 placas por seção e configuração contra-corrente;
- Sensores de temperatura tipo Pt 100 distribuídos ao longo das linhas e das 3 seções do pasteurizador;
- Sistema de refrigeração que utiliza como fluido primário R404A e como secundário uma solução de 25% m/m de propileno glicol;
- Bomba de deslocamento positivo para bombeamento de produto ;
- Bomba centrífuga para bombeamento de água quente ao pasteurizador;
- Inversores de freqüência da marca Danfoss modelo VLT série 2800 instalados nos motores das bombas de todos os fluidos envolvidos no processo;

- Sistema de aquecimento de água, constituído por tanque isolado termicamente e 4 resistências elétricas, sendo 3 de 7500 W e uma de 2500 W, esta última modulável por atuador de potência e localizada na linha antes da entrada de água no pasteurizador.
- Medidor de vazão magnético MAGFLO da marca Danfoss, modelo MAG 5000, localizado na linha de propileno glicol;
- Medidor de vazão tipo Coriolis da marca Micromotion R-series flowmeters adquirido juntamente à Emerson Process Management instalado na linha de produto.



Figura I.1 – Estrutura da planta piloto do LACPA

O sistema de instrumentação montado caracteriza-se por ser híbrido, sendo ele uma parte analógica (CLP convencional) e outra em Fieldbus foundation (DFI 302). Estes equipamentos foram adquiridos da empresa Smar Equipamentos Industriais Ltda.

A configuração dos instrumentos interligados no CLP e no DFI 302 foi feita no PC, via softwares CONF 700 e SYSCOM, respectivamente. Já o sistema supervisório

utilizado para aquisição e monitoramento de dados on-line foi o AIMAX for Windows, todos adquiridos da à empresa Smar Equipamentos Industriais Ltda. A estrutura básica de uma rede híbrida está apresentada na figura I.2.



Figura I.2 –Estrutura básica de uma rede híbrida analógica.

I.3.1.2. ESCOLHA DO FLUIDO NÃO-NEWTONIANO

Foram escolhidos três produtos dos quais apenas um seria escolhido para representar o fluido não newtoniano a ser utilizado neste trabalho. Para o preparo destas soluções, foram utilizados os seguintes produtos e equipamentos:

- Goma xantana e carragena fornecidos pela Kraki Kienast e Kratschmer Ltda.;
- Carboximetilcelulose (CMC), adquirido juntamente a Arinos Quimica Ltda., denominado comercialmente como Carbocel AM 3000;

- Balança Analítica;
- Agitador magnético;
- Erlenmeyers de 50 ml.

Para o preparo do fluido não newtoniano a ser envolvido no processo, foram utilizados os seguintes equipamentos:

- Um tanque de preparação e dissolução de fluido não newtoniano, com capacidade de 200 litros;
- Balança com capacidade de 50 kg para aferição da massa de espessante a ser utilizada;
- Agitador do tipo hélice para homogeneização do produto.

I.3.2. Métodos

I.3.2.1. CONDIÇÕES INICIAIS DE PROCESSO

Para essa etapa, a metodologia consistiu em operar o processo dentro das condições médias de trabalho das utilidades envolvidas no processo e verificar em regime estacionário a temperatura de pasteurização a uma determinada vazão de produto. Como a faixa ideal de trabalho das bombas é estabelecida entre 30 e 60 Hz, optou-se Pela rotação de 45 Hz para o regime estacionário do processo. A vazão de produto foi definida da seguinte forma:

- Ajustar a bomba, acoplada ao redutor mecânico, na redução máxima e operar o sistema, em malha aberta, a uma rotação de 45 Hz;
- Aferir a vazão de trabalho, em l/h, para as dadas condições.

Uma vez que a vazão de produto deveria ser fixa, devido ao tempo de residência no tubo de retenção, não foram feitas aferições para outras condições da rotação desta bomba. Optou-se por escolher a redução máxima da bomba para a obtenção de menor perda de carga do fluido não newtoniano no pasteurizador, uma vez que sua viscosidade seria alta, segundo os dados da bibliografia apresentada independente da solução a ser escolhida.

A aferição da temperatura de pasteurização foi realizada em malha aberta, e seguiu as etapas descritas abaixo:

- Acionar a bomba de água quente a uma rotação de 45 Hz;
- Ligar duas das três resistências do tanque de água quente à potência máxima e modular a resistência da linha de água quente a uma potência de 50%;
- Acionar a bomba de produto, ajustada na redução máxima, a uma rotação de 45 Hz;
- Aferir a temperatura de pasteurização, em °C, para as dadas condições.

Como esse trabalho não envolveu a análise da seção de resfriamento, apenas os regimes da seção de aquecimento serão apresentadas. Nesta etapa, foi utilizada a aferição da bomba de água quente realizada por Berto (2004). Este conhecimento é de suma importância pois é a partir dele que será possível definir os níveis de perturbação a serem impostos ao processo.

I.3.2.2. ESCOLHA DO FLUIDO NÃO NEWTONIANO

Conforme já descrito anteriormente, o fluido newtoniano adotado foi a água. O procedimento adotado para a escolha do fluido não newtoniano consistiu nos seguintes passos:

- Preparação de soluções de 0,5%, 1,0% e 2,0% m/m de cada um dos espessantes em uma balança analítica em frascos de erlenmeyer de 50 ml;
- Homogeneização da solução em agitador magnético à temperatura ambiente durante 15 minutos e verificar a dificuldade da dissolução;
- Repouso da solução por 24 h para que as moléculas da mesma possam hidratar por completo e manter o frasco erlenmeyer aberto para que a solução sofra a desaeração;

 Verificação se houve ou não geleificação da solução na concentração de preparo à temperatura ambiente. A solução escolhida não deve apresentar geleificação e alta turbidez após repouso.

Após a escolha do fluido, foram aferidos 2,25 kg na balança (0,5% de 450 kg da capacidade do tanque) de espessante e este foi diluído no tanque de preparo e dissolução com água (até completar o nível) e submetido a 15 minutos de agitação. Então, a quantidade do tanque de preparo foi escoada para o tanque de armazenamento de produto e seu nível completado com água. Após repouso de 24 horas para que o ar incorporado durante a agitação pudesse ser eliminado e as moléculas do polímero pudessem realizar hidratação completa, a solução foi agitada lentamente até sua homogeneização completa.

I.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

I.4.1. Escolha do fluido não newtoniano

Após o preparo das três soluções, verificou-se que todas apresentaram, aparentemente, alto grau de viscosidade. A carragena, apesar de ter sido a de mais fácil dissolução (após 15 minutos de agitação, quase não apresentou grumos), formou uma solução de alta turbidez e que geleificou após as 24 horas de repouso já na concentração de 0,5% m/m. Apesar desta situação poder ser modificada com a adição algum sal, optou-se por não escolhê-la para evitar mudanças de pH na solução e possíveis incrustações na tubulação. A goma xantana apresentou uma grande dificuldade para dissolução, apresentando partículas dispersas após os 15 minutos de agitação na superfície da solução. Apesar de ter apresentado alto grau de turbidez e difícil dissolução por completo, não geleificou na concentração de 0,5% m/m.

A solução CMC foi a que apresentou melhor comportamento dentro das condições estabelecidas para a escolha. Teve uma razoável dissolução, apesar de apresentar vários grumos após a agitação. Em 24 horas, as soluções de 0,5% e 1,0 % m/m não geleificaram, apresentaram baixo grau de turbidez e apresentaram hidratação aparente completa. Optou-se por escolher a concentração de 0,5% m/m, uma vez que a

solução de 1,0 % m/m ficou muito viscosa, o que poderia ocasionar uma perda de carga excessiva no trocador de calor.

I.4.2. Condições iniciais de processo

Para a bomba de produto, foi aferida a vazão de 250 kg/h pela metodologia proposta na seção 1.3.2. A Tabela I.1 apresenta a aferição da bomba da água de aquecimento apresentada por Berto (2004).

Tabela I.1-Aferição da bomba de água quente*.

Tipo de bomba	centrífuga
Metodologia da medição de vazão	Medição volume deslocado e tempo
Numero de repetição para cada rotação	3 (triplicata para cada rotação)
Temperatura da água	22°C
Faixa da rotação de aferição, Hz	30 - 65
Faixa de vazão lida, L/h	306 - 780
Desvio padrão mínimo e máximo das leituras	0,8 - 7,5 (0,5 - 0,98%)
Equação de ajuste da vazão volumétrica em função da rotação em Hz, L/h	V _{aq,22°C} = 13,57Hz - 95,67, R ² =0,9995
Equação com correção da densidade em função da temperatura, L/h	$V_{aq,T} = V_{aq,22^{\circ}C} \frac{\rho_{H_2O,T}}{\rho_{H_2O,22^{\circ}C}}$

^{*}Todos os dados da tabela foram desta forma apresentados por Berto (2004)

Para a aferição da temperatura de pasteurização, o sistema foi acionado, conforme descrito na metodologia. Os regimes obtidos estão apresentados nas tabelas Tabela II.2 e Tabela I.3. Os valores de densidade para a conversão da vazão volumétrica da água quente em vazão mássica foram retirados de Incropera e De Witt (1992). Notase que não conseguiu-se atingir o mesmo binômio para a pasteurização de cada um dos produtos. Isso pode ser justificado pelo fato da solução de CMC sódica apresentar propriedades termofísicas e reológicas bem distintas da água, o que altera o coeficiente global de transferência de calor **U**.

	Seção regeneração				
	produto cru	produto pasteurizado			
Vazão Mássica, kg/h	250	250			
Temperatura entrada, °C	27,1	88,7			
Temperatura saída, °C	58,7	59			
	Seção aqu	Seção aquecimento			
	Produto pré-aquecido	o Água de aquecimento			
Vazão Mássica, Kg /h	ra, Kg /h 250 494				
Temperatura entrada, °C	58,7	98,5			
Temperatura saída, °C	89	83,8			

Tabela I.2 - Características do regime permanente da pasteurização da água.

Tabela I.3 - Características do regime permanente da pasteurização da solução de CMC sódica.

	Seção regeneração		
	produto cru	produto pasteurizado	
Vazão Mássica, Kg /h	250	250	
Temperatura entrada, °C 24,9		71,9	
Temperatura saída, °C	40,6	57,5	
	Seção aquecimento		
	Produto pré-aquecido Água de aquecimento		
Vazão Mássica, Kg /h	250	496	
Temperatura entrada, °C40,693		93	
Temperatura saída, °C	72	76,4	

Nesta etapa, faz-se necessário um balanço de energia para averiguar a consistência dos valores alcançados em regime permanente.

Para a seção de regeneração, considerando a baixa variação do calor específico da água e considerando o valor de 4,18 kJ/kg °C para água, temos:

 $Q_{f} = Q_{AQ}$ $m_{f} c_{pf} \Delta T_{f} = m_{AQ} c_{pAQ} \Delta T_{AQ}$ 250.4,18.(58,7 - 27,1) = 250.4,18.(88,7 - 59) 33022kJ / h = 31036,5kJ / h

$$\% erro = \frac{Q_f - Q_{AQ}}{Q_f} .100$$

% erro = 6%

Analogamente, para a solução de CMC sódica (considerando seu c_p igual ao da água), tem-se:

$$Q_{f} = Q_{AQ}$$

$$m_{f} c_{pf} \Delta T_{f} = m_{AQ} c_{pAQ} \Delta T_{AQ}$$

$$250.c_{p}.(40,6 - 24,9) = 250.c_{p}.(71,9 - 57,5)$$

$$3925c_{p}kJ / h = 3600c_{p}kJ / h$$

$$\% erro = \frac{Q_{f} - Q_{AQ}}{Q_{f}}.100$$

$$\% erro = 8\%$$

Em ambos os casos, o erro pode ser explicado por um somatório de fatores, tais como: perdas de calor no trocador, variação do c_p da água e da solução de CMC sódica com a temperatura, erros experimentais nas calibrações dos sensores de temperatura e nas aferições das bombas do processo.

Para a seção de aquecimento, considerando a baixa variação do calor específico da água e considerando o valor de 4,18 kJ/Kg °C para água, tem-se:

$$Q_{f} = Q_{AQ}$$

$$m_{f} c_{pf} \Delta T_{f} = m_{AQ} c_{pAQ} \Delta T_{AQ}$$

$$250.4,18.(89 - 58,7) = 494,5.4,18.(98,5 - 83,8)$$

$$31663,5kJ / h = 30385,1kJ / h$$

$$\% erro = \frac{Q_{f} - Q_{AQ}}{Q_{f}}.100$$

$$\% erro = 4\%$$

Analogamente, para a solução de CMC sódica (considerando seu c_p igual ao da água), tem-se:

$$Q_{f} = Q_{AQ}$$

$$m_{f} \cdot c_{pf} \cdot \Delta T_{f} = m_{AQ} \cdot c_{pAQ} \cdot \Delta T_{AQ}$$

$$250.c_{p} \cdot (72 - 40,6) = 496.c_{p} \cdot (93 - 76,4)$$

$$7850.c_{p} kJ / h = 8233,6.c_{p} kJ / h$$

$$\% erro = \frac{Q_{f} - Q_{AQ}}{Q_{f}} \cdot 100$$

$$\% erro = 5\%$$

Em ambos os casos, analogamente à seção de regeneração, o erro pode advir dos mesmos fatores citados anteriormente, tais como: perdas de calor no trocador, variação do c_p da água e da solução de CMC sódica com a temperatura, erros experimentais nas calibrações dos sensores de temperatura e nas aferições das bombas do processo.

Com o objetivo de verificar o tempo de residência do produto no tubo de retenção, foi feita a conversão da vazão mássica (em kg/h) em velocidade média (em m/s), considerando a densidade da água e da solução de CMC sódica 1000 kg/m³ e aproximadamente constante com a variação da temperatura. Desta forma, estima-se o tempo de residência do produto no tubo de retenção. A Tabela I.4 apresenta algumas especificações do tubo de retenção.

Tabela I.4- Especificações do tubo de retenção

	Tubo de retenção
Vazão de produto, kg/h	250
Vazão de produto, m ³ /s	0,00007
Diâmetro da tubulação, pol	1" OD
Diâmetro interno, mm	22,4
Área transversal do tubo, m ²	0,0004
Comprimento do passo, mm	1100
Numero de passos	4

O seguinte cálculo foi feito para verificar o tempo de residência no tubo de retenção a uma vazão de 250 kg/h:

$$V_{f} = u_{f} \cdot A_{TR}$$
(I.1)
$$u_{f} = \frac{0,00007}{0,0004}$$

$$u_{f} = 0,175m \cdot s^{-1}$$

Então, tem-se o tempo de residência em 4,4 m de tubo de retenção:

$$t_{res} = \frac{4,4}{0,175}$$

ou seja, aproximadamente 25 segundos.

I.5. CONCLUSÕES

I.5.1. Escolha do fluido não newtoniano envolvido no processo

O fluido newtoniano escolhido foi a água e o fluido não newtoniano foi uma solução de 0,5% m/m de CMC sódica, pois dentre as três testadas, foi a que apresentou maior estabilidade para as condições estabelecidas. Não geleificou a temperatura ambiente e apresentou boa diluição em 24 horas e baixa turbidez.

I.5.2. Caracterização do processo

Ficaram definidos dois binômios distintos para o processo de pasteurização envolvendo ambos os fluidos. Os binômios estabelecidos foram de 89°C/25s e de 72°C, 25s para a água e solução de CMC sódica, respectivamente. Esta diferença mostra que o tanto a seção de regeneração como a seção de aquecimento do pasteurizador deveriam ser redimensionadas para que a solução de CMC sódica pudesse atingir o mesmo binômio temperatura/tempo do caso da água. Uma possível solução seria aumentar o número de placas na seção de regeneração para que houvesse uma maior troca térmica entre o produto cru e o produto pasteurizado. Desta forma, o produto pré-aquecido poderia chegar a uma temperatura maior na seção de aquecimento.

I.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAHIN, K. A. e RAMASWAMY, H. S. High temperature/pressure reology of caboxymethyl cellulose (CMC). **Food Research International**, v.38, n.3, p.285-290, 1995.

BERTO, M. I.; GRATÃO, A. C. A; VITALI, A. A. e SILVEIRA JR., V. Rheology of sucrose-CMC model solution. Journal of Texture Studies, v.34, n.4, p.391-400, 2003. BERTO, M.I. Avaliação experimental do controle do processo de pasteurização de sucos de laranja. Campinas-SP, 2004. 261p. Doutorado. Departamento de Engenhaira de Alimnetos, UNICAMP.

CHARPENTIER-VALENZA, D.; MERLE, L.; MOCANU, G.; PICTON, L. e MULLER, G. Rheological properties of hydrophobicaly modified carboxymethylcelluloses. **Carboydrate Polymers**, v.54, p.1-8, 2004.

GOMEZ-DÍAZ, D. e NAVAZA, J. M. Rheology of aqueous solutions of food additives. Effect of concentration, temperature and blending. Journal of Food Engineering, v.56, p.387-392, 2003.

HASTING, A. P. M. Practical considerations in the design, operation and control of food pasteurization process. **Food Control**, v.3, n.1, p.27-32, 1992.

INCROPERA, F. P. e DE WITT, D. P. Fundamentos da Transferência de Calor. 3^a edição.ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992. 455 p.p.
KESSLER, H. G. Developments in food preservation: Elsevier Applied Science. Amsterdam: 1989. v.5, 87p.

PARISH, M.E. Orange Juice after treatment by therma pasteurization or isostatic high pressure. Lebensmittel-Wissenschaft und technologie - Food science and technology, v.3, p.439-442, 1998.

PIYASENA, P.; MCKELLAR, R. C. e BARTLETT, F. M. Thermal inactivation of *Pediococcus* sp. in simulated apple cider during high-temperature short-time pasteurization. **International Journal of Food Microbiology**, v.82, p.25-31, 2003.

SANDI, D. Efeito do tratamento térmico e do armazenamento sobre a qualidade sensorial do suco de maracujá amarelo. Viçosa-MG, 1998. 79p. Mestrado. Departamento de Tecnologia de Alimentos, Universidade Federal de Viçosa.

TOGRUL, H. e ARSLAN, N. Production of carboxymethyl cellulose sugar beet pulp cellulose and rheological behaviour of carboxymethyl cellulose. **Carboydrate Polymers**, v.54, n.73-82, 2003.

WANCHOO, R. K.; SHARMA, S. K. e BANSAL, R. Rheologial parameters of some water-soluble polymers. Journal of Polymer Materials, v.13, p.49-55, 1996.

YASSEN, E. I.; HERALD, T. J.; ARAMOUNI, F. M. e ALAVI, S. Rheological properties of selected gums solutions. **Food Research International**, v.38, p.111-119, 2005

<u>CAPÍTULO II. AVALIAÇÃO QUALITATIVA DA LINEARIDADE DO</u> <u>PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO</u>

II.1. RESUMO

Este capítulo apresenta a caracterização, quanto à ordem e linearidade, do processo de pasteurização em trocadores de calor a placas envolvendo cada um dos fluidos newtoniano e não-newtoniano. Também foi feita a análise de sensibilidade das propriedades termofísicas dos fluidos envolvidos. A linearidade foi avaliada pelo método da superposição, após perturbações degrau na vazão de entrada de água quente no pasteurizador e na temperatura de entrada do produto na seção de aquecimento. As linearidades do processo frente às perturbações de vazão de água quente foram estudadas para diferentes temperaturas de entrada de produto na seção de aquecimento. As curvas de reação para o processo, envolvendo ambos os fluidos, foram representadas pela equação de 2ª ordem com fator de amortecimento igual a 1, tanto para o caso das respostas frente às perturbações na vazão de água quente como para as perturbações de carga na temperatura de entrada de produto. Para ambos os fluidos, a não linearidade se mostrou mais pronunciada para perturbações de vazão de água quente, principalmente para as de intensidade negativa. No caso das perturbações de carga na temperatura de entrada dos fluidos do sistema, o processo aproximou-se mais da linearidade tanto para a água quanto para a solução de CMC sódica.

II.2. INTRODUÇÃO

A análise da linearidade de quaisquer processos é de fundamental importância, pois a partir desta é possível prever os comportamentos do sistema frente à diversas perturbações a que este pode estar sujeito. O estudo do regime transiente auxilia também na escolha de uma futura estratégia de controle a ser empregada no processo.

Em geral, as respostas transitórias de sistemas em trocadores de calor a placas podem ser representadas por funções de transferência de primeira ordem e segunda ordem, segundo Berto (2004), Das et al. (1995) e Neto et al. (2005). Esta caracterização dinâmica, só poderia ser aplicável em sistemas de comportamento linear; porém, a aproximação de sistemas não lineares em lineares faz-se vantajosa para o uso das funções de transferência.

Na prática, nenhum sistema apresenta comportamento linear; porém, existem aqueles que se aproximam da linearidade. Processos de transferência de calor que envolvem fluidos newtonianos estão mais sujeitos a se aproximarem da linearidade, enquanto que aqueles que envolvem fluidos não newtonianos estão mais sujeitos a serem não lineares. Isso porque algumas de suas propriedades, principalmente a viscosidade, não varia linearmente com variações de taxa de deformação e temperatura. Esse diagnóstico pode se tornar ainda mais complexo quando se envolve fluidos alimentícios, que possuem uma alta complexidade de composição e o que acaba alterando ainda mais suas propriedades, uma vez que o coeficiente global de transferência de calor ,**"U"**, é dependente do números de Reynolds e Prandtl. Considerando a equação genérica (II.1) proposta por René et al. (1991) para transferência de calor em trocadores de calor a placas,

$$Nu = a \, Re^b \, Pr^c \tag{II.1}$$

observa-se que, uma vez que as propriedades do fluido variem linearmente, basta apenas que os coeficiente **b** e **c** da equação sejam maiores ou menores que a unidade para que o coeficiente "**U**" tenha uma variação não-linear, o que implica que até mesmo processos de transferência de calor em fluidos que possuem variações de propriedades bastante lineares, como no caso da água, podem vir a ser não lineares. Em alimentos, as propriedades termofísicas geralmente são dependentes da quantidade de sólidos presentes. Telis-Romero et al. (1998) fizeram um estudo das propriedades termofísicas do suco de laranja dependente das variações de temperatura e concentração. Concluíram que o aumento da condutividade térmica e do calor específico são lineares e diretamente proporcionais ao aumento da concentração, sendo que, para a densidade, o aumento é linear e inversamente proporcional à concentração e à temperatura.

No geral, sucos que não possuem quantidades expressivas de pectina podem ser considerados fluidos newtonianos, onde uma relação linear entre a tensão de cisalhamento e a taxa de deformação pode ser observada (Ibarz et al., 1994; Rao e Rizvi, 1986; Khalil et al., 1989). Sucos cítricos, que geralmente possuem uma quantidade significativa de pectina, possuem comportamento não newtoniano expresso pelo modelo Lei da Potência (Rao et al., 1984).

Abdelrahim e Ramaswamy (1995) em seu estudo reológico sobre a solução de CMC constataram, através de uma análise de regressão múltipla, que o índice de consistência *m* é o mais influenciado pelas variações de temperatura e pressão. As equações (II.2) e (II.3), apresentadas neste estudo, propõem o cálculo de m e n (índice de comportamento do fluido) em função da temperatura (T, °C) e da concentração da solução (C, % m/m):

$$Log(m) = -0.66 - 0.013T + \frac{0.159}{T} + 0.005TC + 59.5\frac{T}{C}$$
(II.2)

$$n = 0,329 - 0,007T - 0,002TC - 4,088\frac{C}{T}$$
(II.3)

Estes modelos podem ser convenientemente encorporados na equação (II.4) proposta por McCabe (1985) para cálculo de viscosidade dinâmica (μ_f) de fluidos com lei da potência, na maioria das aplicações de engenharia.

$$\mu_{f} = \frac{\left[2^{(n-3)}m\left\{\frac{3n-1}{4n}\right\}^{n}\right]}{u_{f}^{(l-n)}D^{(n-1)}}$$
(II.4)

41

onde u_f representa a velocidade do fluido (m/s) e *D* representa o diâmetro da tubulação (m).

O calor específico da solução de CMC sódica foi estudado por Semmar et al. (2003) e constatou que existe dependência da temperatura para uma solução de 0,5% m/m de CMC. Esta dependência foi proposta pela equação (II.5).

$$c_p = 175,9Ln(T) + 3640,3$$
 (II.5)

Este modelo é valido para faixas de temperatura entre 25 e 90 °C. Apesar do comportamento não linear, a variação do calor específico com a temperatura é pouco pronunciada, variando entre 4200 e 4400 J/kg K. Por isso, para esta faixa de trabalho, a variação pode ser considerada praticamente linear.

O objetivo deste capítulo é avaliar qualitativamente a linearidade do processo de pasteurização envolvendo ambos os produtos após perturbações no sistema e apresentar uma análise de sensibilidade das propriedades da água e da solução de CMC sódica frente às mudanças das condições de processo, para justificar a linearidade dos mesmos.

II.3. MATERIAL E MÉTODOS

II.3.1. Material

A estrutura utilizada para realizar os ensaios foi a mesma já apresentada na seção 3 do capítulo I deste trabalho. O fluido newtoniano utilizado foi água e o não newtoniano foi a solução sódica de CMC a uma concentração de 0,5% m/m. As perturbações de vazão de água quente foram feitas mediante o uso dos variadores de freqüência na bomba, enquanto que as perturbações de carga na temperatura de entrada do produto foram feitas através do chaveamento das válvulas pneumáticas dos tanques que continham produto a temperaturas distintas. A manutenção da temperatura de entrada da água quente no trocador foi feita mediante o uso de uma malha de controle na resistência localizada nesta mesma linha, previamente sintonizada por Berto (2004). Para o tratamento dos dados foram utilizados os programas MATLAB versão 6.1 e Excel for Windows.

II.3.2. Métodos

II.3.2.1. OBTENÇÃO DAS CURVAS DE REAÇÃO EXPERIMENTAIS DO PROCESSO

A linearidade do sistema foi caracterizada de duas formas: para perturbações de vazão de água quente e para perturbações de carga na temperatura de entrada do produto na seção de aquecimento, sempre a partir do estado estacionário definido no capítulo I deste trabalho. A resposta transitória do sistema para perturbações de vazão foi analisada a partir de distintas temperaturas de entrada do produto (± 5°C em relação a temperatura de entrada do estado estacionário definido). Uma vez que o binômio temperatura/tempo deve ser mantido, não foram feitas perturbações de vazão de produto e de temperatura de entrada da água quente no trocador. Para que não houvesse influência da seção de regeneração nos ensaios desta etapa, o produto aquecido foi desviado diretamente para o tanque de armazenamento. A Tabela II.1, Tabela II.2, Tabela II.3 e Tabela II.4 mostram os níveis de perturbação do sistema.

Temperatura de entrada do produto no processo, °C	Vazão de inicial de água quente, L/h	Intensidade das perturbações, L/h			
			Nivel 1 (+,-)	Nivel 2 (++,)	Nivel 3 (+++,)
53,7	494,5	Positiva (+)	65,4	130,6	195,7
58,7					
63,7		Negativa (-)	65,4	130,6	195,7

Tabela II.1 – Perturbações de vazão de água quente realizadas na pasteurização da água

Temperatura de entrada do produto no processo, °C	Vazão de inicial de água quente, L/h	Intensidade das perturbações, L/h			
			Nivel 1 (+,-)	Nivel 2 (++,)	Nivel 3 (+++,)
35,6		Positiva (+)	65,5	130,9	196,2
40,6	496				
45,6		Negativa (-)	65,5	130,9	196,2

Tabela II.2 – Perturbações de vazão de água quente realizadas na pasteurização da solução de CMC sódica

Tabela II.3 – Perturbações de carga na temperatura da água realizadas na seção de aquecimento

Temperatura inicial de entrada do produto no processo, °C	Intensidade d			
		Nível 1	Nível 2	Nível 3
58 7	Positiva (+, ++, +++)	2,7	5,8	8,7
	Negativa (-,,)	2,3	3,2	5,8

Tabela II.4 – Perturbações de carga na temperatura da solução de CMC sódica realizadas na seção de aquecimento

Temperatura inicial de entrada do produto no processo, °C	Intensidade das perturbações, °C			
		Nível 1	Nível 2	Nível 3
40.6	Positiva (+, ++, +++)	3,0	5,4	7,7
+0,0	Negativa (-,,)	3,2	4,2	5,2

As temperaturas de entrada do produto no processo foram obtidas através da circulação de água na camisa do tanque homogeneizador e de estocagem dos mesmos. Devido às dificuldades experimentais, não foi possível realizar uma perfeita perturbação degrau na temperatura de entrada do produto no pasteurizador, mas as curvas de reação foram analisadas como tal, para que as propostas de análise pudessem ser viabilizadas.

II.3.2.2. CARACTERIZAÇÃO DO SISTEMA QUANTO À ORDEM E LINEARIDADE

Após a obtenção dos dados experimentas das curvas de reação a partir do planejamento apresentado, os mesmos foram tratados no software MATLAB v.6.1 no programa de ajuste de funções desenvolvido por Berto (2004).

Para a caracterização da ordem, as curvas de reação com perturbações de vazão de água quente e temperatura de entrada de produto foram ajustadas à equação de 2^a ordem com ζ =1. Após o ajuste, foram gerados os gráficos das curvas de ganho absoluto em função do tempo no programa Excel for Windows:

$$K_{a}(t) = (T(t) - T_{0})$$
(II.6)

onde T_0 representa a temperatura na condições iniciais de pasteurização do produto antes da perturbação e T a temperatura de pasteurização após a perturbação.

A caracterização da linearidade do processo foi feita utilizando a regra da superposição. Foram gerados gráficos do ganho relativizado em função do tempo (equação II.7) para cada perturbação imposta ao sistema. No caso da superposição das curvas, o processo pode ser considerado linear.

$$K_{r}(t) = \frac{(T(t) - T_{0})}{A}$$
(II.7)

onde A representa a amplitude de perturbação aplicada ao sistema.

A comparação da linearidade do processo para perturbações de vazão e perturbações de carga na temperatura de entrada do produto também foi feita através da comparação das taxas de transferência de energia relativizadas pela porcentagem de intensidade da perturbação, seja ela em vazão ou em temperatura. Supondo que a energia transferida pela água quente seja a mesma que o produto irá receber, pode-se construir o gráfico do coeficiente global da transferência de calor em função do tempo, a partir da equação II.8, para cada perturbação imposta ao sistema.

$$\cdot U.A_{TR} = \frac{m_f \cdot c_{pf} \cdot \Delta T_p}{\Delta T_{Ln(aq)}}$$
(II.8)

.

onde m_f é a vazão mássica de produto, c_{pf} é o calor específico do produto, ΔT_p é a diferença logarítmica entre as temperatura de entrada e saída do produto e $\Delta T_{Ln(aq)}$ a diferença logarítmica média entre as temperaturas de saída e entrada da água quente. Como a área de troca A_{TR} é a mesma sempre, esta não irá interferir nos valores para termos de comparação qualitativa.

II.3.2.3. ANÁLISE DA SENSIBILIDADE DO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO

Foram construídos gráficos dos números adimensionais Reynolds e Prandtl (equações II.9 e II.10) em função da temperatura para que a região de maior sensibilidade dos fluidos envolvidos no processo possa ser verificada.

$$Re_{f}(T) = \frac{\rho_{f}(T) \cdot u_{f} \cdot D_{T}}{\mu_{f}(T)}$$
(II.9)

$$Pr_{f}(T) = \frac{\mu_{f}(T) \cdot c_{pf}(T)}{\rho_{f}(T)}$$
(II.10)

No caso do cálculo do número de Reynolds para a solução de CMC sódica, não será utilizada a equação genérica pois a viscosidade dada pela fusão das equações propostas por Abdelrahim e Ramaswamy (1995) e McCabe (1985) já engloba os índices de consistência e comportamento. Os valores das propriedades da água utilizados estão propostos por Incropera e DeWitt (1992). As propriedades reológicas e termofísicas da solução de CMC sódica foram obtidas através das equações II.2 a II.5, aplicável pois as características de Grau de Substituição e peso molecular da CMC obtida se assemelham com a da utilizada no trabalho de Abdelrahim e Ramaswamy (1995). A densidade foi obtida através de medições feitas pelo coriolis para diferentes temperaturas. Todas as metodologias dos cálculos e valores estão apresentados no Anexo III. Para se ter resultados qualitativos de comparação, foi utilizado o diâmetro hidráulico (equação II.11).

$$D_T = \frac{2 \cdot B}{\phi} \tag{II.11}$$

onde $\phi = \frac{A_p}{w \cdot L}$, B é o espaço entre as placas, w a largura, L o comprimento e A_p a área superficial de troca das placas do pasteurizador.

II.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

II.4.1. Caracterização do sistema quanto à ordem e linearidade – pasteurização da água

A Figura II.1, Figura II.2 e a Figura II.3 mostram as curvas de reação do processo relativizadas às amplitudes de perturbação impostas na vazão de água quente. Para o ajuste dos dados foi utilizada a função de 2^a ordem com $\zeta=1$. As tabelas com as equações de cada uma das curvas de reação e seus respectivos coeficientes de correlação e perdas de ajuste de dados estão apresentadas no Anexo I.

Analisando essas figuras, percebeu-se uma tendência de não-linearidade para as diferentes as temperaturas de entrada de produto, um pouco mais pronunciada frente às perturbações negativas de vazão.



Figura II.1 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 53,7^{\circ}C$).



Figura II.2 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 58,7^{\circ}C$).



Figura II.3 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 63,7^{\circ}C$).

A Figura II.4, Figura II.5 e Figura II.6 mostram as curvas de reação da temperatura do processo relativizadas às amplitudes de perturbação impostas na vazão de água quente, individualizadas por intensidade para as diferentes temperaturas de entrada. Nota-se, a partir da análise dos dados, a evolução da não linearidade a medida que se aumenta a distância da intensidade da perturbação entre os níveis positivos e negativos.



Figura II.4 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação no 1º nível de intensidade de vazão de água quente (±65,4 L/h)..



Figura II.5 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação no 2º nível de intensidade de vazão de água quente(±130,6 L/h).


Figura II.6 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbação no 3º nível de intensidade de vazão de água quente(±195,7 L/h).

A Figura II.7 mostra as curvas de reação do processo relativizadas às amplitudes de perturbação de carga impostas na temperatura de entrada do produto. A função de 2^a ordem com $\zeta=1$ foi ajustada para os dados após o tempo morto do processo. Apesar deste ter sido mais bem ajustado pela equação de 1^a ordem com tempo morto, o número n de placas em série faz com que o processo seja de ordem 1^n , ou seja, no final da seção de aquecimento o processo já estaria sendo representado por uma equação de ordem maior que 1. As equações de cada uma das curvas de reação e seus respectivos coeficientes de correlação e perdas de ajuste de dados estão apresentados no anexo I.

Analisando a Figura II.7, percebeu-se também uma pequena tendência de nãolinearidade em relação as perturbações na temperatura de entrada de produto.



Figura II.7 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da água da seção de aquecimento após perturbações de carga na temperatura de entrada de produto.

A Figura II.8, Figura II.9 e Figura II.10 mostram a evolução da taxa de transferência de calor do processo de pasteurização relativizadas pela porcentagem da intensidade da perturbação da vazão de água quente e a Figura II.11 pela perturbação de carga de temperatura de entrada de produto (as mesmas porcentagens apresentadas na Tabela 1 do anexo II). Os gráficos intensificam a hipótese de que o processo possui uma tendência não linear, principalmente frente a perturbações negativas de vazão de água quente.



Figura II.8 - Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor da água na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 53,7^{\circ}C$).



Figura II.9 - Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 58,7^{\circ}$ C).



Figura II.10 - Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 63,7^{\circ}C$).



Figura II.11 - Curvas de reação da água relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação de carga na temperatura de entrada de produto.

II.4.2. Caracterização do sistema quanto à ordem e linearidade – pasteurização da solução de CMC sódica

A Figura II.12, Figura II.14 e a Figura II.14 mostram as curvas de reação do processo relativizadas às amplitudes de perturbação impostas na vazão de água quente. Para o ajuste dos dados foi utilizada a função de 2^a ordem com $\zeta=1$. As tabelas com as equações de cada uma das curvas de reação e seus respectivos coeficientes de correlação e perdas de ajuste de dados estão apresentadas no Anexo I. Analisando as figuras, percebe-se uma não-linearidade do processo para as perturbações negativas frente às diferentes temperaturas de entrada de produto, um pouco mais evidenciada quando comparado com o processo envolvendo a água.



Figura II.12 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 35,6^{\circ}$ C).



Figura II.13 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 40,6^{\circ}$ C).



Figura II.14 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 45,6$ °C).

A Figura II.15, Figura II.16 e a Figura II.17 mostram as curvas de reação do processo relativizadas às amplitudes de perturbação impostas na vazão de água quente, individualizadas por intensidade para as diferentes temperaturas de entrada. Neste caso também pode-se verificar, a partir da análise dos dados, a evolução da não linearidade a medida que se aumenta a distância da intensidade da perturbação entre os níveis positivos e negativos.



Figura II.15 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação no 1º nível de intensidade da vazão de água quente. (±65,5 L/h).



Figura II.16 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação no 2º nível de intensidade na vazão de água quente (±130,9 L/h).



Figura II.17 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbação no 3º nível de intensidade da vazão de água quente (±196,2 L/h).

A Figura II.18 mostra as curvas de reação do processo relativizadas às amplitudes de perturbação de carga impostas na temperatura de entrada do produto. A função de 2^a ordem com $\zeta=1$ foi ajustada para os dados após o tempo morto do processo, análogo ao produto água. As tabelas com as equações de cada uma das curvas de reação e seus respectivos coeficientes de correlação e perdas de ajuste de dados estão apresentadas no anexo I.

Analisando a Figura II.18, percebe-se uma baixa tendência de não-linearidade em relação as perturbações de carga na temperatura de entrada de produto.



Figura II.18 - Curvas de reação relativizadas da temperatura de saída da solução de CMC sódica da seção de aquecimento após perturbações de carga na temperatura de entrada de produto.

A Figura II.19, Figura II.20 e a Figura II.21 mostram a evolução da taxa de transferência de calor do processo de pasteurização da solução de CMC sódica relativizadas pela porcentagem da intensidade da perturbação da vazão de água quente (as mesmas porcentagens apresentadas na Tabela 2 do Anexo II) e a Figura II.22 pela perturbação de carga de temperatura de entrada de produto. Os gráficos intensificam a hipótese de que o processo, neste caso, também possui uma tendência não linear em relação às perturbações negativas



Figura II.19 - Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 35,6^{\circ}C$).



Figura II.20 - Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferência de calor sódica na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 40,6^{\circ}$ C).



Figura II.21 - Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferência de calor na seção de aquecimento após perturbação na vazão de água quente ($T_0 = 45,6^{\circ}C$).



Figura II.22 - Curvas de reação da solução de CMC sódica relativizadas da taxa de transferência na seção de aquecimento após perturbação de carga na temperatura de entrada de produto.

II.4.3. Comparação da linearidade do processo de pasteurização envolvendo água e solução de CMC sódica

A Figura II.23 mostra os valores do ganho relativizado em função das intensidades de perturbação, expressos em porcentagem. Os pontos foram interligados por retas, critério este utilizado apenas para fins comparativos.

Observando a figura, nota-se que os ganhos não são proporcionais a intensidade de perturbação. Caso fossem, os pontos deveriam ser interligados por uma reta sem inclinação. Para cada temperatura inicial da entrada do produto (água), a reta é caracterizada por uma inclinação diferente. Além disso, os valores de ganho relativo para perturbações negativas são maiores, em módulo, comparativamente às perturbações positivas.



Figura II.23 - Ganho relativizado da temperatura de pasteurização da água em função das intensidades de perturbação na vazão de água quente.

A Figura II.24 mostra os valores da constante de tempo em função das intensidades de perturbação, expressos em porcentagem. Os pontos foram interligados por retas, critério este utilizado apenas para fins comparativos.

Observando a figura, nota-se também que as constantes de tempo não são proporcionais a intensidade de perturbação. Caso fossem, os pontos deveriam ser interligados por uma reta sem inclinação. Para cada temperatura inicial da entrada do produto (água), a reta é caracterizada por uma inclinação diferente. Os valores das constantes de tempo para perturbações negativas são aproximadamente iguais, em modulo, quando comparados às perturbações positivas.



Figura II.24 Valores da constante de tempo das curvas de reação da temperatura de pasteurização da água em função das intensidades de perturbação na vazão de água quente.

A Figura II.25 mostra os valores do ganho relativizado da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica em função das intensidades de perturbação, expressos em porcentagem. Os pontos foram interligados por retas, critério este utilizado apenas para fins comparativos.

Observando a figura, assim como no caso da pasteurização da água, nota-se que os ganhos não são proporcionais a intensidade de perturbação. Caso fossem, os pontos deveriam ser interligados por uma reta sem inclinação. Além disso, a inclinação das retas representativas para as perturbações negativas são mais inclinadas que as positivas, evidenciando uma maior tendência de não linearidade nessas intensidades de

perturbação, o que não se percebe no gráfico relativo aos ganhos da pasteurização da água. Os valores de ganho relativo para perturbações negativas são maiores, em módulo, comparativamente às perturbações positivas.



Figura II.25 Ganho relativizado da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica em função das intensidades de perturbação na vazão de água quente.

A Figura II.26 mostra os valores da constante de tempo em função das intensidades de perturbação, expressos em porcentagem. Os pontos foram interligados por retas, critério este utilizado apenas para fins comparativos.

Observando a figura, nota-se também que as constantes de tempo não são proporcionais a intensidade de perturbação. Caso fossem, os pontos deveriam ser interligados por uma reta sem inclinação. Para cada temperatura inicial da entrada do produto (solução de CMC sódica), a reta é caracterizada por uma inclinação diferente. Os valores das constantes de tempo para perturbações negativas são aproximadamente iguais, em modulo, quando comparados às perturbações positivas.



Figura II.26 Valores da constante de tempo das curvas de reação da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica em função das intensidades de perturbação na vazão de água quente.

A Figura II.27 mostra os valores de ganho relativo da temperatura de pasteurização da água e da solução de CMC sódica. As temperaturas de entrada escolhida foram aquelas que mais se aproximavam entre os produtos, para que pudesse ser feita uma análise quantitativa. Observa-se que, para perturbações negativas, as inclinações das curvas de ganho para a água e para a solução de CMC sódica se diferenciam, sendo que para esta última a não linearidade do processo se mostra mais pronunciada.



Figura II.27 Valores do ganho relativo da constante de tempo das curvas de reação da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica e da água em função das intensidades de perturbação na vazão de água quente.

É interessante ressaltar que as observações feitas sobre a análise da Figura II.23, Figura II.24, Figura II.25e da Figura II.26 mostram que a não-linearidade do processo de pasteurização dos produtos não é apenas estática, mas também possui uma parcela de contribuição dinâmica, caracterizada na Figura II.24 e na Figura II.26. Conclusão semelhante foi obtida por Farenzena (2003), que concluiu que o número de desempenho robusto não linear (n-RPN) é composto pelas parcelas dinâmica e estática, sendo que cada uma gera um respectivo peso no numero final.

II.4.4. Análise da sensibilidade do processo de pasteurização

A seguir, são apresentados gráficos que mostram a variação dos números de Prandtl e Reynolds para escoamento entre placas paralelas, tanto para a água como para a solução de CMC sódica. Todos os cálculos dos valores apresentados nos gráficos estão contidos no Anexo III.deste trabalho.

A Figura II.28 mostra a evolução do numero de Prandtl em função da temperatura. Pode-se perceber que a sensibilidade é maior para a solução de CMC sódica, principalmente a temperaturas até 45 °C e aumenta com a concentração. Para o caso da água, o numero de Prandtl praticamente não varia quando comparado com a solução de CMC sódica.



Figura II.28 – Variação do Número de Prandtl da água e da solução de CMC sódica em função da temperatura .

A Figura II.29 mostra a evolução do número de Reynolds para a água em função da temperatura para diferentes velocidades de escoamento. A sensibilidade é maior a altas temperatura e aumenta com a velocidade de escoamento. Pode-se perceber também, comparando a Figura II.28 e a Figura II.29 que a variação do coeficiente global de transferência de calor para o caso da pasteurização da água é somente influenciado pelo número de Reynolds, pois variações de vazão causam um aumento muito mais significativo em Reynolds quando comparado a Prandtl, que é dependente somente das propriedades termofísicas do fluido. No caso da água, a variação de Prandtl é praticamente imperceptível. Este pode explicar porque o processo apresenta uma não-

linearidade mais pronunciada com relação a variações de vazão do que a perturbações de carga na temperatura de entrada do produto.



Figura II.29 – Variação do Número de Reynolds para a água a diferentes velocidades de escoamento em função da temperatura.

A Figura II.30 mostra a evolução do número de Reynolds para a solução de CMC sódica em função da temperatura para diferentes concentração para uma vazão de 250 L/h. Além da dependência direta de Reynolds com o aumento da velocidade, a figura mostra também que seu valor aumenta com o acréscimo da temperatura, uma vez que esta diminui a viscosidade do produto. A comparação da Figura II.30 e da Figura II.28 mostra que as variações de Prandtl são significativas quando comparadas com as de Reynolds a baixas temperaturas.



Figura II.30 – Variação do Número de Reynolds para a solução de CMC sódica a diferentes concentrações para uma vazão de 250 L/h, em função da temperatura.

II.5. CONCLUSÕES

O comportamento transiente do processo foi bem representado por funções de segunda ordem com fator de amortecimento igual a um, tanto para perturbações de vazão como para perturbações de carga na temperatura de entrada do produto. A caracterização do processo mostrou, no geral, que a pasteurização tem um comportamento não-linear, mais evidente à perturbações negativas de vazão de água quente. A evolução do ganho do coeficiente global de transferência de calor "U" confirmou esta hipótese. No caso da solução da CMC sódica, essa evidencia é mais pronunciada, como pode ser observado pela análise comparativas da Figura II.23, Figura II.24, Figura II.25, Figura II.26 e Figura II.27.

A análise da sensibilidade mostrou que o processo de transferência de calor é sensível basicamente a variações de Reynolds para a pasteurização da água e igualmente sensível a variações de Reynolds e de Prandtl para a pasteurização da CMC sódica. Somente um estudo mais aprofundado do perfil de "U" nas placas da seção de aquecimento poderia mostrar a justificativa da não linearidade do processo mais pronunciada frente a variações negativas de vazão de água quente e porque o processo de pasteurização da solução de CMC sódica mostra uma linearidade pouco pronunciada

a perturbações de temperatura de entrada de produto, mesmo sendo o numero de Prandtl sensível na faixa das temperaturas de perturbação, entre 35 e 45 °C.

II.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDELRAHIN, K. A. e RAMASWAMY, H. S. High temperature/pressure reology of caboxymethyl cellulose (CMC). Food Research International, v.38, n.3, p.285-290, 1995.

BERTO, M.I. Avaliação experimental do controle do processo de pasteurização de sucos de laranja. Campinas-SP, 2004. 261p. Doutorado. Departamento de Engenhaira de Alimnetos, UNICAMP.

DAS, S. K.; SPAMG, B. e ROETZEL, W. Dynamic behaviour of plate heat exchangers - experiments and modelling. Journal of Heat Transfer, v.117, p.859-864, 1995.

FARENZENA, M. Numero de Desempenho Robusto Não-Linear: uma Nova
Medida do Grau de Não-Linearidade. Porto Alegre, 2003. 155 p.p. Dissertação (mestre em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade
Federal do Rio Grande do Sul.

IBARZ, A.; GONZALEZ, C. e ESPULGAS, S. Rheology of clarified fruit juices. III: orange juices. Journal of Food Engineering, v.21, p.485-494, 1994.

INCROPERA, F. P. e DE WITT, D. P. **Fundamentos da Transferência de Calor**. 3^a edição.ed. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora, 1992. 455 p.p. KHALIL, K. E.; RAMAKHRISHNA, P.; NANJUNDASWAMY, A. M. e PATWARDHAM, M. V. Rheology of clarified behaviour of clarified banana juice: effect of temperature and concentration. **Journal of Food Engineering**, v.10, p.231-240, 1989.

MCCABE, W. L.; SMITH, J. C. e HARRIOT, P. Unit Operations in Chemical Engineering. New York: McGraw-Hill, 1985.

NETO, A. C.; BERTO, M. I. e SILVEIRA JR., V. Evaluation of linearity between newtonian and non-newtonian fluids in cooling process. In: V Congresso Ibero-Americano de Ingeniaria de Alimentos (CIBIA), 2005, Mexico,

RAO, M. A.; COOLEY, H. J. e VIZALI, A. A. Flow properties of concentrated juices at low temperatures. **Food Technology**, v.38, p.113-119, 1984.

RAO, M. A. e RIVIZI, S. S. H. Effect of temperature on viscosity of fruit juices at low temperatures. **Journal of Food Science**, v.35, p.122-125, 1986.

RENE, F.; LEULIET, J. C. e LALANDE, M. Heat transfer to newtonian and nonnewtonia food fluidos in plate heat exchangers. **Transactions International Chemical** engineering, v.69, p.115-128, 1991.

SEMMAR, N.; TANGUER, J. L. e RIGO, M. O. Specific heat of carboxymethil cellulose and Carbopol solutions. **Thermochimica Acta**, v.402, p.225-235, 2003.

TELIS-ROMERO, J.; TELIS, V. R. N.; GABAS, A. L. e YAMASHITA, F. Thermophysical Properties of brazilian Orange Juice as Affected by Temperature and Water Content. Journal of Food Engineering, v.38, p.27-40, 1998.

<u>CAPÍTULO III. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE CONVENCIONAL NO</u> <u>PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO</u>

III.1. RESUMO

Esta etapa do trabalho consistiu na implementação e configuração do controle convencional PID/*SISO/feedback* para a temperatura de pasteurização no processo envolvendo a água e a solução de CMC sódica como produtos. A variável manipulada utilizada foi a vazão de água quente na seção de aquecimento e a variável controlada a temperatura de pasteurização. Para a sintonia do controlador, foi utilizada a metodologia de Aström e Hägglund (1984). A sintonia das malhas de controle foi diferente para cada um dos produtos envolvidos no processo. A eficiência dos controladores foi avaliada individualmente na seção de aquecimento, neste caso sob perturbações de *set-point* da temperatura de pasteurização; e sob perturbações de carga na temperatura e concentração (no caso da solução de CMC sódica) de entrada do produto, integrada com a seção de regeneração. Os resultados mostraram que o controle PID teve um desempenho inferior na pasteurização da água, provavelmente devido a não-linearidade do processo.

III.2. INTRODUÇÃO

Para que a pasteurização seja efetiva, é indispensável a implementação de um controle eficiente. É muito difícil, durante um processo, manter sempre as mesmas condições de entrada dos fluidos envolvidos. No caso do produto, variações de matériaprima, concentração e temperatura são comuns e podem comprometer a qualidade do produto final se não houver uma compensação para essas variações.

Existem vários trabalhos sobre controles no processo de pasteurização HTST. Dentre eles, Negiz et al. (1998) apresentou um modelo dinâmico obtido a partir do estudo do comportamento do processo HTST sob perturbações nas variáveis manipuladas para uso num controle feedback. Ibarrola et al. (2001) fez o uso do controle preditivo através de modificações metodologia da Matriz Dinâmica de Controle, ou *Dynamic Matrix Control* (DMC) proposta por Cutler & Hamaker (1980). Foi embutido no modelo de ganhos da matriz a contribuição não-linear do processo, o que melhorou a capacidade do controlador de prever erros transitórios. A estratégia da DMC desenvolvida foi comparada com a DMC clássica e controle convencional PID e mostrou uma ação mais rápida e eficiente quando comparada com os métodos convencionais.

A estratégia de controle, bem como sua sintonia, é dependente do comportamento do processo que por sua vez, é dependente das características do produto. A não-linearidade do processo é um dos fatores que mais influencia no desempenho de um controlador. O uso do controle convencional em processos que envolvem um alto grau de não-linearidade pode gerar um desempenho insatisfatório, uma vez que este tipo de estratégia foi desenvolvida para processos lineares. Mesmo assim, o controle PID é usado sem discriminação em processos de pasteurização e muitas vezes, com a mesma sintonia para diferentes produtos. Sendo assim, o objetivo deste capítulo foi implementar e configurar o controle PID/*SISO/Feedback* para o processo de pasteurização da água e da solução de CMC sódica e verificar se a não linearidade de ambos os processos influência no desempenho do controlador, através da comparação dos índices de desempenho de controladores.

III.3. MATERIAL E MÉTODOS

III.3.1. Material

A estrutura utilizada, bem como os fluidos envolvidos nos ensaios são os mesmos já previamente descritos no capítulo I deste trabalho. Para a implementação das malhas, toda a configuração foi feita por Berto (2004) no SYSCOM, software de configuração da rede Fieldbus Foundation. Nele, foram configurados os blocos de funções do controlador PID/feedback para o variador de freqüência da rotação da bomba de água quente em função da temperatura de saída de produto do pasteurizador, no final do tubo de retenção. Também foi implementada uma malha de controle na bomba de produto em função da vazão. Já que um dos objetivos desta etapa foi a perturbação de carga na concentração de entrada da solução de CMC sódica, este controle teve como finalidade manter a vazão do produto constante no caso de altas perdas de carga no TCP, somadas pelo aumento de viscosidade da solução. A sintonia desta malha já havia sido previamente sintonizada pelo método de Ziegler-Nichols. A mudança das constantes do controle PID e manipulação de rotação das bombas e set-point da temperatura de pasteurização e vazão de produto foi realizado no supervisório AIMAX for Windows, através de blocos representativos das malhas de controle. As figuras III.1 e III.2 mostram a estrutura da planta indicando a presença da malha de controle e o bloco do AIMAX, respectivamente. O tratamento dos dados para a obtenção dos parâmetros de sintonia foi realizado no software MATLAB v.6.0.

III.3.2. Métodos

Nesta etapa, todos os ensaios foram realizados a partir das condições iniciais em regime permanente, definidas no capítulo I. Os ensaios de chaveamento da variável manipulada para obtenção dos parâmetros de sintonia e teste de eficiência de sintonia da malha de controle a partir de perturbações de *set-point* na temperatura de pasteurização, foram feitos com a seção de regeneração desativada. Os ensaios de desempenho dos controladores sintonizados serão feitos com perturbações de carga na temperatura e na concentração (no caso da solução de CMC sódica) de entrada de produto com a seção de regeneração ativada. Para essa condição, o objetivo do controlador foi manter a temperatura de pasteurização com a menor oscilação possível.

III.3.2.1. SINTONIA DO CONTROLADOR PID/FEEDBACK

A metodologia proposta para a sintonia do controle PID/*feedback* foi a de Aström & Hägglund (1984), já descrita no capítulo de Revisão Bibliográfica Geral deste trabalho. O chaveamento teve amplitude, a partir das condições iniciais de regime permanente, de ± 130,7 L/h para o caso da água, e de ±130,6 L/h para o caso da CMC sódica. A seção de regeneração manteve-se desativada durante os ensaios desta etapa. Para a escolha do período de chaveamento da variável manipulada, foi proposta uma referência de tempo baseada nas curvas de reação da temperatura de pasteurização dos produtos após perturbação na vazão da água quente, apresentadas no capítulo II deste trabalho.

A proposta do tempo de chaveamento para a utilização da metodologia descrita por Aström & Hägglund (1984) foi de definir o tempo de chaveamento da variável manipulada baseado na curva de reação do ganho absoluto do processo, para perturbações de vazão da variável manipulada. Como foram obtidas curvas de reação para 3 temperaturas de entradas diferentes de produto em 3 níveis de intensidade, optouse por escolher a curva de reação do processo na temperatura média de entrada, para o segundo nível de perturbação na vazão de intensidade positiva, que aproximadamente é uma média do comportamento do processo perante as perturbações.O intervalo de chaveamento acertado refere-se ao tempo no qual ocorreu a inflexão da curva de reação obtida após a perturbação do nível II (130,6 L/h na vazão de água quente, Figura II.2 e 130,9 L.h, Figura II.13). Para obtenção desse tempo, foi desenvolvido um programa no software MATLAB que determina o ponto de inflexão da curva de reação. O ajuste dos dados experimentais para obtenção dos parâmetros do PID foi feito pro um programa codificado no MATLAB desenvolvido por Berto (2004). A equação utilizada para este ajuste utilizada foi do tipo senoidal (equação III.1). A partir dos parâmetros dessa equação foi possível calcular o período crítico.

$$\Delta T = I\cos(P_1 \cdot Dt + P_2) \tag{III.1}$$

onde ΔT é a variação da temperatura de resposta do produto (°C), I é a amplitude da oscilação sustentada (°C), Dt é a variação do tempo (s) e P₁ e P₂ parâmetros da equação. O período crítico é calculado pela equação (III.2).

$$P_{cr} = \frac{2\pi}{P_{l}} \tag{III.2}$$

É importante ressaltar que, como as curvas de reação diferem da água para a solução de CMC sódica, foram obtidos valores diferentes de tempo de chaveamento e, conseqüentemente, do período crítico e das constantes de sintonia para o processo envolvendo cada um dos produtos.

III.3.2.2. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CONTROLADOR

A análise consistiu na avaliação de 3 etapas distintas para ambos os produtos (água e solução de CMC sódica):

- Avaliação do controlador no regime permanente: nesta etapa, o controle foi avaliado ainda com o processo em regime permanente (com a seção de regeneração desativada), para averiguar sua capacidade de manter o *set-point* da temperatura de pasteurização com o mínimo possível de oscilação pelo tempo de 3 minutos, escolhido ao acaso. No caso variações mínimas de temperatura sem tendência de suavização e conseqüente desestabilização do sistema, a malha foi resintonizada através do ajuste dos parâmetros conforme conveniência. Esta etapa foi apenas uma preliminar para avaliar se os parâmetros de controle propostos tinham uma condição mínima de atuar no sistema sem levá-los a desestabilização e para efetivamente testados na próxima etapa de teste da sintonia.
- Avaliação do controlador no teste de eficiência de sintonia de malha: depois de alcançadas as condições mínimas de sintonia capazes de manter as condições de regime permanente estável e com a seção de regeneração desativada, foram feitas perturbações no *set-point* da temperatura de pasteurização do sistema em malha fechada, de ±1,5°C. Objetivou-se o controle ser capaz de ter uma ação rápida e suave o suficiente para não ocasionar oscilações elevadas. Nesta etapa, foram analisados os termos e índices de erros relativizados propostos, com o sistema mantido em malha

fechada por 18 minutos, tempo que foi observado suficiente para o sistema obter a estabilização. Como a perturbação foi equivalente em ambos os níveis, não houve necessidade de analisar os índices de erros de forma relativizada. É importante lembrar que nesta etapa foi feita apenas o teste de sintonia da malha e por isso o *set-point* da temperatura de pasteurização pode ser alterado, o que não ocorreria na prática. Caso o sistema não apresentasse desempenho satisfatório, a malha deveria ser resintonizada, ajustando-se os parâmetros do PID conforme a análise dos termos e indices de erros. O ganho proporcional está relacionado com o tempo de subida, enquanto que o integral auxilia na suavização o erro e o derivativo diminui o sobressinal máximo.

Avaliação do controlador sob perturbações de carga: após a obtenção de uma sintonia satisfatória da malha, foram realizadas a partir do regime permanente e com a seção de regeneração ativada, perturbações de carga na temperatura de entrada e na concentração de produto ,no caso da solução de CMC sódica (Tabela III.1). A análise do desempenho foi feita a partir dos termos e índices de erros relativizados (eq. III.3) propostos, com o sistema mantido em malha fechada por 18 minutos, tempo que foi observado suficiente para se obter sua estabilização:

$$IE_r = \frac{IE}{A} \tag{III.3}$$

onde IE é o índice de erro proposto e A é a amplitude de perturbação.

Tabela III.1 – Intensidade de perturbações de carga na seção de aquecimento para avaliação do desempenho do controle PID/feedback.

	Á	gua	Solução de CMC sódica		
	Temperatura (°C)	Concentração (% m/m)	Temperatura (°C)	Concentração (% m/m)	
Intensidade positiva	3,2	-	4,0	0,2	
Intensidade negativa	-3,3	-	-3,9	-0,2	

III.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

III.4.1. Sintonia do controlador PID/Feedback - água

A Tabela III.2 apresenta os valores obtidos dos parâmetros do controle PID/*feedback* a partir do ajuste da função senoidal aos pontos experimentais, mostrado pela Figura III.1. Para este caso, o método do ponto de inflexão aplicado a curva de reação no segundo nível de intensidade positiva para a temperatura de entrada de 58,7°C (Figura II.2) apresentou um tempo de chaveamento de aproximadamente 18 segundos. Como a resposta do comando a perturbação imposta no variador de freqüência não era imediata, não foi possível impor perfeitamente o tempo de chaveamento proposto. O chaveamento não foi perfeitamente degrau. O comportamento da vazão apresentou-se aproximadamente trapezoidal pois seus valores em L/h foram obtidos em função da freqüência de rotação da bomba de água quente que assim se comportou durante o chaveamento.



Figura III.1 – Comportamento da oscilação sustentada da temperatura da água após chaveamento da vazão de água quente com tempo de chaveamento de 18 segundos.

Tempo de chaveamento proposto, s	18,0
Amplitude de perturbação, h (Hz)	10,0
Amplitude da oscilação, I (°C)	2,1
Período crítico alcançado, P _{cr} (s)	54,9
Ganho crítico, $K_{cr}(s)$	6,1
$K_{c}(s)$	3,7
$\tau_{i}(s)$	27,4
τ_{d} (s)	6,9

Tabela III.2 –	Valores	obtidos	dos	parâmetros	de	sintonia	pelo	método	de	Aström	e
Hagglund (198	84) para a	a pasteur	izaç	ão da água.							

III.4.2. Sintonia do controlador PID/Feedback – solução de CMC sódica

A Tabela III.3 apresenta os valores obtidos dos parâmetros do controle PID/*feedback* a partir do ajuste da função senoidal aos pontos experimentais da solução de CMC sódica, mostrado pela Figura III.2. Para este caso, o método do ponto de inflexão aplicado a curva de reação no segundo nível de intensidade positiva para a temperatura de entrada de 40,6°C aconteceu no tempo 9 segundos, adotado como intervalo de chaveamento (Figura II.13) dos ensaios. Como a resposta do comando a perturbação imposta no variador de freqüência não era imediata, não foi possível impor perfeitamente o tempo de chaveamento proposto. Analogamente ao produto água, o chaveamento não foi perfeitamente degrau. O comportamento da vazão apresentou-se aproximadamente trapezoidal pois seus valores em L/h são obtidos em função da freqüência de rotação da bomba de água quente que assim se comportou durante o chaveamento.

•



Figura III.2– Comportamento da oscilação sustentada da temperatura da solução de CMC sódica após chaveamento da vazão de água quente com tempo de chaveamento de 9 segundos.

Tabela III.3 – Valores obtidos dos parâmetros de sintonia pelo método de Aström e Hagglund (1984) para a pasteurização da solução de CMC sódica.

Tempo de chaveamento proposto, s	9,0
Amplitude de perturbação, h (Hz)	10,0
Amplitude da oscilação, I (°C)	1,4
Período crítico obtido, P _{cr} (s)	32,5
Ganho crítico, K _{cr} (s)	9,2
$K_{c}(s)$	5,5
$\tau_{i}(s)$	16,2
$\tau_{d}(s)$	4,1

III.4.3. Análise do desempenho dos controladores

III.4.3.1. AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR NO REGIME PERMANENTE

A Figura III.3 e a Figura III.4 mostram o comportamento do controlador sob regime permanente para a pasteurização da água e da solução de CMC sódica, respectivamente. A análise para cada caso mostra que a oscilação em torno da temperatura de pasteurização foi mínima, ficando em torno de 0,1°C. Assim, uma vez que o controlador não desestabilizou o sistema em condições de regime permanente, estas sintonias serão testadas sob perturbações de *set-point* no teste de sintonia da malha.



Figura III.3 – Comportamento do controlador PID/ feedback sob regime permanente para a pasteurização da água.



Figura III.4– Comportamento do controlador PID/ feedback sob regime permanente para a pasteurização da solução de CMC sódica.

III.4.3.2. AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR NO TESTE DE DESEMPENHO DE SINTONIA DE MALHA

A Figura III.5 mostra o desempenho do controlador após perturbação de +1,5°C no *set-point* da temperatura de pasteurização da água. O tempo de subida da temperatura foi muito lento, então uma re-sintonia aumentando o valor da constante proporcional se fez necessário. As Figura III.6 e a Figura III.7 mostram o comportamento do controlador após a re-sintonia e a Tabela III.4 os parâmetros dessa re-sintonia. Pode-se perceber, pela a análise dos resultados, que a não linearidade do processo no caso da



água como produto não influenciou o desempenho do controlador no teste da sintonia de malha.

Figura III.5– Comportamento do controlador PID/ feedback antes da re-sintonia após perturbação de +1,5°C na temperatura de pasteurização da água.



Figura III.6– Comportamento do controlador PID/ feedback re-sintonizado após perturbação de +1,5°C na temperatura de pasteurização da água.



Figura III.7– Comportamento do controlador PID/ feedback re-sintonizado após perturbação de -1,5°C na temperatura de pasteurização da água.

Tabela III.4 – Parâmetros de re-sintonia para a malha de controle da temperatura de pasteurização da água

	1ª sintonia	2ª sintonia
$K_{c}(s)$	3,7	5,0
$\tau_i(s)$	27,4	27,4
$\tau_{d}(s)$	6,9	5,9
A Tabela III.5 mostra os índices de erros e desempenho (tempo de sobressinal t_s , erro de sobressinal e_s e tempo de acomodação t_{ac}) alcançados pelo controlador após a resintonia. O tempo de acomodação foi considerado a partir do momento que não houve variações maiores que 0,1°C na temperatura de pasteurização.

Tabela III.5 – Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação de *set-point* na temperatura de pasteurização da água.

Perturbação, °C	IAE (°C/s)	ISE (°C ² /s)	ITAE (°C/s ²)	$t_{s}\left(s ight)$	$e_s(s)$	$t_{ac}(s)$
1,5	1,50	0,06	2,04	4,45	0,1	2,65
-1,5	1,59	0,07	2,11	4	0,1	1,7

Apesar de não ter havido erro de sobressinal, ou *overshoot* pronunciado, o controle mostrou-se rápido no tempo de acomodação e seu desempenho gerou baixos valores de índices de erro. Por isto, esta sintonia foi considerada.

A Figura III.8 e a Figura III.9 mostram o desempenho do controlador após perturbação de $\pm 1,5^{\circ}$ C no *set-point* da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica. Nota-se que houve uma dificuldade de estabilização para a perturbação de intensidade negativa. Este fato pode ser explicado pela maior não-linearidade do processo de pasteurização da solução de CMC sódica em relação às ações negativas de vazão da bomba de água quente, conforme evidenciada no capítulo II deste trabalho (Figuras II.7, II.8, II.20, II.21 e II.22). Como o controle PID/*feedback* atua proporcionalmente ao erro, houve dificuldade em alcançar o novo estado estacionário.



Figura III.8– Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de 1,5°C na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.



Figura III.9 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de -1,5°C na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.

A Tabela III.6 mostra os índices de erros e desempenho (tempo de sobressinal, t_s, erro de sobressinal, e_s, e tempo de acomodação, t_{ac}) alcançados pelo controlador na pasteurização da solução de CMC sódica. O tempo de acomodação foi considerado a partir do momento que não houve variações maiores que 0,1°C na temperatura de pasteurização. O desempenho pior do controle PID/*feedback* em relação às perturbação negativa é visível, quando comparados aos índices à perturbação positiva, que obteve quase o mesmo desempenho quando controlada a temperatura de pasteurização da água. O valor de *overshoot* alcançado na perturbação negativa foi maior que o dobro do alcançado na perturbação positiva. Mesmo assim, esta sintonia será utilizada, uma vez que este mau desempenho não se deve a sintonia obtida para o controlador

PID/*feedback*, mas sim pelo processo de pasteurização da CMC sódica ter uma nãolinearidade pronunciada frente a perturbações negativas de vazão.

Perturbação, °C	IAE (°C/s)	ISE (°C 2 /s)	ITAE (°C/s ²)	$t_{s}\left(s ight)$	$e_s(s)$	$t_{ac}(s)$
1,5	1,60	0,07	2,97	1,60	0,3	2,50
-1,5	2,62	0,08	6,93	1,45	0,7	6,40

Tabela III.6 – Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação de *set-point* na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.

III.4.3.3. AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR SOB PERTURBAÇÕES DE CARGA

A Figura III.10 e a Figura III.11 mostram o desempenho do controlador PID/*feedback* sob perturbações de carga na temperatura de entrada da água no pasteurizador sob influência da seção de regeneração ativada. O valor máximo de sobressinal alcançado em ambos os casos não ultrapassou 0,2°C.



Figura III.10 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de +3,4°C na temperatura de entrada da água.



Figura III.11 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de -3,3°C na temperatura de entrada da água.

A Figura III.12 e a Figura III.13 mostram o desempenho do controlador PID/*feedback* sob perturbações de carga na temperatura de entrada da solução de CMC sódica no pasteurizador conforme mostra a Tabela III.1. Apesar do valor máximo de sobressinal alcançado em ambos os casos não ter ultrapassado 0,4°C, a temperatura oscilou mais quando comparado com o controle da água, principalmente no caso da perturbação positiva, onde a vazão de água quente diminui. Esta oscilação é fruto da inconsistência desse tipo de controle frente à não linearidade do processo.



Figura III.12 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de +4,0°C na temperatura de entrada da solução de CMC sódica.



Figura III.13 – Comportamento do controlador PID/ feedback após perturbação de carga de -3,9°C na temperatura de entrada da solução de CMC sódica.

A Tabela III.7 mostra os índices de erros e desempenho (tempo de sobressinal, t_s, erro de sobressinal, e_s, e tempo de acomodação, t_{ac}) alcançados pelo controlador na pasteurização da água e da solução de CMC sódica. O tempo de acomodação foi considerado a partir do momento que não houve variações maiores que 0,1°C na temperatura de pasteurização. A análise dos índices mostra o desempenho satisfatório do controlador para ambas as perturbações, no caso da água como produto, e que a não linearidade do processo, neste caso, não influenciou. Comparativamente, o desempenho do controlador na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica foi pior,

provavelmente devido a não linearidade do processo maior quando comparada ao da água, que não é compensada pelo controle PID/*feedback*.

	Pert.	positiva	Pert. N	legativa
	Água	Sol. CMC	Água	Sol. CMC
IAE_R (°C/s/°C)	0,17	0,40	0,14	0,23
ISE_R (°C ² /s/°C)	0,00	0,01	0,00	0,00
ITAE _R (°C/s ² /°C)	1,05	2,26	0,68	1,38
$t_{s}(s)$	3,15	4,60	3,10	2,70
$e_{s}(^{o}C)$	0,20	0,40	0,20	0,30
$t_{ac}(s)$	3,95	5,15	4,65	4,10

Tabela III.7 – Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação de carga na temperatura da água e da solução de CMC sódica.

A fim de testar se realmente o controle PID/*feedback* é instável, decorrente de uma não linearidade pronunciada do processo, foram realizadas perturbações de carga na concentração de entrada da solução de CMC. A Figura III.14 e a Figura III.15 mostram o desempenho do controlador sob essas perturbações.



Figura III.14 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de +0,2% m/m na concentração de entrada de produto.



Figura III.15 – Comportamento do controlador PID/feedback após perturbação de carga de -0,2% m/m na concentração de entrada de produto.

A partir da análise dessas figuras, conclui-se que a utilização de controle PID/*feedback* em processos não-lineares deve ser feito com cautela. Este não foi capaz de manter a temperatura de pasteurização após a perturbação de carga negativa de concentração. No caso de perturbações de carga negativa na concentração de produto, o controle mostrou não ser capaz de diminuir a vazão do sistema gradualmente, o que levou o processo a uma total desestabilização. A não linearidade afetou o controlador de tal forma que foi inevitável a desestabilização. Isto mostra que a sintonia do controlador deve ser diferente para produtos que possuem diferentes concentrações. Uma sintonia que ocasionasse uma ação mais lenta do controlador seria recomendada; em contrapartida, o produto estaria fora da temperatura de pasteurização ideal por mais tempo e esta ineficiência poderia comprometer definitivamente a qualidade do produto final, caso um fluido alimentício de comportamento não-newtoniano estivesse sendo processado. Não será feita, neste capítulo, a apresentação dos índices de desempenho da pasteurização da solução de CMC sódica para perturbações de concentração, uma vez que, como o controle PID não conseguiu manter as condições de processo para a perturbação negativa, não haveria como comparar com os índices para a perturbação positiva.

III.5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados contidos neste capítulo mostraram que:

- Quanto a sintonia do controlador PID/feedback, a proposta do ponto de inflexão se mostrou eficiente para o cálculo do tempo de chaveamento da variável manipulada para a sintonia pelo método de Aström & Hägglund. As malhas tiveram sintonia diferente para cada um dos produtos envolvidos no processo. Tanto para a malha de controle da temperatura de pasteurização de água como para a da solução de CMC sódica, a sintonia do controlador se mostrou boa após análise de seu comportamento no regime permanente.
- Quanto ao desempenho do controlador no teste de eficiência de sintonia da malha, esse se mostrou eficiente para o processo envolvendo a água e a não linearidade do processo não influenciou no desempenho do controlador. Apenas um ajuste fino necessitou ser feito na sintonia da malha. No caso da solução de CMC sódica, a temperatura oscilou mais, comparativamente, no teste de sintonia de malha, mas provavelmente decorrente da não linearidade maior do processo quando este fluido é pasteurizado em relação a água e não da sintonia obtida.
- A análise do comportamento do controle *PID/feedback* sob perturbações de carga na temperatura de entrada do produto mostrou que, para a água, este se comporta satisfatoriamente, tanto para perturbações negativas como para perturbações positivas. No caso da solução de CMC sódica, o controlador conseguiu manter a temperatura, mas com uma oscilação maior, principalmente na perturbação de carga positiva, onde a bomba de água quente teve que diminuir a rotação. Para esta situação, o processo tem comportamento não linear pronunciado, o que justifica a oscilação maior neste caso.

 Para perturbações de carga na concentração de CMC sódica, a análise dos resultados mostrou que uma alteração na não-linearidade do processo pode acarretar na desestabilização do sistema quando um controlador linear, como o PID/*feedback*, é utilizado.

Pode-se concluir que a não linearidade do processo afetou o desempenho do controlador no caso da pasteurização da solução de CMC sódica e que se alterada pode comprometer a pasteurização e afetar definitivamente a qualidade do produto final. Este fato mostra a importância do estudo prévio do processo antes que se faça a escolha da estratégia de controle adequada.

III.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASTRÖM, K. J. e HÄGGLUND, T. Automatic tunning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins. **Automatica**, v.20, n.5, p.645-651, 1984.

BERTO, M.I. Avaliação experimental do controle do processo de pasteurização de sucos de laranja. Campinas-SP, 2004. 261p. Doutorado. Departamento de Engenhaira de Alimnetos, UNICAMP.

CUTLER, C. R. e RAMAKER, B. L. Dynamic matrix control - a computer control algarithm. In: Proceeding of the JACC (Joint Automatic Control Engineering), 1980, San Francisco, USA, v.WP-5B,

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

NEGIZ, A.; RAMANAUSKAS, P.; ÇINAR, A.; SCHLESSER, J. E. e ARMSTRONG, D. J. Modelling, monitoring and control strategies for high temperature short time pasteurization systems - 1. Empirical model and development. **Food Control**, v.9, p.1-15, 1998.

CAPÍTULO IV. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLE FUZZY NO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO

IV.1. RESUMO

Esta etapa do trabalho consistiu na implementação e configuração do controle *fuzzy*/PID para a temperatura de pasteurização no processo envolvendo a água e a solução de CMC sódica. A variável manipulada utilizada foi a vazão de água quente na seção de aquecimento e a variável controlada foi a temperatura de pasteurização. Para a sintonia do controlador, foi utilizada a metodologia de Li (1997). Foram utilizadas as mesmas funções de pertinência e base de regras, mas a sintonia dos fatores de escala das malhas de controle foi diferente para cada um dos produtos envolvidos no processo. A eficiência dos controladores foi avaliada na seção de aquecimento com a seção de regeneração desativada, neste caso para o teste de eficiência de sintonia da malha sob perturbação de *set-point* na temperatura de pasteurização; e integrada com a seção de regeneração ativada, sob perturbação de carga na temperatura e concentração (no caso da solução de CMC sódica) de entrada do produto. Os resultados mostraram que o controle *fuzzy*/PID teve um desempenho satisfatório tanto na pasteurização da solução de CMC sódica.

IV.2. INTRODUÇÃO

A implementação do controle PID em processos é uma prática comum na indústria de alimentos. Seu uso indiscriminado sem o conhecimento prévio do processo pode colocar em risco a qualidade do produto final, uma vez que este tipo de estratégia de controle não está preparada para compensar erros em processos não lineares. A utilização de uma estratégia de controle flexível que permita embutir em sua rotina não-linearidades do sistema pode ser uma saída para diminuir o risco de desestabilização ou garantir menor oscilação das variáveis controladas do processo. Existe ainda um certo preconceito em relação ao uso do controle fuzzy, principalmente pela indústria, que não vê vantagens na aplicação de tal estratégia de controle. A falta de conhecimento do comportamento do processo e sua influência no desempenho do controlador pode ser um dos motivos. A diminuição da variabilidade do processo de pasteurização é uma forma de trazer maior valor agregado ao produto e garantir que inativações enzimáticas e microbiológicas sejam realizadas com êxito.

Alguns trabalhos na literatura foram encontrados que objetivam a implementação do controle *fuzzy* em processos não-lineares para verificar uma possível melhora de desempenho quando comparado a controles convencionais. Shief et al. (1992), mostram a implementação do controle nebuloso e comparam seu desempenho à estratégia de controle convencional, porem em um processo considerado linear, o aquecimento da água. Berto (2004) implementou o controle fuzzy num processo de pasteurização de uma solução modelo de caráter newtoniano e comparou seu desempenho com o controle convencional. Não foi possível chegar a uma resposta conclusiva a respeito de qual seria o melhor controle implementado, uma vez que ambos obtiveram similar desempenho no controle da temperatura de pasteurização da solução modelo.

Assim sendo, o objetivo deste capítulo foi implementar e configurar o controle *Fuzzy*/PID *SISO/Feedback* para o processo de pasteurização da água e da solução de CMC sódica e verificar se a linearidade de ambos os processos influencia no desempenho do controlador, através da comparação dos índices de desempenho de controladores.

IV.3. MATERIAL E MÉTODOS

IV.3.1. Material

A estrutura utilizada para os ensaios é a mesma já previamente descrita no capítulo I deste trabalho, bem como os fluidos envolvidos no processo. As variáveis manipulada e controlada foram as mesmas descritas no capítulo III. A malha de controle contendo a bomba de produto, objetivando anulação da influência das perdas de carga na vazão, também foi utilizada. O bloco *fuzzy* utilizado para configuração das malhas nos softwares configurador e supervisório SYSCOM e no AIMAX *for Windows*, respectivamente, foi o mesmo previamente desenvolvida por Berto (2004), a ser descrito na metodologia. A manipulação de rotação das bombas e *set-point* da temperatura de pasteurização foram realizados no supervisório AIMAX *for Windows*, através de blocos representativos das malhas de controle. O tratamento dos dados para a obtenção dos parâmetros de sintonia foi realizado no software MATLAB v.6.0.

IV.3.2. Métodos

Nesta etapa, todos os ensaios foram realizados a partir do regime permanente definido no capítulo I, exceto para o teste de sintonia da malha de controle que foi feito com a seção de regeneração desativada, a partir de perturbações de *set-point* na temperatura de pasteurização. Só então foram feitas perturbações de carga na temperatura e concentração (no caso da solução de CMC sódica) de entrada de produto com a seção de regeneração ativada. Para esta condição, o controlador teve como objetivo manter a temperatura de pasteurização com a menor oscilação possível.

IV.3.2.1. IMPLEMENTAÇÃO DO CONTROLADOR FUZZY

O bloco *fuzzy* para configuração das malhas no SYSCOM desenvolvido por Berto (2004) constitui em implementar uma rotina no sistema supervisório AIMAX *for windows*, contendo uma equação multivariável que representa a superfície de resposta do comportamento da variável de saída em função das variáveis de entrada. Para gerar esta equação, obteve os valores referentes à superfície de resposta da saída normalizados para as funções de pertinência e base de regras de ação direta propostas por Li (1997).

As funções de pertinência utilizadas pela metodologia são triangulares de cardinalidade 7 e espaçamentos iguais, que variam de grande negativo (GN) à grande positivo (GP). A Tabela IV.1 mostra a base de regras sugerida para ação direta do controlador.

				$\Delta e / \Delta t$			
	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GP
е							
GP	ZR	PP	MP	GP	GP	GP	GP
MP	PN	ZR	PP	MP	GP	GP	GP
PP	MN	PN	ZR	PP	MP	GP	GP
ZR	GN	MN	PN	ZR	PP	MP	GN
PN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP	MP
MN	GN	GN	GN	MN	PN	ZR	PP
GN	GN	GN	GN	GN	GN	GN	ZR

Tabela IV.1 - Base de regras proposta por Li (1997) para ação direta do controlador.

Os valores de entrada erro (e) e taxa de variação do erro ($\Delta e/\Delta t$, representada por Δe na equação) também foram normalizados antes de serem transformados em proposições nebulosas. A superfície de resposta foi gerada no *toolbox fuzzy* do software MATLAB v.6.0 considerando a *fuzzificação* e a *defuzzificação* pelo método do centro de área. O ajuste feito para a superfície de resposta gerou a equação IV.1, representativa para este caso específico do processo de pasteurização. Saída representa o incremento na vazão da bomba de água quente.

$$Saida = -0,0038 - 0,9125.e - 0,9047. \Delta e + 0,0047.e^{2} + 0,0037 \Delta e^{2} - 0,0036.e.\Delta e + 0,0986.e^{3} + 0,0873.\Delta e^{3} + 0,4372.e.\Delta e^{2}$$
(IV.1)

A rotina foi programada para que os valores de entrada fossem normalizados pela multiplicação dos fatores de escala K_e, no caso do erro (e) e K_d, no caso da taxa de variação do erro (Δ e). O valor de saída f_z, obtido a partir da equação IV.1, seria convertido em valor de atuação de saída f_z^{PID} através da soma dos termos f_z^{PI} = t.\Sigma f_z(t).K₀ e f_z^{PD} = f_z.K₁. Os detalhes da programação no recurso de programação script do supervisório AIMAX *for windows* pode ser visto no Anexo IV.

IV.3.2.2. SINTONIA DO CONTROLADOR FUZZY/PID

Após a implementação do controle *fuzzy/*PID no sistema, a sintonia passou a ser apenas o cálculo dos fatores de escala propostos por Li (1998), com base nos valores já obtidos para a malha de controle PID da temperatura de pasteurização de cada um dos produtos. Detalhes dos cálculos desta metodologia podem ser revisados no capítulo Revisão Bibliográfica Geral.

IV.3.2.3. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO CONTROLADOR

A metodologia utilizada nesta etapa para a avaliação do desempenho do controle fuzzy/PID foi a mesma descrita no capítulo III, através da avaliação do controlador em regime permanente e no teste de eficiência de sintonia de malhas sob perturbação de \pm 1,5°C no *set-point*, ambos com a seção de regeneração desativada; e sob perturbações de carga no sistema, com a seção de regeneração ativada. A Tabela IV.2 mostra os níveis de intensidades das perturbações de carga impostas no produto para a avaliação do desempenho do controlador.

Tabela IV.2 – Intensidade de perturbações de carga na seção de aquecimento para avaliação do desempenho do controle fuzzy/PID/feedback.

	Á	gua	Solução de	CMC sódica
	Temperatura (°C)	Concentração (% m/m)	Temperatura (°C)	Concentração (% m/m)
Intensidade positiva	2,9	-	3,8	0,2
Intensidade negativa	-3,0	-	-3,8	-0,2

IV.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

IV.4.1. Sintonia do controlador Fuzzy/PID/Feedback – água

A Tabela IV.3 mostra os valores obtidos dos fatores de escala e saída segundo a metodologia de Li (1997), a partir da sintonia obtida para a malha de controle da temperatura de pasteurização da água para o controle convencional PID. Foi necessário um ajuste fino, pois o controle se mostrou instável perante pequenas variações do sistema, ainda operando em regime permanente. A tabela também apresenta os valores de re-sintonia. O critério de re-sintonia adotado foi causar uma redução apenas em K₀ e K₁ até atingir um valor de sintonia que não causasse oscilações bruscas (\pm 0,1°C) na temperatura de pasteurização sob ação do controlador em regime permanente. Apenas uma re-sintonia foi necessária.

Parâmetros sintonia PID		Ра	fatores de escala	
	Valores finais		Valores iniciais	Valores finais
K _c	5	K ₀	1	0,4
$ au_{ m i}$	27,4	K_1	13,7	5,49
$ au_{ m d}$	6,9	Ke	0,18	0,18
		K _d	2,47	2,47

Tabela IV.3 – Parâmetros de sintonia e re-sintonia dos fatores de escala para o controlador *fuzzy*/PID obtidos a partir da sintonia do controle PID na temperatura de pasteurização da água

IV.4.2. Sintonia do controlador Fuzzy/PID/Feedback – solução de CMC sódica

A Tabela IV.4 mostra os valores obtidos dos fatores de escala e saída segundo a metodologia de Li (1997), a partir da sintonia obtida para a malha de controle da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica para o controle convencional PID. Assim como no caso da malha para a água, foi necessário um ajuste fino, pois o controle se mostrou instável sob pequenas variações do sistema, operando em regime permanente. O critério adotado para re-sintonia foi causar uma redução de igual intensidade nos valores dos fatores de escala K_0 e K_e até atingir um valor de sintonia que não causasse oscilações bruscas (± 0,1°C) na temperatura de pasteurização sob ação do controlador em regime permanente. No caso, a primeira redução do valor dos fatores de escala citados foi de 60%. Apenas uma re-sintonia foi necessária.

Parâme	Parâmetros sintonia PID		râmetros de sintonia dos	fatores de escala
	Valores finais		Valores iniciais	Valores finais
K _c	5	K ₀	1	0,4
$ au_{i}$	27,4	\mathbf{k}_1	8,1	3,25
$ au_{ m d}$	6,9	Ke	0,34	0,18
		K _d	2,8	1,46

Tabela IV.4 – Parâmetros de sintonia dos fatores de escala obtidos para o controlador *fuzzy* a partir da sintonia do controle PID na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.

IV.4.3. Análise do desempenho dos controladores

IV.4.3.1. AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR NO REGIME PERMANENTE

A Figura IV.1 e a Figura IV.2 mostram o comportamento do controlador sob regime permanente para a pasteurização da água e da solução de CMC sódica, respectivamente. A análise para cada caso mostra que a oscilação em torno da temperatura de pasteurização foi mínima, ficando em torno de 0,1°C. Estas sintonias então serão testadas sob perturbações de *set-point* para o teste de sintonia de eficiência da malha.



Figura IV.1 - Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* sob regime permanente para a pasteurização da água.



Figura IV.2 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* sob regime permanente para a pasteurização da solução de CMC sódica

IV.4.3.2. AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR NO TESTE DE EFICIÊNCIA DE SINTONIA DE MALHA

A Figura IV.3 e a Figura IV.4 mostram o desempenho do controlador após perturbação de ±1,5°C no *set-point* da temperatura de pasteurização da água. Pode-se perceber, pela a análise dos resultados, o bom desempenho do controle fuzzy no teste da sintonia de malha, caracterizado por uma ação rápida e com um satisfatório tempo de acomodação. Em ambos os casos, o valor de sobressinal não ultrapassou 0,4°C. A não linearidade do processo envolvendo a água parece não ter influenciado muito o controlador.



Figura IV.3 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de +1,5°C na temperatura de pasteurização da água.



Figura IV.4– Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de - 1,5°C na temperatura de pasteurização da água.

A Tabela IV.5 mostra os índices de erros e desempenho (tempo de sobressinal, t_s , erro de sobressinal, e_s e tempo de acomodação, t_{ac}) alcançados pelo controlador após a re-sintonia. O tempo de acomodação foi considerado a partir do momento que não houve variações maiores que 0,1°C na temperatura de pasteurização. Os índices de desempenho do controlador ficaram muito próximos, tanto para a perturbação positiva como para a negativa.

Perturbação, °C	IAE (°C/s)	ISE (°C 2 /s)	ITAE (°C/s ²)	$t_{s}\left(s ight)$	$e_s(s)$	$t_{ac}(s)$
1,5	2,03	0,12	3,07	2,4	0,3	3,45
-1,5	2,57	0,13	3,83	2,5	0,4	3,35

Tabela IV.5 – Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação de *set-point* na temperatura de pasteurização da água

A Figura IV.5 e a Figura IV.6 mostram o desempenho do controlador após perturbação de ±1,5°C no *set-point* da temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica. Pode-se perceber, pela análise dos resultados, o bom desempenho do controle fuzzy no teste da sintonia de malha, caracterizado por uma ação rápida e suave e com um satisfatório tempo de acomodação, apesar da temperatura de pasteurização ter oscilado um pouco sob a perturbação negativa. Em ambos os casos, o valor de sobressinal não ultrapassou 0,4°C. A não linearidade do processo envolvendo a solução de CMC sódica, principalmente para perturbações negativas de vazão, foi um pouco compensada pelo controlador na perturbação negativa.



Figura IV.5 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de +1,5°C na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.



Figura IV.6 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de -1,5°C na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.

A Tabela IV.6 mostra os índices de erros e desempenho (tempo de sobressinal, t_s , erro de sobressinal, e_s e tempo de acomodação, t_{ac}) alcançados pelo controlador após a re-sintonia. O tempo de acomodação foi considerado a partir do momento que não houve variações maiores que 0,1°C na temperatura de pasteurização. Os índices de desempenho do controlador ficaram muito próximos, tanto para a perturbação positiva como para a negativa.

Perturbação, °C	IAE (°C/s)	ISE (°C ² /s)	ITAE (°C/s 2)	$t_{s}\left(s ight)$	$e_{s}(s)$	$t_{ac}(s)$
1,5	2,68	0,14	4,56	3	0,3	4,5
-1,5	2,92	0,14	5,34	2,4	0,4	4,5

Tabela IV.6 – Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação de *set-point* na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica.

IV.4.3.3. AVALIAÇÃO DO CONTROLADOR SOB PERTURBAÇÕES DE CARGA

A Figura IV.7 e a Figura IV.8 mostram o desempenho do controlador Fuzzy/PID/feedback sob perturbações de carga na temperatura de entrada da água no pasteurizador, mostradas na Tabela IV.2. O valor máximo de sobressinal alcançado em ambos os casos não ultrapassou $0,2^{\circ}C$.



Figura IV.7 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de carga de 2,9°C na temperatura de entrada da água.



Figura IV.8 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de carga de -3,0°C na temperatura de entrada da água.

A Figura IV.9 e a Figura IV.10 mostram o desempenho do controlador Fuzzy/PID/feedback sob perturbações de carga na temperatura de entrada da solução de CMC sódica no pasteurizador mostradas na Tabela IV.2. O valor máximo de sobressinal alcançado em ambos os casos não ultrapassou 0,4°C. A temperatura quase não apresentou oscilação no caso da perturbação positiva onde a vazão de água quente diminui. Pode-se perceber, pela análise das figuras, que 0 controlador Fuzzy/PID/feedback conseguiu minimizar as variações de temperatura decorrentes da não-linearidade do processo, quando comparado com o controlador PID.



Figura IV.9 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de carga de 3,8°C na temperatura de entrada da solução de CMC sódica.



Figura IV.10 – Comportamento do controlador Fuzzy/PID/ feedback após perturbação de carga de -3,8°C na temperatura de entrada da solução de CMC sódica

A Tabela IV.7 mostra os indices de erros e desempenho (tempo de sobressinal, t_s , erro de sobressinal, e_s e tempo de acomodação, t_{ac}) alcançados pelo controlador na pasteurização da água e da solução de CMC sódica. O tempo de acomodação foi considerado a partir do momento que não houve variações maiores que 0,1°C na temperatura de pasteurização. A análise dos índices mostra o desempenho satisfatório do controlador para ambos os produtos e que a não linearidade do processo, neste caso, influenciou menos o desempenho do controle *Fuzzy*/PID/*Feedback*, mesmo as funções de pertinência estando igualmente espaçadas de forma linear.

	Pert.	positiva	Pert. N	Vegativa
	Água	Sol. CMC	Água	Sol. CMC
IAE_{R} (°C/s/°C)	0,19	0,40	0,25	0,33
ISE_R (°C ² /s/°C)	0,00	0,01	0,00	0,00
ITAE _R (°C/s ² /°C)	0,76	1,71	1,53	1,85
$t_{s}(s)$	2,40	2,90	2,95	1,55
$e_{s}(s)$	0,20	0,40	0,20	0,30
$t_{ac}(s)$	3,70	5,65	4,40	5,50

Tabela IV.7 – Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação de carga na temperatura de produto

A fim de testar se realmente o controle *Fuzzy*/PID/*feedback* seria capaz de suportar alterações de não linearidade do processo, foram realizadas perturbações de carga na concentração de entrada da solução de CMC. A Figura IV.11 e a Figura IV.12 mostram o desempenho do controlador frente essas perturbações. A partir da análise dessas figuras, pode-se verificar que o controlador manteve as condições de processo, apesar do valor de sobressinal ter sido alto. Talvez uma sintonia que ocasionasse uma ação mais rápida do controlador pudesse ser testada; em contrapartida, poderia ocasionar uma oscilação maior da temperatura de pasteurização.



Figura IV.11 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de carga de +0,2% m/m na concentração de entrada da solução de CMC sódica.



Figura IV.12 – Comportamento do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback* após perturbação de carga de -0,2% m/m na concentração de entrada da solução de CMC sódica.
A Tabela IV.8 apresenta os índices de erro e desempenho absolutos do controlador após as perturbações de carga na concentração, que foram de intensidades iguais. Pode-se perceber que o desempenho ficou próximo em ambas as situações, sendo um pouco pior para a perturbação negativa de concentração. Uma explicação para esse fato provém da não linearidade do processo ser mais sensível a variações negativas de vazão de água quente do que de aumento de viscosidade da solução de CMC sódica, como observado no capítulo II.

Tabela IV.8 – Índices de erro e desempenho do controlador alcançados após perturbação de carga na concentração da solução de CMC sódica.

	Pert. positiva	Pert. Negativa
IAE (°C/s/°C)	5,34	5,94
ISE (°C²/s/°C)	0,81	0,37
ITAE (°C/s²/°C)	21,85	25,89
$t_{s}(s)$	2,60	2,80
$e_{s}(s)$	-1,90	2,00
$t_{ac}(s)$	9,95	8,10

IV.5. CONCLUSÕES

A análise dos resultados contidos neste capítulo mostraram que:

Quanto a sintonia do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback*, a metodologia de Li (1998) mostrou-se eficiente tanto para a malha de controle da temperatura de pasteurização de água como para a da solução de CMC sódica. A sintonia do controlador se mostrou boa após análise de seu comportamento no regime permanente subseqüente a um ajuste fino, que se mostrou necessário, pois a temperatura de pasteurização oscilou muito no regime permanente para ambos os produtos. As malhas tiveram sintonia diferente para cada um dos produtos envolvidos no processo, decorrente da sintonia diferente que já havia sido apresentada no capítulo III para o controle PID/*feedback*.

- Quanto ao desempenho do controlador no teste de sintonia de malha, esse se mostrou eficiente tanto para o processo envolvendo a água como para a solução de CMC sódica, apesar do desempenho, neste último, ter sido um pouco inferior. A não linearidade do processo influenciou pouco no desempenho do controlador *Fuzzy*/PID/*feedback*, apesar do espaçamento linear das funções de pertinência.
- A análise do comportamento do controle *Fuzzy*/PID/*feedback* sob perturbações de carga na temperatura de entrada mostrou que, assim como no teste de sintonia de malha, tanto para a água como para a solução de CMC sódica, esse se comporta satisfatoriamente para os casos perturbações negativas e positivas. No caso da solução de CMC sódica, o controlador conseguiu manter a temperatura, mas com uma pequena oscilação frente à perturbação de carga positiva, onde a bomba de água quente teve que diminuir a rotação. Para esta situação, o processo tem comportamento não linear pronunciado, o que justifica a oscilação neste caso.
- Para perturbações de carga na concentração de CMC sódica, a análise dos resultados mostrou que controle fuzzy é capaz de suportar uma alteração na não-linearidade do processo apesar da perda de desempenho ser visível. Um ajuste fino do controlador é recomendável com o objetivo de diminuir o tempo de sobressinal da resposta da temperatura de pasteurização à variação da concentração do produto.

Pode-se concluir que a não linearidade do processo pouco afetou o desempenho do controlador no caso da pasteurização da solução de CMC sódica, e que, se alterada, esse pode ser capaz de suportar as oscilações decorrentes. Este fato mostra a importância da escolha adequada do controle após o conhecimento prévio do processo.

IV.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERTO, M.I. Avaliação experimental do controle do processo de pasteurização de sucos de laranja. Campinas-SP, 2004. 261p. Doutorado. Departamento de Engenhaira de Alimnetos, UNICAMP.

LI, X.H. A comparative design and tunning for conventional fuzzy control. **IEEE Transactions on systems, man and cybernetics - Part B : Cybernetics**, v.27, n.5, p.884-889, 1997.

SHIEF, J. S.; CHEN, H. C. e FERNG, L. H. Aplication of a Fuzzu logic controller in temperature control of a pilot high temperature-short time heat exchanger. Food Control, v.2, p.91-16, 1992.

<u>CAPÍTULO V. COMPARAÇÃO ENTRE OS CONTROLES PID E *FUZZY*/PID <u>NO PROCESSO DE PASTEURIZAÇÃO</u></u>

V.1. RESUMO

A proposta final deste trabalho consistiu em avaliar e comparar o desempenho dos controles PID/*feedback* e *Fuzzy*/PID/*Feedback* no processo de pasteurização da água e da solução aquosa de CMC. Para tal, foram utilizados os resultados apresentados nos capítulos III e IV para a pasteurização de cada um dos produtos, avaliados através do desempenho de cada um dos controladores e dos índices de desempenho e erro após perturbações de carga no sistema. A comparação dos resultados mostrou que os dois controladores se mostraram eficientes em manter as condições do processo de pasteurização da água. Para a pasteurização da solução de CMC sódica, o controle PID apresentou alguma dificuldade em manter as condições de processo, principalmente frente perturbações de concentração. Esta dificuldade foi minimizada com o uso do controle *Fuzzy*/PID/*Feedback*, que conseguiu manter uma consistência sob perturbações de carga na temperatura e concentração.

V.2. INTRODUÇÃO

A pesquisa e utilização de controles alternativos em processos vem se tornando crescente nos últimos anos. Vários trabalhos citados já anteriormente, como os de Farenzena (2003), Ibarrola et al. (2001), Helbig et al. (2000) e Negiz et al. (1998), apresentam novas ferramentas que possibilitam a escolha de estratégias de controle decorrentes do comportamento dos mais variados processos. Farenzena (2003) criou uma metodologia que quantifica a não linearidade de processos através do número de desempenho robusto não-linear (n-RPN), composto pelas partes estática (n-RPN_{STAT}) e dinâmica (n-RPN_{DYN}). Dependendo dos valores obtidos para cada um dos casos, o processo pode ser considerado linear, não linear e altamente não linear, sendo que para este último é sugerido um controlador que possa compensar o comportamento não-linear do processo. Ibarrola et al. (2001) implementou e comparou o desempenho de um controle preditivo com o controle convencional num processo HTST e conseguiu resultados satisfatórios na minimização da variabilidade do processo.

Todos estes estudos mostram a importância do estudo sobre a influência causada pela não linearidade de um processo no desempenho do controlador. Por isso, para completar e finalizar este trabalho, o objetivo deste capítulo foi avaliar e comparar o desempenho do controle convencional PID com o controle *fuzzy*/PID no processo de pasteurização da água e da solução de CMC sódica e verificar as possíveis diferenças de desempenho de ambos.

V.3. MATERIAL E MÉTODOS

V.3.1. Material

Para a comparação do desempenho dos controladores, foram utilizados os dados tratados e resultados obtidos pelas perturbações de carga no sistema, na planta piloto do LACPA, localizado na FEA – UNICAMP, a partir dos softwares *Excel for Windows* e MATAB v.6.0 apresentados nos Capítulos III e IV.

V.3.2. Métodos

Para a comparação da análise de desempenho dos controladores, os resultados dos Capítulos III e IV foram avaliados pela mesma metodologia proposta nestes capítulos, para alterações na temperatura de entrada do produto e na concentração da solução de CMC sódica. Nesta etapa, todos os índices de desempenho foram relativizados às intensidades de perturbação, exceto para a perturbação de carga na concentração na solução de CMC sódica, que foram de mesma intensidade.

V.4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

V.4.1. Comparação do desempenho dos controladores – pasteurização da água

A Figura V.1 e a Figura V.2 mostram o desempenho dos controladores após perturbação de carga na temperatura de entrada da água (os níveis de intensidade estão apresentados nas tabelas Tabela III.1 e Tabela IV.2 dos capítulos III e IV). Observa-se um semelhante desempenho, sem oscilações bruscas, dificultando afirmar qual controle obteve a melhor performance.



Figura V.1 – Comportamento dos controladores após perturbação de carga positiva na temperatura de entrada da água.



Figura V.2 – Comportamento dos controladores após perturbação de carga negativa na temperatura de entrada da água.

A Tabela V.1 apresenta os valores dos índices de erro e desempenho após perturbação de carga na temperatura de entrada da água (os níveis de intensidade estão apresentados na Tabela III.1 e na Tabela IV.2 dos Capítulos III e IV). Mais uma vez, pode-se afirmar que foram constatados o bom desempenho dos controladores e que não há como afirmar qual é o melhor. Em ambos os casos, o erro de sobressinal não ultrapassou 0,2°C e o tempo de acomodação não ultrapassou 5 minutos. Os dois controladores poderiam ser utilizados para o caso da pasteurização da água.

	PID/Feedback	Fuzzy/PID/Feedback	PID/Feedback	Fuzzy/PID/Feedback
Intensidade de perturbação (°C)	3,20	2,9	-3,30	-3,00
IAE (°C/s)	0,17	0,19	0,14	0,25
ISE (°C $^2/s$)	0,00	0,00	0,00	0,00
ITAE (°C/s ²)	1,05	0,76	0,68	1,53
$t_{s}(s)$	3,15	2,40	3,10	2,95
$e_s(s)$	0,20	0,20	0,20	0,20
$t_{ac}(s)$	3,95	3,70	4,65	4,40

Tabela V.1 – Índices de erro e desempenho dos controladores sob perturbações de carga positivas e negativas na temperatura de entrada da água.

V.4.2. Comparação do desempenho dos controladores – pasteurização da solução de CMC sódica

A Figura V.3 e a Figura V.4 mostram o desempenho dos controladores após perturbação de carga na temperatura de entrada da solução de CMC sódica (os níveis de intensidade estão apresentados na Tabela III.1 e na Tabela IV.2 dos Capítulos III e IV). Observa-se uma maior oscilação na temperatura de pasteurização quando utilizado o controle PID, principalmente para perturbação positiva de carga na temperatura de entrada da solução de CMC sódica, onde há uma diminuição na vazão de água quente no pasteurizador. Para este caso, a não-linearidade é mais pronunciada e ocorre perda de desempenho do controlador linear.

Pode-se perceber também, na Figura V.4, que a vazão da bomba de água quente é diferente, após alcançado o novo regime permanente da temperatura de pasteurização, para cada um dos produtos pasteurizados. Considerando que a vazão de água quente no regime permanente inicial é de 496,7 L/h, a diferença de 15 L/h (3%) é muito pequena, podendo ser explicada por erros experimentais e perdas de energia no trocador de calor.



Figura V.3 – Comportamento dos controladores após perturbação de carga positiva na temperatura de entrada da solução de CMC sódica



Figura V.4 – Comportamento dos controladores após perturbação de carga negativa na temperatura de entrada da solução de CMC sódica.

A Tabela V.2 apresenta os valores dos índices de erro e desempenho após perturbação de carga na temperatura de entrada da solução de CMC sódica (os níveis de intensidade estão apresentados na Tabela III.1 e na Tabela IV.2 dos capítulos III e IV). Pela análise numérica, é mais difícil comprovar qual controlador obteve melhor desempenho, pois os índices ficaram muito próximos. Em ambos os casos, o erro de sobressinal não ultrapassou $0,4^{\circ}$ C e o tempo de acomodação não ultrapassou 6 minutos. O controle *Fuzzy* ocasionou menores oscilações na temperatura de pasteurização de produto sob perturbações de carga na temperatura de entrada da solução de CMC sódica, mostrando ser menos sensível a não linearidade do processo, mesmo utilizandose de funções de pertinência igualmente espaçadas (lineares). Uma análise de custobenefício seria recomendada para avaliar a implementação do controle *Fuzzy*/PID num processo de pasteurização onde o fluido tivesse um comportamento semelhante ao da solução de CMC sódica.

	PID/Feedback	Fuzzy/PID/Feedback	PID/Feedback	Fuzzy/PID/Feedback
Intensidade de perturbação (°C)	4,00	3,80	-3,90	-3,80
IAE (°C/s)	0,40	0,40	0,23	0,33
ISE (°C 2 /s)	0,01	0,01	0,00	0,00
ITAE (°C/s ²)	2,26	1,71	1,38	1,85
$t_{s}(s)$	4,60	2,90	2,70	1,55
$e_{s}(s)$	0,40	0,40	0,30	0,30
$t_{ac}(s)$	5,15	5,65	4,10	5,50

Tabela V.2 – Índices de erro e desempenho dos controladores sob perturbação de carga na temperatura de entrada da solução de CMC sódica.

A Figura V.5 e a Figura V.6 mostram o desempenho dos controladores após perturbação de carga na concentração de entrada da solução de CMC sódica (os níveis de intensidade estão apresentados na Tabela III.1 e na Tabela IV.2 dos Capítulos III e IV). Para este caso, é visível a perda de desempenho quando utilizado o controle PID, que não suportou as mudanças de comportamento do processo e desestabilizou completamente frente à perturbação negativa de concentração. Com relação a

perturbação positiva, esse conseguiu manter a temperatura de pasteurização, mas oscilou muito. O controle *fuzzy* teve um desempenho satisfatório e se mostrou menos sensível às variações de processo, apesar do alto *overshoot* da temperatura.

É importante ressaltar que a desestabilização causada pelo controle PID na temperatura de pasteurização da solução de CMC sódica, evidenciada na Figura V.6, é decorrente da variação da vazão da bomba de água quente, que apresentou um comportamento aproximadamente *on-off*, e não da oscilação da temperatura da água. Esse comportamento é decorrente do comportamento da bomba, onde a variação da vazão esteve entre ± 300 L/h e a da temperatura esteve entre $\pm 1,0$ °C.



Figura V.5 . – Comportamento dos controladores após perturbação de carga positiva na concentração de entrada da solução de CMC sódica.



Figura V.6 – Comportamento dos controladores após perturbação de carga negativa na concentração de entrada da solução de CMC sódica.

Tempo (min)

A Tabela V.3 apresenta os valores dos índices de erro e desempenho após perturbação de carga na concentração de entrada da solução de CMC sódica (os níveis de intensidade estão apresentados na Tabela III.1 e na Tabela IV.2 dos Capítulos III e IV). Pelas análises numérica e gráfica, não há dúvidas que o desempenho do controle *fuzzy* é superior, onde a temperatura de pasteurização apresentou menor valor de sobressinal e valores menores de IAE_R, ISE_R e ITAE_R. O controle *fuzzy*/PID seria o recomendado para o caso de perturbações de concentração, uma vez que este foi capaz de suportar as variações do processo.

	PID/Feedback	Fuzzy/PID/Feedback	PID/Feedback	Fuzzy/PID/Feedback
	Perturb	pação positiva	Perturbação negativa	
IAE (°C/s)	6,09	5,34	-	5,94
ISE (°C ² /s)	0,35	0,31	-	0,37
ITAE (°C/s ²)	27,31	21,85	-	25,89
$t_{s}\left(s\right)$	3,60	2,60	-	2,75
$e_{s}(s)$	-2,40	-1,90	-	1,90
$t_{ac}(s)$	7,30	9,95	-	8,10

Tabela V.3 – Índices de erro e desempenho dos controladores sob perturbações de carga positiva e negativa na concentração de entrada da solução de CMC sódica.

V.5. CONCLUSÕES

A comparação dos controladores realizada mostrou que:

- Para a pasteurização da água, ambos os controladores obtiveram bom desempenho e poderiam ser recomendados na aplicação para o processo. A temperatura de pasteurização quase não oscilou e o valor de sobressinal não ultrapassou 0,2°C.
- Para a pasteurização da solução de CMC sódica com perturbações de temperatura de entrada, o controlador PID/feedback mostrou algumas dificuldades para manter a temperatura de pasteurização após a perturbação de carga na temperatura de entrada do produto. A não-linearidade do processo neste caso influenciou o desempenho do controlador. O controlador Fuzzy/PID foi mais eficiente pois a oscilação da temperatura de pasteurização foi menor quando utilizado. Os dois controladores poderiam ser utilizado, mas o Fuzzy/PID seria o mais recomendado uma vez que causou menores oscilações após as perturbações de carga na temperatura. Uma análise de custo-benefício seria recomendada para avaliar a implementação do controle Fuzzy/PID num processo de pasteurização que envolvesse, por exemplo, um fluido não-newtoniano altamente termossensível.

Para as perturbações de carga na concentração da solução de CMC sódica, é altamente recomendável que se utilize o controle *Fuzzy*/PID. Foi o controlador que obteve o melhor desempenho, onde a temperatura de pasteurização oscilou menos, apesar do valor elevado de sobressinal. Uma tentativa de ajuste fino na sintonia válida, para que o alto valor de overshoot da temperatura seja minimizado. O desempenho do controle PID foi muito inferior, sendo que na perturbação de intensidade negativa este não suportou e levou a desestabilização do sistema. Para a perturbação positiva, a temperatura foi mantida, mas com muita dificuldade. O erro de sobressinal foi muito elevado e a temperatura oscilou demasiadamente. Esta dificuldade pode ser justificada pela inconsistência deste controlador frente à processos não lineares. Para sistemas de aquecimento não-lineares ou altamente não-lineares, recomenda-se a utilização de controladores *Fuzzy*, que é o caso de fluidos alimentícios que apresentam comportamento não-newtoniano.

V.6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

FARENZENA, M. Numero de Desempenho Robusto Não-Linear: uma Nova Medida do Grau de Não-Linearidade. Porto Alegre, 2003. 155 p.p. Dissertação (mestre em Engenharia Química). Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

HELBIG, A.; MARQUARDT, W. e ALLGÖWER, F. Nonlinearity measures: definition, computation and applications. Journal of Process Control, v.10, p.113-123, 2000.

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

NEGIZ, A.; RAMANAUSKAS, P.; ÇINAR, A.; SCHLESSER, J. E. e ARMSTRONG, D. J. Modelling, monitoring and control strategies for high temperature short time pasteurization systems - 1. Empirical model and development. **Food Control**, v.9, p.1-15, 1998.

CONCLUSÕES GERAIS

Este presente trabalho teve como objetivo avaliar a linearidade do processo de pasteurização da água, um fluido newtoniano e da solução de CMC sódica, um fluido não newtoniano; e verificar a influência desta linearidade no desempenho do controladores *fuzzy*/PID e PID. Após a análise dos resultados, pode-se concluir que:

- Em relação a ordem, ficou constatado que o comportamento transiente do processo de aquecimento em TCP pode ser bem representado por funções de transferência de 2ª ordem com fator de amortecimento igual a um, tanto para a água como para a solução de CMC sódica. Em relação à linearidade, ficou constatado que o processo é mais não linear sob perturbações de vazão de água quente, tanto para a pasteurização da água como para a solução de CMC sódica, sendo que para este último a não linearidade é mais pronunciada e o estudo acerca do comportamento do coeficiente global de transferência de calor "U" comprovou este fato. A sensibilidade do processo analisada através do comportamento das variáveis adimensionais Reynolds e Prandtl mostrou porque o processo sob perturbações de vazão e para a solução de CMC sódica é mais não linear.
- Em relação a sintonia dos controladores PID, o método de Aström & Hägglund (1984) incrementado pela sugestão do ponto de inflexão para investigação do tempo de chaveamento mostrou-se adequado e mínimos ajustes tiveram que ser feitos na sintonia da malha do controle, tanto para a temperatura de pasteurização da água como para a solução de CMC sódica. No teste de sintonia de malha e desempenho do controlador para perturbações de carga, o controle PID mostrou-se adequado para o processo envolvendo a água, onde a não linearidade do processo não afetou o desempenho do controlador. Já para o processo envolvendo a solução de CMC sódica o controle PID mostrou-se em certas ocasiões inadequado, principalmente para perturbações de carga na concentração de entrada de produto. Para este último caso, o sistema desestabilizou para o nível de intensidade negativa de perturbação. Este acontecimento mostra a importância do estudo prévio do comportamento do processo, pois a escolha de uma estratégia de controle

inadequada pode comprometer definitivamente a qualidade final de um produto.

- Em relação a sintonia do controle *fuzzy*/PID, o método de Li (1998) mostrouse adequado. No teste de sintonia de malha e análise de desempenho sob perturbações de carga na temperatura do sistema, o controlador mostrou-se consistente e satisfatório, tanto para a pasteurização da água como para a pasteurização da solução de CMC sódica. A não linearidade do processo parece ter afetado menos o desempenho neste caso, mesmo tendo-se utilizado funções de pertinência lineares. Sob perturbações de carga na concentração de entrada da solução de CMC sódica, o controle *fuzzy*/PID mostrou bom desempenho apesar de não ter mantido a temperatura com baixo erro de sobressinal.
- A comparação do desempenho dos controladores mostrou que, para o processo de pasteurização da água, ambos os controladores poderiam ser aplicáveis. Para uma situação real de um processo envolvendo um fluido newtoniano, o controle PID poderia ser escolhido inicialmente, devido a facilidade de implementação. Porém, um estudo sobre a linearidade deste processo seria recomendada apenas para confirmar se essa não influenciaria no desempenho do controlador. Para a pasteurização da solução de CMC sódica, o controle PID apresentou desempenho inferior principalmente sob perturbações de carga na concentração do produto. Para uma situação real de processo envolvendo um fluido não-newtoniano, o controle *fuzzy*/PID seria recomendado uma vez que seu desempenho se mostrou mais robusto e consistente sob as variações do processo. Um estudo mais aprofundado da não linearidade do processo também seria recomendado neste caso, apenas para confirmar a influência no desempenho do controlador.

SUGESTÕES PARA FUTUROS TRABALHOS

Baseando-se nos resultados obtidos, podem ser sugeridos alguns trabalhos para dar continuidade a este:

- Estudo da linearidade do processo não somente sob perturbações de vazão na variável manipulada e de carga na temperatura de entrada do produto, mas também em função da concentração de entrada e sob perturbações de carga na concentração de entrada da solução, com a finalidade de observar alguma tendência no aumento da não linearidade.
- Estudo do processo de transferência de calor com o objetivo de obter uma correlação para Nusselt (Nu) local, ponto a ponto na seção de aquecimento, e poder explicar o porquê da não linearidade do processo mais pronunciada a perturbações negativas de vazão de água quente em relação a perturbações de carga na temperatura de entrada de produto.
- Fazer um levantamento quantitativo da linearidade do processo de pasteurização de um fluido newtoniano e outro não-newtoniano, segundo a metodologia de Farenzena (2003), e verificar se realmente as faixas de aplicação do controle convencional pelo calculo do numero de desempenho robusto não-linear são aplicáveis.
- Estudar o desempenho do controle convencional sob pasteurização de um fluido não-newtoniano e verificar até que ponto o aumento da concentração desta solução pode afetar a credibilidade e eficiência do controlador até a desestabilização do sistema.
- Implementar o controle *fuzzy*/PID no processo de pasteurização de um fluido não-newtoniano alterando-se as funções de pertinência na zona de maior nãolinearidade do processo com o objetivo de verificar se seria possível uma melhora no desempenho do controlador.
- Implementar outros tipos de estratégia de controle, como por exemplo o controle preditivo pela implementação da matriz de controle dinâmico (DMC), proposta por Ibarrola (2001), e comparar seu desempenho no processo de pasteurização e resfriamento aos controles PID e *fuzzy*/PID.

- Utilizar as curvas de reação do processo para configurar o controlador *fuzzy*, sem fazer a utilização do método linear de Li (1997).
- Realizar o mesmo trabalho proposto nesta dissertação na seção de resfriamento, verificando a linearidade do processo e o desempenho dos controladores quando integradas as três seções do pasteurizador.
- Realizar o ensaios finais com fluidos alimentícios para que os resultados deste trabalho possam ser validados.

<u>ANEXOS</u>

ANEXO I : Parâmetros do ajuste das curvas de reação da temperatura de pasteurização para a água e para a solução de CMC sódica

(y(t) = K.A.	1-	$\left(1+\frac{t}{\tau}e^{\frac{t}{\tau}}\right)$	$\left \frac{-t}{\tau}\right $)
--------------	----	---	--------------------------------	---

Tabela 1– Valores de τ , R² e perda de ajuste das curvas de reação da água para cada intensidade de perturbação (T₀ = 53,3°C)

	Eq. 2^a ordem com $\xi = 1$			
Intensidade da perturbação, L/h	τ	R ²	Perda	
65,4	0,37	0,97	0,63	
130,6	0,43	0,91	3,46	
195,7	0,24	0,88	0,80	
- 65,4	0,29	0,88	3,68	
- 130,6	0,27	0,97	2,32	
- 195,7	0,34	0,97	0,55	

Tabela 2– Valores de τ , R² e perda de ajuste das curvas de reação da água para cada intensidade de perturbação (T₀ = 58,7°C)

	Eq. 2^a ordem com $\xi = 1$			
Intensidade da perturbação, L/h	τ	R ²	Perda	
65,4	0,34	0,96	0,09	
130,6	0,33	0,97	1,70	
195,7	0,35	0,96	3,63	
- 65,4	0,25	0,65	0,64	
- 130,6	0,30	0,97	3,22	
- 195,7	0,25	0,92	7,44	

	Eq. 2^a ordem com $\xi = 1$			
Intensidade da perturbação, L/h	τ	R²	Perda	
65,4	0,34	0,78	2,80	
130,6	0,27	0,96	1,29	
195,7	0,37	0,93	4,13	
- 65,4	0,37	0,87	2,00	
- 130,6	0,27	0,97	1,69	
- 195,7	0,38	0,96	1,29	

Tabela 3– Valores de τ , R² e perda de ajuste das curvas de reação da água para cada intensidade de perturbação (T₀ = 63,7°C)

Tabela 4– Valores de τ , R^2 e perda de ajuste das curvas de reação da água para cada intensidade de perturbação.

	Eq. 2^a ordem com $\xi = 1$			
Intensidade da perturbação, °C	τ	R ²	Perda	
2,70	0,20	0,72	1,98	
5,80	0,48	0,86	1,73	
8,70	0,35	0,86	2,25	
-2,30	0,27	0,97	0,05	
-3,20	0,27	0,93	0,12	
-5,80	0,36	0,91	0,72	

	Eq. 2^a ordem com $\xi = 1$			
Intensidade da perturbação, L/h	τ	R ²	Perda	
65,5	0,36	0,91	1,15	
130,9	0,37	0,91	3,46	
196,2	0,42	0,96	4,36	
-65,4	0,45	0,95	1,37	
-130,9	0,41	0,96	5,35	
-196,2	0,41	0,96	0,43	

Tabela 5– Valores de τ , R² e perda de ajuste das curvas de reação da solução de CMC sódica para cada intensidade de perturbação (T₀ = 35,6°C)

Tabela 6– Valores de τ , R² e perda de ajuste das curvas de reação da solução de CMC sódica para cada intensidade de perturbação (T₀ = 40,6°C).

	Eq. 2 ^a ordem com $\xi = 1$		
Intensidade da perturbação, L/h	τ	R²	Perda
65,5	0,40	0,97	0,53
130,9	0,41	0,96	2,15
196,2	0,39	0,96	3,45
-65,4	0,40	0,95	1,11
-130,9	0,34	0,97	3,88
-196,2	0,36	0,97	1,36

	Eq. 2 ^a ordem com $\xi = 1$			
Intensidade da perturbação, L/h	τ	R ²	Perda	
65,5	0,35	0,91	0,52	
130,9	0,41	0,96	1,78	
196,2	0,30	0,95	3,19	
-65,4	0,36	0,98	0,45	
-130,9	0,31	0,98	2,02	
-196,2	0,72	0,92	6,6	

Tabela 7– Valores de τ , R² e perda de ajuste das curvas de reação da solução de CMC sódica para cada intensidade de perturbação (T₀ = 45,6°C)

Tabela 8– Valores de τ , R^2 e perda de ajuste das curvas de reação da solução de CMC sódica para cada intensidade de perturbação.

	Eq.	2^{a} ordem com $\xi =$	1
Intensidade da perturbação, °C	τ	R ²	Perda
3,00	0,31	0,97	1,32
5,40	0,46	0,98	1,49
7,71	0,35	0,86	2,25
-2,30	0,27	0,97	0,05
-3,20	0,27	0,93	0,12
-5,20	0,36	0,91	0,72

ANEXO II : Valores absolutos e relativos dos ganhos para cada intensidade de perturbação da vazão de água quente – pasteurização da água e solução de CMC sódica

Tabela 1- Valores absolutos e em porcentagem dos ganho médios para cada intensidade de perturbação da vazão de água quente – pasteurização da água

		Temperatura de entrada de produto, °C					
		53,7	58,7	63,7	53,7	58,7	63,7
Intensidade da perturbação, kg/h	Intensidade da perturbação, %	Ganh	no absolut	o, ℃	Ganho	o relativo, °	C h/kg
65,4	33%	1,47	0,86	1,01	0.022	0.013	0.015
130,6	67%	1,96	2,16	2,6	0.015	0.017	0.020
195,7	100%	2,7	2,89	2,6	0.014	0.015	0.013
-65,4	33%	-1,75	-1,45	-1,36	-0.027	-0.022	-0.021
-130,6	67%	-3,23	-3,55	-3,23	-0.025	-0.027	-0.025
-195,7	100%	-6,35	-3,41	-5,4	-0.032	-0.017	-0.028

*Em relação ao valor máximo obtido na perturbação de -195,7 L/h.

Tabela 2- Valores absolutos e em porcentagem dos ganho médios para cada intensidade de perturbação da vazão de água quente – pasteurização da solução de CMC sódica.

		Temperatura de entrada de produto, °C					
		53,7	58,7	63,7	53,7	58,7	63,7
Intensidade da perturbação, kg/h	Intensidade da perturbação, %	Ganh	no absolut	to, ⁰C	Ganho	o relativo, °	C h/kg
65,5	33%	1.06	1.15	1.01	0.016	0.018	0.015
130,9	67%	2.14	2.11	1.79	0.016	0.016	0.014
196,2	100%	2.89	2.85	2.59	0.015	0.015	0.013
-65,5	33%	-1.40	-1.37	-1.38	-0.021	-0.021	-0.021
-130,9	67%	-3.54	-3.43	-3.4	-0.027	-0.026	-0.026
-196,2	100%	-6.23	-6.05	-6.55	-0.032	-0.031	-0.033

*Em relação ao valor máximo obtido na perturbação de -195,7 L/h.

ANEXO III : Dados das propriedades termofísicas e reológicas e números adimensionais para a água e solução de CMC sódica

A Tabela 1 mostra os valores de densidade, viscosidade e do número de Prandtl da água para diferentes temperaturas.

Temperatura, T(°C)	Densidade, p (kg/m ³)	Viscosidade, µ.10 ⁶ (Pa.s)	Número de Prandtl, Pr
25	998,00	9,59	6,62
30	997,01	8,55	5,83
35	995,02	7,69	5,2
40	991,08	6,95	4,62
45	989,12	6,31	4,16
50	987,17	5,77	3,77
55	984,25	5,28	3,42
60	982,32	4,89	3,15
65	979,43	4,53	2,88
70	976,56	4,2	2,66
75	970,87	3,89	2,45
80	967,12	3,65	2,29
85	963,39	3,43	2,14
90	960,61	3,24	2,02

Tabela 1- Valores de densidade, viscosidade e do número de Prandtl para água.

Para a solução de CMC sódica, foi necessário a medição da densidade, pois não havia nenhuma correlação para tal na literatura. A Tabela 2 apresenta os valores obtidos de densidade medidos no coriolis para diferentes temperaturas de entrada, a uma concentração de 0,5% m/m. As medidas foram realizadas em triplicata, e o valor é a média dos valores aquisitados durante 1 min para a dada temperatura.

	1 3	
Temperatura, T(°C)	Densidade, ρ (kg/m ³)	Desvio padrão
21,3	999,7	0,08
29,2	998,2	0,12
35,1	994,9	0,06
41,4	992,7	0,04
50,5	989,3	0,14

Tabela 2- Valores de densidade para a solução de CMC sódica

Fez-se necessário obter uma correlação para a densidade para que pudessem ser extrapolados valores para temperaturas mais altas. Os dados foram ajsutados por uma equação linear (equação 1) em função da temperatura ($R^2 = 0.9836$).

$$\rho = -0,3724 \cdot T + 1008,2 \tag{1}$$

Para o cálculo da viscosidade pela equação (II.4) e do número de Reynolds, foi necessário o cálculo do diâmetro hidráulico D_{T} . Os dados necessários para sua obtenção estão apresentados na Tabela 3, bem como seu valor final, obtido a partir da equação (II.11).

Tabela 3- Especificações da placa e valor do Diâmetro Hidráulico D_T

Área troca, A_p	Comp. Placa, L	Espessura da	Largura da Placa, w	$D_T(m)$
(m ²)	(m)	placa, B (m)	(m) placa	
0,14	0,3	0,005	0,2	0,00429

A Tabela 4 apresenta os valores de viscosidade, densidade e calor específico e a Tabela 5 o número de Prandtl para várias concentrações da solução de CMC sódica, a uma vazão de 250 L/h. Os valores do índice de consistência e comportamento utilizados para o cálculo da viscosidade foram obtidos a partir das equações (II.2) e (II.3), para as temperaturas apresentadas a uma concentração de 0,5% e vazão de 250 L/h. Os valores de calor específico foram obtidos pela equação (II.5) e de densidade pela equação 1.

Temperatura, T(°C)	Densidade, p (kg/m ³)	Viscosidade aparente, μ (Pa.s)	Calor específico, c _p (J/kg.°C)
25	998,89	21,65	6,62
30	997,02	9,33	5,83
35	995,16	4,72	5,2
40	993,30	2,65	4,62
45	991,44	1,59	4,16
50	989,58	1,00	3,77
55	987,71	0,65	3,42
60	985,85	0,44	3,15
65	983,99	0,30	2,88
70	982,13	0,21	2,66
75	980,27	0,15	2,45
80	978,40	0,11	2,29
85	976,54	0,08	2,14
90	974,68	0,06	2,02

Tabela 4– Valores de densidade, viscosidade e calor específico para a solução de CMC sódica

Tabela 5- Valores de número de Prandtl para a solução de CMC sódica

т (Número de Prandtl, Pr						
Temperatura, T(℃)	(c=0,3% m/m)	(c=0,4% m/m)	(c=0,5% m/m)	(c=0,6% m/m)	(c=0,7% m/m)	(c=0,8% m/m)	
25	36,30	54,16	91,48	164,55	307,16	587,34	
30	19,17	25,90	39,59	64,43	108,76	187,95	
35	11,12	14,04	20,05	30,48	48,05	77,52	
40	6,88	8,27	11,26	16,31	24,49	37,62	
45	4,48	5,21	6,84	9,57	13,86	20,56	
50	3,02	3,41	4,37	5,95	8,39	12,12	
55	2,06	2,29	2,87	3,83	5,31	7,52	
60	1,43	1,56	1,93	2,54	3,47	4,84	
65	1,01	1,09	1,33	1,73	2,33	3,22	
70	0,72	0,77	0,94	1,21	1,62	2,21	
75	0,52	0,55	0,66	0,85	1,13	1,54	
80	0,37	0,40	0,48	0,61	0,81	1,09	
85	0,27	0,29	0,35	0,44	0,58	0,79	
90	0,20	0,21	0,25	0,32	0,43	0,57	

A partir dos dados apresentados, obteve-se os valores do numero de Reynolds para diferentes vazões de água e concentrações da solução de CMC sódica, apresentados nas tabelas Tabela 6 e Tabela 7. Os valores das velocidades de escoamento para cada vazão foram obtidos a partir da equação I.1.

Temperatura,	Número de Reynolds, Re.10 ⁶					
T(°C)	• (V _f =0,2 m ³ /h)	• (V _f =0,3 m ³ /h)	• (V _f =0,4 m ³ /h)	• (V _f =0,5 m ³ /h)	• (<i>V_f</i> =0,6 m ³ /h)	• (V _f =0,7 m ³ /h)
25	1,72	2,58	3,44	4,30	5,16	6,01
30	1,93	2,86	3,85	4,81	5,78	6,74
35	2,14	3,20	4,27	5,34	6,41	7,48
40	2,35	3,53	4,71	5,89	7,06	8,24
45	2,59	3,88	5,18	6,47	7,77	9,06
50	2,83	4,24	5,65	7,06	8,48	9,89
55	3,08	4,62	6,16	7,70	9,23	10,8
60	3,32	4,98	6,63	8,29	9,95	11,6
65	3,57	5,36	7,14	8,93	1,07	12,5
70	3,84	5,76	7,68	9,60	11,5	13,4
75	4,12	6,18	8,24	10,3	12,4	14,4
80	4,38	6,56	8,75	1,09	13,1	15,3
85	4,64	6,96	9,28	11,6	13,9	16,2
90	4,90	7,34	9,79	12,2	14,7	17,1

Tabela 6- Valores de Reynolds a diferentes temperaturas para água.

Tenneterne	Número de Reynolds, Re						
Temperatura, T(°C)	(c=0,3% m/m)	(c=0,4% m/m)	(c=0,5% m/m)	(c=0,6% m/m)	(c=0,7% m/m)	(c=0,8% m/m)	
25	2,40	1,61	0,95	0,53	0,28	0,15	
30	4,55	3,37	2,21	1,36	0,80	0,46	
35	7,84	6,21	4,35	2,86	1,81	1,12	
40	12,69	10,55	7,75	5,35	3,56	2,32	
45	19,68	16,94	12,89	9,22	6,36	4,29	
50	29,61	26,16	20,44	15,01	10,63	7,36	
55	43,54	39,24	31,27	23,42	16,92	11,95	
60	62,90	57,53	46,53	35,36	25,93	18,59	
65	89,58	82,85	67,76	52,08	38,61	27,98	
70	126,13	117,61	96,98	75,15	56,18	41,04	
75	175,87	164,97	136,83	106,65	80,20	58,94	
80	243,21	229,07	190,77	149,30	112,72	83,17	
85	333,94	315,35	263,29	206,58	156,35	115,65	
90	288,17	432,26	576,35	720,44	864,52	1008,61	

Tabela 7– Valores de Reynolds a diferentes temperaturas e concentrações para a solução de CMC sódica, a uma vazão de 250 kg/h.

ANEXO IV : Programa de implementação do fuzzy no AIMAX

@ErroTE408 = @TE408 - @PID_TE408.SP
@Erro 1 = @ErroTE408
@DerroTE408 = (@Erro2 - @Erro1)/Taqc
@Erro2 = @Erro1
@Erro = @Ke * @ErroTE408
@ErroTE408 = @DerroTE408 * Kd

IF (@FuzzyPID) @MFuzzyPID = "FUZ_LIG" @a= -0.00376428 @b= -0.91250582 * @ErroTE408 @c= -0.90473628 * @DerroTE408 @d= 0.004701345 * @ErroTE408 * @ErroTE408 @e= 0.003734554 * @DErroTE408 * @DErroTE408 @f= -0.00361777 * @ErroTE408 * @DErroTE408 @g= 0.0986127 * @ErroTE408 * @ErroTE408 * @ErroTE408 @h= 0.08731428 * @DerroTE408 * @DerroTE408 * @DerroTE408 @i= 0.43728176 * @ErroTE408 * @DerroTE408 * @DerroTE408 @j= 0.434191953 * @ErroTE408 * @ErroTE408 * @DerroTE408

@DHzAq = @a * @b * @c * @d * @e * @f * @g * @h * @i * @j

```
@uPIs0 = @uPIs1
@uPIs1 = @DHzAq
@uPIss = @uPIs
@uPIs = ( @Taqc * ( @uPIs0 + @uPIs1 )/2) + @uPIss
@uPI = @uPIs * @K0
@uPD = 45 + @@DHzAq * K1
@PID_TE408.OUT = @uPI + @uPD
```

ELSE

```
@MFuzzyPID = "FUZ_DSL
@uPIs0 = 0
@uPIs1 = 0
@uPIss = 0
@uPIs = 0
```

@uPI = 0 @uPD = 0 @DHzAq = 0

ENDIF