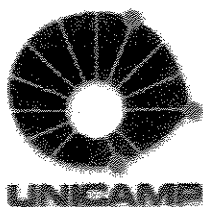


UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS



***AVALIAÇÃO DA CARACTERÍSTICA DINÂMICA DO
AQUECIMENTO DE PRODUTOS DE OVOS***

Patrícia de Souza Castro
Engenheira de Alimentos

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.
Orientador

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Patrícia de Souza Castro**, aprovada pela Comissão Julgadora em 29 de agosto de 2003.

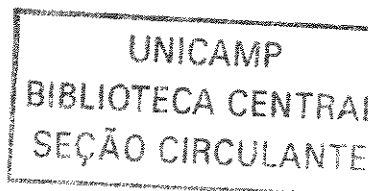
Campinas, 29 de agosto de 2003.

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior
Presidente da Banca

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

Campinas, agosto de 2003

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

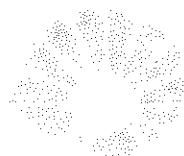


2003/08/30

UNIDADE	BC
Nº CHAMADA	UNICAMP
	C279a
V	EX
TOMBO BCI	56164
PROC.	16-124103
C	☐
D	☒
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	22/10/03
Nº CPD	

CMOD19091B-3

Bib id 303236



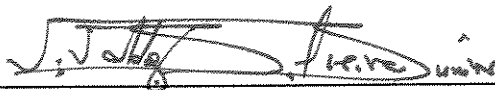
FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA F.E.A. – UNICAMP

Castro, Patrícia de Souza
C279a Avaliação da característica dinâmica do aquecimento de
produtos de ovos / Patrícia de Souza Castro. – Campinas, SP:
[s.n.], 2003.

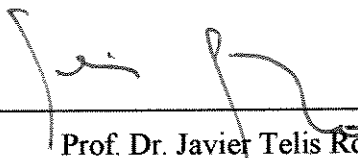
Orientador: Vivaldo Silveira Junior
Dissertação de (mestrado) – Universidade Estadual de
Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.

1.Ovos. 2.Processo – Aquecimento. 3.Modelagem
matemática. I.Silveira Junior, Vivaldo. II.Universidade
Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos.
III.Título.

BANCA EXAMINADORA



Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.
Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP

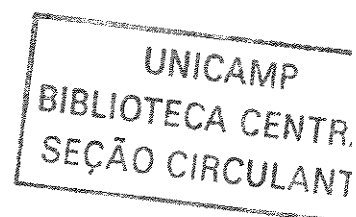


Prof. Dr. Javier Telis Romero
Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNESP



Dr. Paulo de Tarso Vieira e Rosa
Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP

Prof. Dr. Satoshi Tobinaga
Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP



DEDICATÓRIA

A Deus que me move e ilumina.

A todos - mestres, colegas, amigos - que, no decorrer dos anos, conseguiram convencer-me a abraçar esta causa que é a busca incessante, através da ciência, de soluções para os problemas cotidianos da coletividade.

À minha avó Maria, aos meus tios Luiz, Raquel e Joana, à minha prima Luziana que, mesmo à distância, confiaram em mim; às minhas madrinhas Evanilda e Gesy pela força e amizade e a todos meus tios e primos pela consideração e apoio.

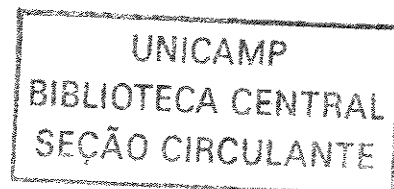
Às minhas eternas professoras Marilene e Maria Regina pela paciência, atenção e incentivo.

Ao Sascha pelo carinho, respeito e capacidade de me fazer feliz.

E principalmente aos meus muito adorados pais, Juarez e Olívia, que pelo exemplo, pela dedicação e pelo absoluto amor garantiram a minha realização e meu equilíbrio e ao meu querido e inseparável irmão Juarez, também responsável pela minha felicidade.

“O desejo de conhecimento é o mais natural. Experimentamos todos os meios susceptíveis de satisfazê-lo, e quando a razão não basta apelamos para a experiência.”

Michel de Montaigne



AGRADECIMENTOS

Foram muitas as pessoas que, direta ou indiretamente, contribuíram para que esse estudo fosse elaborado e que desde 1995, início de minha graduação, me incentivaram e encorajaram a dar corpo a esse meu projeto.

Como aluna do Curso de Mestrado em Engenharia de Alimentos, na Faculdade de Engenharia de Alimentos - UNICAMP, devo agradecer muitíssimo aos Professores que, durante os créditos, interferiram de forma direta e positiva nos meus trabalhos para amadurecimento, concretização e viabilidade dessa proposta.

Manifesto também meu profundo agradecimento ao meu orientador Prof. Dr. Vivaldo Silveira Júnior, que, em agosto de 2000, se dispôs a orientar meus trabalhos, o que efetivamente fez de maneira magnífica.

A todos que se envolveram, de uma forma ou de outra, nesse processo, quero externar a minha gratidão, principalmente aos meus queridos e eternos amigos Haroldo e Pat Akemi que foram companheiros fiéis e acreditaram na minha capacidade.

Aos Prof. Dr. Satoshi Tobinaga e Prof. Dr. Luiz Augusto Barbosa Cortez, componentes da Banca de Qualificação, a minha admiração e gratidão. Assim também como agradeço a preciosa interferência da bibliotecária Creusa e Cláudia e a ajuda dos meus colegas do LACPA, em especial a Bel, Silmar, Amorim e Flávio, pelo companheirismo, disponibilidade e atenção.

Quero agradecer à diretoria da Celulose IRANI que me concedeu um mês e meio de licença do trabalho para eu pudesse concluir meu mestrado. E em especial ao meu amigo e gerente Roberto Lauermann pela generosidade, incentivo e compreensão.

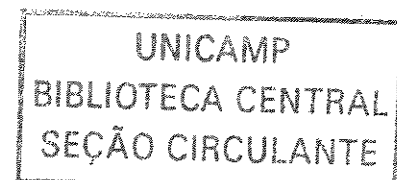
Também não posso deixar de agradecer aos meus amigos: Roberta, Luiz, Luciana Yamamoto, Julian, Eliane, Beto, Beth, Anette, Cíntia, Alfredo, Mariana, Cris, Fábio, Dirceu, Clésios e Zilda por compartilharem comigo muitos momentos especiais.

ÍNDICE

ÍNDICE	ix
ÍNDICE DE TABELAS	xv
ÍNDICE DE FIGURAS	xxxvii
NOMENCLATURA	xlvi
RESUMO	lv
ABSTRACT	lvii
I INTRODUÇÃO	1
II OBJETIVOS	3
III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
III.1 Produtos de Ovos*	4
<i>III.1.1 Ovo Integral</i>	4
<i>III.1.2 Gema de Ovo</i>	5
<i>III.1.3 Clara de Ovo</i>	5
<i>III.1.4 Pasteurização de Produtos de Ovos</i>	5
III.2 Trocador de Calor a Placas (TCP)	9
III.3 Modelagem Matemática	11
<i>III.3.1 Correlações utilizadas na modelagem do TCP</i>	11
<i>III.3.2 Correlações para as propriedades físicas e termofísicas dos fluidos</i>	12
<i>III.3.3 Parâmetros reológicos dos fluidos</i>	14
III.4 Caracterização do Comportamento Dinâmico dos Processos	16
<i>III.4.1 Princípio da Sobreposição</i>	16
<i>III.4.2 Independência da Resposta Característica Dinâmica em Diferentes</i>	
<i>Condições de Processo</i>	17
III.5 Comportamento Dinâmico dos Sistemas Lineares	17
<i>III.5.1 Sistemas de Primeira Ordem</i>	17
<i>III.5.2 Sistemas de Segunda Ordem</i>	18

III.5.3	<i>Sistemas de Ordem Superiores</i>	20
III.5.4	<i>Identificação do Comportamento Dinâmico do Processo</i>	21
III.6	Estratégias de controle	22
III.6.1	<i>Estratégia de Controle “Feedback”</i>	22
III.6.2	<i>Controles “Feedback” Clássicos</i>	23
III.6.3	<i>Sintonia de controladores P, PI, PD e PID</i>	25
III.6.4	<i>Estratégia de Controle “Feedforward”</i>	28
III.6.5	<i>Estratégia de Controle Adaptativo</i>	28
IV	MATERIAIS	32
V	MÉTODOS	33
V.1	Modelagem Matemática	33
V.1.1	<i>Descrição do Processo de Aquecimento</i>	33
V.1.2	<i>Considerações no Desenvolvimento do Modelo</i>	34
V.1.3	<i>Características das placas e configuração do TCP</i>	37
V.1.4	<i>Desenvolvimento do Simulador</i>	38
V.1.5	<i>Correlações para as propriedades físicas e termofísicas dos fluidos</i> ..	40
V.1.6	<i>Parâmetros reológicos dos fluidos</i>	41
V.1.7	<i>Condições Iniciais de Operação</i>	41
V.2	Planejamento de Ensaios	42
V.2.1	<i>Planejamento Individual</i>	42
V.2.2	<i>Planejamento Fatorial Composto Central (PFCC)</i>	47
VI	RESULTADOS E DISCUSSÕES	59
VI.1	Modelagem Matemática	59
VI.1.1	<i>Obtenção das condições do primeiro estado estacionário</i>	59
VI.2	Planejamento de Ensaios	60
VI.2.1	<i>Planejamento Individual</i>	60

VI.2.2	Planejamento Fatorial Composto Central (PFCC)	84
VII	CONCLUSÕES.....	108
VIII	SUGESTÕES.....	110
IX	BIBLIOGRAFIA.....	111
X	ANEXOS	116
X.1	Anexo I – Valores de K_c e τ obtidos para a gema e clara.....	116
X.2	Anexo II – Valores de R^2 obtidos no ajuste dos modelos	118
X.3	Anexo III – Estimativa dos Efeitos e Interações das Variáveis Independentes sobre o Parâmetro K^*	120
X.4	Anexo IV – Análise de Variância no Estudo da Influência das Variáveis Independentes sobre Parâmetro K^*	132
X.5	Anexo V – Estimativa dos Efeitos e Interações das Variáveis Independentes sobre o Parâmetro τ^*	135
X.6	Anexo VI – Análise de Variância no Estudo da Influência das Variáveis Independentes sobre o Parâmetro τ^*	147
X.7	Anexo VII – Estimativa dos Efeitos e Interações das Variáveis Independentes sobre a Temperatura de Saída do Produto no TCP ($T_{p_saída}$).	155
X.8	Anexo VIII - Análise de Variância no Estudo da Influência das Variáveis Independentes sobre a Temperatura de Saída do Produto no TCP ($T_{p_saída}$).	167
X.9	Anexo IX – Superfícies de Resposta e Curvas de Nível da Temperatura de Saída do Produto	175
X.10	Anexo IX – Perturbações aplicadas nas variáveis vazão e temperatura de entrada do produto e fluido de aquecimento	185



ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Padrões de temperatura e tempo de residência para pasteurização de produtos de ovos.	7
Tabela 2 - Sugestão de Ziegler-Nichols para o cálculo dos parâmetros do controlador.....	27
Tabela 3 - Sugestão de Cohen-Coon para o cálculo dos parâmetros do controlador.	27
Tabela 4 – Dimensões e configuração do trocador de calor a placas.....	37
Tabela 5 - Porcentagem de água e sólidos presentes nos produtos de ovos.....	40
Tabela 6 - Condições iniciais de operação do TCP para aquecimento de cada produto.....	41
Tabela 7 - Níveis das perturbações individuais para os produtos ovo integral, gema e clara de ovo.....	43
Tabela 8 - PFCC com 25 ensaios.....	50
Tabela 9 - Níveis do PFCC (25 ensaios) para temperatura de saída dos produtos com tendência positiva.....	51
Tabela 10 - Níveis do PFCC (25 ensaios) para temperatura de saída o produto com tendência negativa.....	51
Tabela 11 - PFCC com 9 ensaios.....	52
Tabela 12 - Níveis do PFCC (9 ensaios) para temperatura de saída do produto com tendência positiva.	52
Tabela 13 - Níveis do PFCC (9 ensaios) para temperatura de saída do produto com tendência negativa.....	53
Tabela 14 - Níveis das perturbações das vazões do PFCC (9 ensaios) com tendência positiva.....	54
Tabela 15 - Níveis das perturbações das vazões do PFCC (9 ensaios) com tendência negativa.	54
Tabela 16 - Temperaturas de saída do produto no primeiro regime permanente, obtidas pelo simulador e temperaturas de pasteurização para os produtos de ovos e respectivas vazões de fluido térmico.....	59
Tabela 17 - Intervalo de variação utilizado entre as 40 perturbações aplicadas nas variáveis vazões do produto e do fluido quente por produto.....	74
Tabela 18 - Equações de ajuste de $K_c^{(i)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para o ovo integral.....	76

Tabela 19 - Equações de ajuste de $K_c^{(1)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para gema de ovo.....	77
Tabela 20 - Equações de ajuste de $K_c^{(1)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para clara de ovo.	77
Tabela 21 - Equações de ajuste de $\tau^{(2)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para ovo integral.	78
Tabela 22 - Equações de ajuste de $\tau^{(2)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para gema de ovo.....	78
Tabela 23 - Equações de ajuste de $\tau^{(2)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para clara de ovo.	78
Tabela 24 - Equações de ajuste de T_d e Z em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para ovo integral.....	81
Tabela 25 - Equações de ajuste de T_d e Z em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para gema de ovo.....	81
Tabela 26 - Equações de ajuste de T_d e Z em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para clara.....	82
Tabela 27 - Coeficientes dos parâmetros de sintonia do controlador PID adaptativo de uma malha <i>SISO/ Feedback</i> : ($T_{p_saida} \times \Delta m_{fq}$) para perturbações positivas e negativas de cada produto.	83
Tabela 28 - Coeficientes dos parâmetros de sintonia do controlador PID adaptativo de uma malha <i>SISO/ Feedback</i> : ($T_{p_saida} \times \Delta m_p$) para perturbações positivas e negativas de cada produto.....	84
Tabela 29 - Respostas do ganho multivariável obtidas dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das variáveis perturbação da temperatura de entrada do produto ($\Delta T_{p_entrada}$), perturbação na temperatura de entrada da fluido de aquecimento ($\Delta T_{fq_entrada}$), perturbação na vazão do produto (Δm_p) e perturbação na vazão do fluido de aquecimento (Δm_{fq}) sobre K^*	86
Tabela 30 - Resposta do ganho multivariável obtidas dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das variáveis perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento ($\Delta T_{p_entrada}$ e $\Delta T_{fq_entrada}$) sobre o parâmetro $K^* [^{\circ}\text{C}/(^{\circ}\text{C}.\text{^{\circ}\text{C}})]$	87
Tabela 31 - Respostas do ganho multivariável dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas vazões produto e fluido de aquecimento (Δm_p e Δm_{fq}), sobre o parâmetro $K^* [^{\circ}\text{C}/(\text{kg/s.kg/s})]$	87
Tabela 32 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com 25 ensaios com variáveis independentes Δm_{fq} , Δm_p , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$, e variável dependente ganho multivariável K^* , a 95% de nível de confiança.	88

Tabela 33 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com 9 ensaios com variáveis independentes $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$, e variável dependente ganho multivariável K' , a 95% de nível de confiança.	88
Tabela 34 - Respostas das constantes de tempo multivariável obtidas dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada e vazões do produto e fluido de aquecimento sobre o parâmetro τ'	90
Tabela 35 - Resposta das constantes de tempo multivariável obtidas para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento sobre o parâmetro τ'	91
Tabela 36 - Respostas das constantes de tempo multivariável obtidas para estudo do efeito das perturbações nas vazões do produto e fluido de aquecimento sobre o parâmetro τ' ...	91
Tabela 37 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_{fq} , Δm_p , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ e variável dependente a constante de tempo multivariável, τ' , a 95% de nível de confiança.	92
Tabela 38 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$, e variável dependente a constante de tempo multivariável, τ' , a 95% de nível de confiança.	92
Tabela 39 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_{fq} e Δm_p , e variável dependente a constante de tempo multivariável, τ' , a 95% de nível de confiança.	93
Tabela 40 - Resposta da temperatura de saída do produto no regime permanente dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada e vazões do produto e fluido de aquecimento.	96
Tabela 41 - Resposta da temperatura de saída do produto no regime permanente dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento.	97
Tabela 42 - Resposta da temperatura de saída do produto no regime permanente dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas vazões de entrada do produto e fluido de aquecimento.	97
Tabela 43 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_{fq} , Δm_p , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ e variável dependente temperatura final do produto (T_{p_saida}), a 95% de nível de confiança.....	98
Tabela 44 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$, e variável dependente temperatura final do produto (T_{p_saida}), a 95% de nível de confiança.	99

Tabela 45 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_{fq} e Δm_p e variável dependente temperatura final do produto (T_{p_saida}), a 95% de nível de confiança.....	99
Tabela 46 – Coeficientes e correlação R^2 dos ajustes do modelo de segunda ordem das curvas de reação obtidas a partir dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada e vazões do produto e fluido de aquecimento.	118
Tabela 47 - Coeficientes e correlação R^2 dos ajustes do modelo de segunda ordem das curvas de reação obtidas a partir dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento.	119
Tabela 48 - Coeficientes e correlação R^2 dos ajustes do modelo de segunda ordem das curvas de reação obtidas a partir dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas vazões de entrada do produto e fluido de aquecimento.....	119
Tabela 49 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.	120
Tabela 50 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.	121
Tabela 51 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.	122
Tabela 52 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.	123
Tabela 53 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara.....	124
Tabela 54: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara.....	125
Tabela 55 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.....	126
Tabela 56 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.....	126
Tabela 57 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.....	127

Tabela 58 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.....	127
Tabela 59 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara.	128
Tabela 60 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara.	128
Tabela 61 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.	129
Tabela 62 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.	129
Tabela 63 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.	130
Tabela 64 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.	130
Tabela 65 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara.	131
Tabela 66 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara.	131
Tabela 67 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.	132
Tabela 68: Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.	132
Tabela 69 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.	133
Tabela 70: Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.	133
Tabela 71: Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.	134
Tabela 72: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.	135

Tabela 73: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.	136
Tabela 74: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.	137
Tabela 75: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.	138
Tabela 76 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.	139
Tabela 77 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.	140
Tabela 78: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.	141
Tabela 79 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.	141
Tabela 80 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.....	142
Tabela 81 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.....	142
Tabela 82 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.	143
Tabela 83 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.....	143
Tabela 84 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.	144

Tabela 85 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.	144
Tabela 86 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.	145
Tabela 87 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.	145
Tabela 88 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.	146
Tabela 89 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.	146
Tabela 90 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.	147
Tabela 91 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.	147
Tabela 92 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.	148
Tabela 93 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.	148
Tabela 94 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.	149
Tabela 95 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.	149
Tabela 96 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.	150
Tabela 97 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.	150

Tabela 98 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.....	151
Tabela 99 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.	151
Tabela 100 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.	152
Tabela 101 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.	152
Tabela 102 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.	153
Tabela 103 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.....	153
Tabela 104 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.....	154
Tabela 105 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.....	154
Tabela 106 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.	155
Tabela 107 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.	156
Tabela 108 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	157
Tabela 109 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	158

Tabela 110 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	159
Tabela 111 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	160
Tabela 112 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	161
Tabela 113 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	161
Tabela 114 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	162
Tabela 115 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	162
Tabela 116 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.	163
Tabela 117 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.	163
Tabela 118 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	164
Tabela 119 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.	164
Tabela 120 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.	165
Tabela 121 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.	165
Tabela 122 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída. ..	166
Tabela 123 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída. .	166

Tabela 124 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	167
Tabela 125 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	167
Tabela 126 - Análise de variância no estudo dos efeitos variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	168
Tabela 127 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	168
Tabela 128 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	169
Tabela 129 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.	169
Tabela 130 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.	170
Tabela 131 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	170
Tabela 132 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	171
Tabela 133 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	171
Tabela 134 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.	172
Tabela 135 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	172

Tabela 136 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.....	173
Tabela 137 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.....	173
Tabela 138 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.	174
Tabela 139 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.	174
Tabela 140 - Valores das perturbações aplicadas nas variáveis temperatura de entrada do produto e fluido quente e vazão do produto e fluido quente.....	185

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Fluxograma do processo de pasteurização de ovo integral, gema e clara de ovo.....	8
Figura 2 - Diagrama de blocos da estratégia de controle <i>Feedback</i>	22
Figura 3 - Curva Típica de Reação de Processo.....	26
Figura 4 - Diagrama de blocos de um sistema de controle adaptativo.....	30
Figura 5 - Configuração do TCP.....	34
Figura 6 - Elemento de Volume de Controle.....	35
Figura 7 - Fluxograma do Simulador.....	39
Figura 8 - Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da temperatura de entrada do produto: (a) ovo integral, (b) gema, (c) clara.....	61
Figura 9 - Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da temperatura de entrada do fluido de aquecimento: (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.....	62
Figura 10 - Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da vazão do produto: (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.....	63
Figura 11- Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da vazão de fluido de aquecimento. (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.....	64
Figura 12 - Curvas de reação da temperatura relativa de saída do produto, após as perturbações Δ_+ , Δ_{++} , $(\Delta_+)+(\Delta_{++})$ e Δ_{+++} na temperatura de entrada do produto: (a) ovo integral, (b)gema e (c)clara.....	66
Figura 13 - Curvas de reação da temperatura relativa da saída do produto, após as perturbações Δ_+ , Δ_{++} , $(\Delta_+)+(\Delta_{++})$ e Δ_{+++} na temperatura de entrada do fluido de aquecimento (a) ovo integral, (b) gema (c)clara.....	67
Figura 14 - Curvas de reação da temperatura relativa de saída do produto, após as perturbações Δ_+ , Δ_{++} , $(\Delta_+)+(\Delta_{++})$ e Δ_{+++} na vazão de produto: (a)ovo integral, (b) gema e (c) clara.....	68
Figura 15 - Curvas de reação da temperatura relativa de saída do produto, após as perturbações Δ_+ , Δ_{++} , $(\Delta_+)+(\Delta_{++})$ e Δ_{+++} na vazão de fluido de aquecimento: (a)ovo integral, (b) gema e (c) clara.....	69

Figura 16 - Ajuste da curva de reação da temperatura de saída do ovo integral sob perturbação degrau das variáveis: (a) temperatura de entrada do produto, (b) temperatura de entrada do fluido de aquecimento, (c) vazão do produto e (d) vazão do fluido de aquecimento.....	71
Figura 17 - Ajuste da curva de reação da temperatura de saída da gema de ovo sob perturbação degrau das variáveis: (a) temperatura de entrada do produto, (b) temperatura de entrada do fluido de aquecimento, (c) vazão do produto e (d) vazão do fluido de aquecimento.....	72
Figura 18 - Ajuste da curva de reação da temperatura de saída da clara de ovo sob perturbação degrau das variáveis: (a) temperatura de entrada do produto, (b) temperatura de entrada do fluido de aquecimento, (c) vazão do produto e (d) vazão do fluido de aquecimento.....	73
Figura 19 - Valores de K_c e τ obtidos em função da perturbação da vazão de ovo integral.....	75
Figura 20 - Valores de K_c e τ obtidos em função da perturbação da vazão de fluido de aquecimento para o produto ovo integral.	75
Figura 21 – Ajuste da curva de reação obtida do 5º ensaio do PFCC para avaliação da influência das temperaturas de entrada.....	85
Figura 22 - Teste da soma das respostas para as perturbações das vazões dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída do ovo integral e (b) negativa da temperatura de saída do ovo integral.	103
Figura 23 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída do ovo integral e (b) negativa da temperatura de saída do ovo integral.....	103
Figura 24 - Teste da soma das respostas para as perturbações das vazões dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da gema e (b) negativa da temperatura de saída da gema.....	104
Figura 25 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da gema e (b) negativa da temperatura de saída da gema.....	104
Figura 26 - Teste da soma das respostas para as perturbações das vazões dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da clara e (b) negativa da temperatura de saída da clara.....	105
Figura 27 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da clara e (b) negativa da temperatura de saída da clara.	105

Figura 28 – Curva de resposta do sistema sob perturbações individuais das variáveis Δm_{iq} , Δm_p , $\Delta T_{iq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ (correspondentes ao ensaio 16 do PFCC com 25 ensaios para ovo integral com tendência positiva).	106
Figura 29 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada e vazões dos fluidos com tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.	107
Figura 30 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão da gema.....	116
Figura 31 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão de fluido quente para o produto gema.	116
Figura 32 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão da clara.	117
Figura 33 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão de fluido quente para o produto clara.....	117
Figura 34 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída do ovo integral (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.....	175
Figura 35 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída do ovo integral (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.	176
Figura 36 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída da gema de ovo (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da gema.	177
Figura 37 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída da clara de ovo (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da clara.....	178
Figura 38 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.	179

Figura 39 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.	179
Figura 40 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da gema.	180
Figura 41 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da gema.	180
Figura 42 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da clara.	181
Figura 43 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da clara.	181
Figura 44 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.	182
Figura 45 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.	182
Figura 46 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da gema.	183
Figura 47 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da gema.	183
Figura 48 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da clara.	184

Figura 49 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da clara.....184

NOMENCLATURA

A_{Tc}	Área de troca térmica	m^2
b	Largura do canal	m
Bu	Resposta limite	
c_p	Calor específico do fluido	J/kg°C
D_e	Diâmetro hidráulico	m
$f(s)$	Transformada de Laplace de $y(t)$	
h	Coefficiente convectivo de transferência de calor	W/(m ² °C)
$h(s)$	Transformada de Laplace de $u(t)$	
I	Intensidade de uma perturbação	
K	Ganho efetivo aplicado nos métodos de sintonia de controladores	
K^*	Ganho multivariável	
K_c	Ganho de regime permanente	
K_p	Ganho proporcional	
k_{placa}	Condutividade térmica da placa	W/(m°C)
M	Massa do fluido	kg
$\dot{m}$	Vazão mássica do fluido	kg/s
n	Índice de comportamento	
Nu	Número de Nusselt	
p	Probabilidade estatística do parâmetro analisado ser significativo a 95% de confiança.	
Pr_g	Número de Prandtl generalizado	
$\dot{q}$	Calor transferido	J/s

R	Resposta do sistema a uma perturbação I	
R^2	Coefficiente de correlação do modelo	
Re_g	Número de Reynolds generalizado	
S	Inclinação da reta tangente	
T	Temperatura	°C
t	Tempo	s
$t(f)$	Teste estatístico de “Student” com “f” graus de liberdade	
$T_{1^{o}RP}$	Temperatura do primeiro regime permanente	°C
T_d	Tempo morto	s
$T_{fq_entrada}$	Temperatura de entrada do fluido de aquecimento	°C
$T_{p_entrada}$	Temperatura de entrada do produto	°C
T_{p_saida}	Temperatura de saída do produto	°C
ΔT_{lm}	Diferença de temperatura logarítmica	°C
U	Coefficiente global de transferência de calor	W/(m ² °C)
$u(t)$	Variável de entrada do sistema	
v	Velocidade do fluxo	m/s
$y(t)$	Variável de saída do sistema	
w	Largura da placa	m
x_w	Fração mássica de água	% p/p
Z	Constante de tempo efetivo	

Símbolos Gregos

η	Viscosidade	Pa.s
η_{ap}	Viscosidade aparente	Pa.s ⁿ
$\dot{\gamma}$	Taxa de deformação	s ⁻¹
κ	Índice de consistência do fluido	(Pa.s ⁿ)
σ	Tensão de cisalhamento	Pa
ψ	Número de perturbações aplicadas no sistema	
ξ	Parâmetro de escoamento, conforme o modelo da placa	
$\Phi(n)$	Função do escoamento, conforme modelo da placa	
ς	Coeficiente de amortecimento	
ρ	Densidade	kg/m ³
λ	Condutividade térmica	W/m°C
α	Difusividade térmica	(m ² /s)
τ^*	Constante de tempo multivariável	s
τ	Período natural ou Constante de tempo	s
τ_D	Tempo derivativo	
τ_I	Tempo integral	
Δ	Perturbação	
$\Delta_+, \Delta_{++} \text{ e } \Delta_{+++}$	Níveis de perturbação positiva	
$\Delta_-, \Delta_{--} \text{ e } \Delta_{---}$	Níveis de perturbação negativa	
ε	Erro	

Sub-índices

f_q	Fluido de aquecimento
j	Canais do trocador de calor a placas
k	Número de divisões de um canal
p	produto

RESUMO

O presente trabalho consiste na modelagem matemática, simulação dinâmica e estudo do comportamento do processo de aquecimento de produtos de ovos (fluidos Não-Newtonianos) num trocador de calor a placas no regime transiente.

O aquecimento é uma etapa obrigatória no processamento de produtos de ovos pasteurizados, pois tem como objetivo eliminar todos os microrganismos patogênicos. Por outro lado, o ovo e seus derivados são produtos extremamente sensíveis a altas temperaturas - por isso, o aquecimento é considerado uma etapa crítica e pouco flexível às variações de temperaturas, o que exige um eficiente controle de processo.

A modelagem matemática do processo foi utilizada no desenvolvimento do simulador dinâmico codificado no software Matlab[®]. Através da simulação dinâmica do aquecimento, foram obtidas as curvas de reação do processo que predizem o comportamento dinâmico das temperaturas de saída do produto sob diversas condições de operação.

Através das curvas de reação foi realizada a avaliação da linearidade e caracterização da dinâmica do processo. Foram obtidos os parâmetros de sintonia de um controlador Proporcional Integral Derivativo Adaptativo, SISO (*Single Input Single Output*), com estratégia de controle *Feedback*.

Utilizando a metodologia de Planejamento Fatorial Composto Central (PFCC) foi realizada a avaliação do comportamento do processo em estudo sob perturbações simultâneas das variáveis temperaturas de entrada e vazões do produto e fluido de aquecimento.

ABSTRACT

The present work consists in the mathematical modeling, dynamic simulation and study of the transient behavior in egg products heating process (non Newtonian fluid) in a plate heat exchanger.

The pasteurization is an obligatory stage in egg products pasteurized processing, which objective is the complete elimination of the pathogenic microorganisms. On the other hand, egg and its derivatives are very high heat-sensitivity products, therefore, the heating process is considered a critical and little flexible stage for temperature variations, which demands an efficient process control.

The mathematical modeling of the process was used in the development of the dynamic simulator in the Matlab[®] software. Through the dynamic simulation of the heating process, one got the process reaction curves that predicted the dynamic behavior of the outlet temperature product under several disturbances in operation conditions.

The linearity and characterization of the dynamics process was evaluated through the process reaction curves. The tuning parameters of Adaptive Proportional Integral Derivative controller, SISO (Single Input Single Output), with feedback control strategy had been gotten.

Using the Factorial Central Composite Design (FCCD) methodology, the process behavior in discussion was evaluated under simultaneous disturbances of the independent variables: fluid inlet temperature, product and heating fluid flow rates.

I INTRODUÇÃO

Os ovos de galinha e seus derivados são uns dos produtos alimentícios mais consumidos no mundo (Stadelman & Cotterill, 1977 apud Ibarz & Sintès, 1989). A produção mundial de ovos no ano de 2000, foi estimada em 50 milhões de toneladas. No Brasil, a média *per capita* anual de consumo de ovos é de 94 unidades (UBA, 2003 a).

A industrialização do ovo de galinha é uma prática antiga - em 1922 cerca de 21.000 toneladas de ovo líquido foram produzidas nos EUA para congelamento ou secagem (Winter *et al.*, 1945). No Brasil a utilização de ovos desidratados data da década de 50, e a industrialização deste processo iniciou-se em 1975 (Thomaz, 2002).

Os EUA são os maiores produtores de ovo líquido pasteurizado e desidratado, processando cerca de 25% da sua produção de ovos *in natura* (Tonzar *et al.*, 1997 apud Thomaz, 2002). Desde 1966, as leis americanas exigem que todos os produtos de ovos sem casca sejam comercializados pasteurizados (APV, 2003).

O Brasil apresenta um grande potencial para a industrialização e exportação de produtos derivados de ovos (gema, clara e ovo integral) (Telis, 1996). Estima-se que a produção brasileira de ovos (brancos e vermelhos) em 2002 foi de 16,5 trilhões de unidades de ovos (UBA, 2003 b). Em 1995, cerca de 5% da produção brasileira de ovos *in natura* foi industrializada, representando um total de 40.140 toneladas de ovos pasteurizados na forma líquida e desidratada (Tonzar *et al.*, 1997 apud Thomaz, 2002).

A pasteurização dos produtos de ovos constitui numa etapa intermediária dos processos de vários produtos de ovos, tais como os ovos desidratados e congelados. O aquecimento é uma etapa crítica no processo de pasteurização dos produtos de ovos devido a característica termosensível de seus componentes, principalmente as proteínas. A coagulação e desnaturação das proteínas são o fator limitante na temperatura de

aquecimento dos produtos de ovos, como a gema, e por isso deve ser controlada (Payawal *et al.*, 1945). Por outro lado, os microrganismos patogênicos como a *Salmonella* e a *Listeria* devem ser eliminados do produto, a combinação de tempo e temperatura na pasteurização de produtos de ovos deve garantir a redução de 9 potências logarítmicas (9D = 99,99%) de *Salmonella* (ENVASE..., 1994). Portanto, a implementação de um controle acurado nas temperaturas de operação resulta num produto final mais seguro no ponto de vista higiênico-sanitário, com características nutricionais, sensoriais e funcionais elevadas.

O aquecimento dos produtos de ovos durante o processo de pasteurização é realizado em trocador de calor a placas, devido à excelente performance na transferência de calor (Sharifi *et al.*, 1995) e a facilidade de limpeza e sanitização deste equipamento (Kim *et al.*, 1999).

A etapa de pasteurização de produtos de ovos (ovo, gema, clara e seus *blends*) pode ser realizada através de uma mesma planta de processo. Desta forma, o que define os parâmetros de processo são as diferentes propriedades termofísicas e reológicas dos produtos e a temperatura de pasteurização.

II OBJETIVOS

Os objetivos do presente trabalho consistem em:

- Modelar matematicamente e simular o processo de aquecimento de produtos de ovos em trocador de calor a placas;
- Avaliar a linearidade e caracterizar a dinâmica do processo de aquecimento de produtos de ovos;
- Obter os parâmetros de sintonia do controlador Proporcional Integral Derivativo Adaptativo - SISO (*Single Input Single Output*), com estratégia de controle *feedback*;
- Avaliar o comportamento do processo sob perturbações simultâneas.

III REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

III.1 Produtos de Ovos*

O ovo constitui num produto versátil e com alta densidade de nutrientes e digestibilidade (Stadelman & Weinheim, 1988), por isso é um dos mais importantes alimentos na dieta do ser humano, especialmente o povo brasileiro (Kusunoki, 1983).

Em adição ao valor nutricional, os produtos de ovos apresentam grande importância na indústria de alimentos, devido às suas propriedades funcionais. A clara de ovo constitui num excelente agente espumante, enquanto que a gema possui a propriedade de controle de viscosidade e o ovo integral é utilizado para ajustes de volume e textura (Forsyre, 1970 apud Hamid-Samimi *et al.* 1984 b).

O crescimento do consumo de produtos industrializados que possuem como ingrediente produtos de ovos induziu o aumento da escala de produção e a necessidade de obter produtos de alta qualidade com maior tempo de estocagem (Martucci, 1989).

O ovo *in natura* é formado por três partes principais: casca (11%), gema (31%) e clara (58%) (Barbosa, s.d.).

III.1.1 Ovo Integral

As proteínas do ovo integral se desnaturam a temperaturas acima de 73°C (Martucci, 1989); açúcar ou sal podem ser misturados ao ovo, durante a sua produção, para aumentar a sua estabilidade. O ovo integral possui cerca de 25% de sólidos (Stadelman & Weinheim, 1988).

* O ovo (e seus derivados) estudado neste trabalho se refere exclusivamente ao produto resultante da postura de galinhas.

O ovo integral é o único alimento que apresenta características polifuncionais, tais como poder de coagulação, capacidade de formação de espuma, propriedades de gelatinização e emulsificação (Mine, 1995 apud Ohata, 2000).

III.1.2 Gema de Ovo

A gema do ovo é um ingrediente de grande importância na indústria de alimentos, pois possui a capacidade de reduzir a tensão interfacial entre as fases líquida e oléica, por isso, é utilizada principalmente como emulsificante (Telis, 1996).

A gema possui aproximadamente 50% de água (Ohata, 2000) e sua desnaturação ocorre em temperaturas superiores a 62,5°C (Martucci, 1989).

III.1.3 Clara de Ovo

A clara é composta principalmente de água, cerca de 88% (Stadelman & Weinheim, 1988) e representa cerca de 60% do peso total do ovo (Ohata, 2000). É um composto pobre em gordura, mas rico em proteína, sendo que, mais de 50% da proteína do ovo estão presentes na clara (Powrie, 1977 apud Ohata, 2000), por isso apresenta a característica de formação de gel e espuma em sistemas de alimentos (Vadehra & Nath, 1973 apud Ohata, 2000).

A desnaturação da clara ocorre em temperaturas acima de 58°C (Martucci, 1989).

III.1.4 Pasteurização de Produtos de Ovos

A pasteurização dos produtos derivados de ovos é uma prática largamente utilizada para aumentar a sua vida-de-prateleira e visa aplicar o aquecimento mínimo exigido para

destruir os agentes patogênicos, principalmente os causadores da salmonelose, uma intoxicação gastro-intestinal grave (Punidades & McKellar, 1999).

O aquecimento é uma etapa crítica no processo de pasteurização da gema líquida. A coagulação e desnaturação das proteínas são os fatores limitantes na temperatura de aquecimento dos produtos de ovos e por isso esta deve ser controlada (Payawal *et al.*, 1945).

Desta forma, um tratamento térmico mal dimensionado ou controlado pode resultar na redução da funcionalidade, mudança na viscosidade e aumento da desnaturação das proteínas dos produtos de ovos (Hamid-Samimi *et al.*, 1984 a), além de implicações higiênico-sanitários.

Algumas vantagens do consumo de produtos pasteurizados derivados de ovos foram enumeradas de Thomaz (2002):

- Qualidade controlada que reduz o risco de contaminação por microrganismos patogênicos;
- Redução de custos, pois elimina a etapa de quebra dos ovos e separação da clara e gema do processo e conseqüentemente mão-de-obra;
- Redução de perdas e a não preocupação com a eliminação de resíduos (cascas);
- Aumento da vida-de-prateleira dos produtos;
- Garantia da uniformidade e padronização do produto;
- Facilidade de transporte e flexibilidade de comercialização (ovo integral, gema ou clara, ou *blends*).

A Tabela 1 apresenta os padrões de temperatura e tempo mínimo de residência para a pasteurização de produtos de ovos estabelecidos pelo Departamento de Agricultura dos

Estados Unidos. Para esta combinação do binômio tempo-temperatura obtêm-se uma redução superior a 99,99% dos microrganismos patogênicos como *Salmonella* e *Listeria* (ENVASE..., 1994).

Tabela 1 - Padrões de temperatura e tempo de residência para pasteurização de produtos de ovos.

Produtos	Temperatura (°C)	Tempo Mínimo de Residência (min.)
Ovo integral	60,0	3,5
Gema de ovo	61,1	3,5
Clara de ovo	56,6	3,5

Fonte: USDA-ARS 74-48, 1969; Anon., 1978 apud Hamid-Samimi *et al.* (1984 b).

O fluxograma do processo de pasteurização dos produtos de ovos está apresentado na Figura 1.

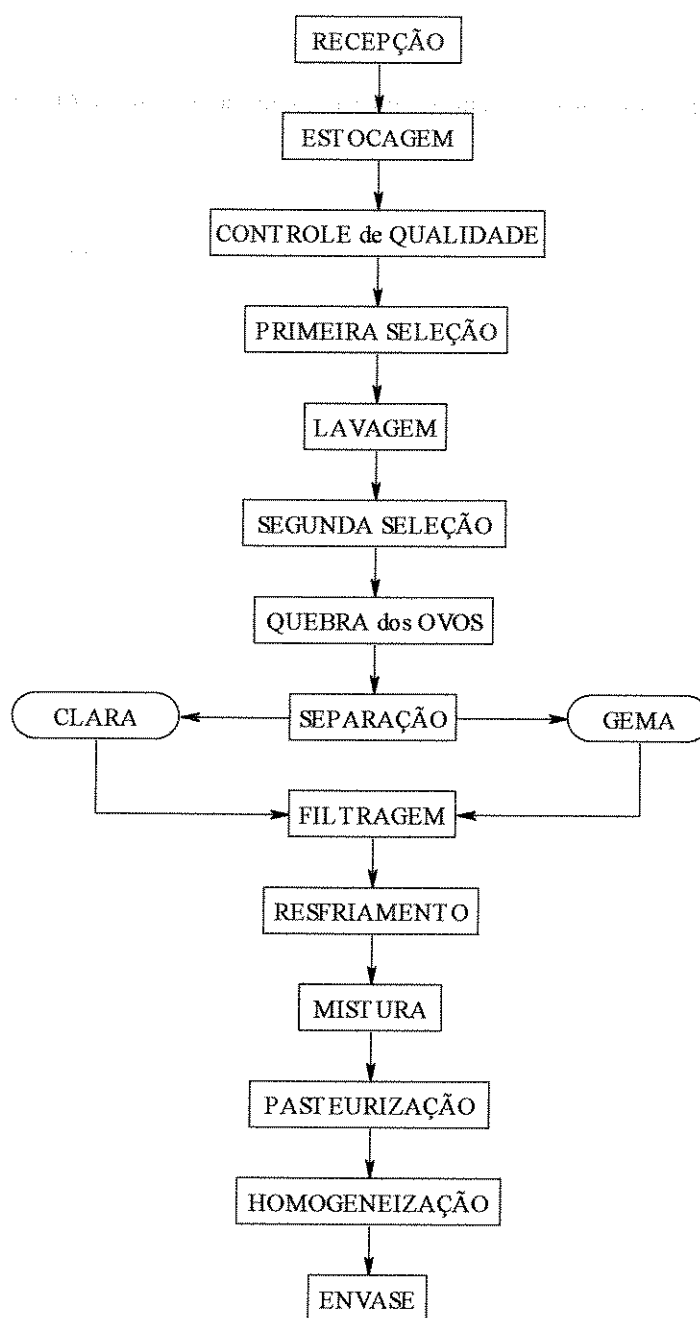


Figura 1- Fluxograma do processo de pasteurização de ovo integral, gema e clara de ovo.

Fonte: Sohovos Industrial Ltda

III.2 Trocador de Calor a Placas (TCP)

Os trocadores de calor a placas (TCP) são amplamente utilizados nas indústrias alimentícia, mecânica e química, em diferentes tipos de processos de aquecimento ou resfriamento e na pasteurização.

As aplicações típicas de um TCP são principalmente situações com escoamento turbulento de fluidos líquidos (Kim *et al.*, 1999).

Nos trocadores de calor a placas, os fluidos circulam alternadamente entre as placas com superfícies rugosas que provocam turbulência mesmo com baixo número de Reynolds (Kim *et al.*, 1999). As placas podem ser soldadas umas às outras no seu perímetro ou podem ser separadas por gaxetas, apertadas nas extremidades do trocador de calor por intermédio de eixos passantes com extremidades rosqueadas (Jabardo, 1994).

O TCP apresenta algumas vantagens em relação a outros tipos de trocadores de calor, são elas:

- coeficiente de filme do trocador de calor é muito alto o que permite que os equipamentos sejam compactos, leves e eficientes a um menor diferencial de temperatura entre os fluidos, desta forma, sua performance térmica é maior que a obtida com os trocadores de calor tubo e carcaça convencionais (Masubuchi & Ito, 1977, Panchal & Rabas, 1993 e Sharifi *et al.*, 1995);
- as placas do trocador de calor podem ser padronizadas; a vantagem em relação aos outros tipos de trocador é o fato de poderem ser produzidos em série, já que cada unidade é flexível quanto aos arranjos de fluxos e o seu dimensionamento depende da quantidade de placas (Masubuchi & Ito, 1977 e Kim *et al.*, 1999);

- ambos os lados das placas são de fácil acesso para limpeza e inspeção (Masubuchi & Ito, 1977). A facilidade de limpeza e sanitização vai de encontro com as necessidades higiênico-sanitárias das indústrias de alimentos (Kim *et al.*, 1999);
- há possibilidade de recuperação de energia (Leuliet *et al.*, 1990).

A pasteurização é um processo térmico constituído de três etapas principais: o aquecimento, a retenção e o resfriamento. Os TCPs são amplamente utilizados nas indústrias de alimentos para o processo de pasteurização, principalmente para produtos como o leite e o suco de laranja.

O comportamento dinâmico do TCP é de recente interesse, devido à importância do seu controle em vários processos industriais. Embora a literatura apresente muitas informações a respeito do seu modelamento matemático, a análise do seu comportamento transiente é escassa. Sharifi *et al.* (1995) e Das & Roetzel (1995) realizaram a análise da dinâmica do processo no TCP, no entanto, não foi abordada a influência do comportamento reológico dos fluidos sobre a transferência de calor, que é de extrema relevância para a área de alimentos, já que a maioria dos fluidos alimentícios possuem comportamento não-newtoniano.

Alguns estudos recentes têm considerado as influências do comportamento reológico sobre a dinâmica do processo dos TCP. Scariot (2002) estudou a influência das características reológicas dos fluidos não-newtonianos nos parâmetros de caracterização do processo de aquecimento em TCP. Berto (2000) verificou a influência dos comportamentos newtoniano e não newtoniano dos fluidos sobre a temperatura final do produto no processo de resfriamento em diferentes configurações de TCP.

III.3 Modelagem Matemática

III.3.1 Correlações utilizadas na modelagem do TCP

A expressão utilizada para o cálculo dos coeficientes convectivos de transferência de calor (h) foi obtida das correlações do número de Nusselt para TCP com configuração espinha de peixe (René, *et al.*, 1991 apud Berto 2000).

$$\text{Re}_g \leq 5,5 \quad Nu = \frac{h.D_e}{\lambda} = 0,590 \text{Re}_g^{1/3} \text{Pr}_g^{1/3} \quad (1)$$

$$\text{Re}_g > 5,5 \quad Nu = \frac{h.D_e}{\lambda} = 0,352 \text{Re}_g^{0,639} \text{Pr}_g^{1/3} \quad (2)$$

Os números adimensionais generalizados para fluidos que obedecem a lei da potência foram calculados de acordo com as expressões desenvolvidas por Leuliet *et al.* (1987):

$$\text{Re}_g = \frac{\rho \cdot v^{2-n} \cdot D_e}{\kappa \cdot [\Phi(n)]^n \cdot \xi^{(n-1)}} \quad (3)$$

$$\text{Pr}_g = \kappa \left(\frac{\xi \cdot v}{D_e} \right)^{(n-1)} [\Phi(n)]^n \frac{c_p}{\lambda} \quad (4)$$

onde:

n é o índice de comportamento do fluido;

κ é o índice de consistência do fluido e

D_e é o diâmetro hidráulico do canal e é definido por Kim *et al.* (1999) pela seguinte expressão:

$$D_e = \frac{4 \cdot b \cdot w}{2 \cdot (b + w)} \quad (5)$$

sendo:

b é a largura do canal;

w é largura da placa.

Os parâmetros $\Phi(n)$ e ξ são funções do regime de escoamento e variam conforme o tipo de placa utilizada. Para placas com corrugações inclinadas do tipo espinha de peixe, foram empregados os parâmetros utilizado por Berto (2000):

$$\Phi(n) = \left(\frac{2n+1}{3n} \right) \left(\frac{1}{n^{0.3}} \right)^{1/n} \quad (6)$$

$$\xi = 43,7$$

III.3.2 Correlações para as propriedades físicas e termofísicas dos fluidos

O conhecimento das propriedades físicas (densidade - ρ) e termofísicas (calor específico - c_p , condutividade - λ e difusividade térmica - α) dos produtos é importante para o correto dimensionamento de equipamentos, desenvolvimento matemático e simulação dos processos de transferência de calor (Afonso *et al.*, 2003 e Coimbra *et al.*, 2003).

As propriedades físicas e termofísicas dos fluidos são afetadas de forma geral pela sua composição e temperatura.

As correlações para o cálculo das propriedades da água foram definidas por Choi & Okos (1986) e abrangem uma larga faixa de temperatura, de 0 a 150°C:

$$\rho(kg/m^3) = 9,9718 \cdot 10^2 + 3,1439 \cdot 10^{-3} \cdot T - 3,7574 \cdot 10^{-3} \cdot T^2 \quad (7)$$

$$c_p(kJ/kg^\circ C) = 4,1762 - 9,0864 \cdot 10^{-5} \cdot T + 5,473 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (8)$$

$$\alpha(m^2/s) = 1,3168 \cdot 10^{-1} + 6,2477 \cdot 10^{-4} \cdot T - 2,4022 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (9)$$

$$\lambda(W/m^\circ C) = 5,7109 \cdot 10^{-1} + 1,7625 \cdot 10^{-3} \cdot T - 6,7036 \cdot 10^{-6} \cdot T^2 \quad (10)$$

Existem poucos estudos a respeito das propriedades termofísicas do ovo e seus derivados. Coimbra *et al.* (2003) obtiveram experimentalmente correlações para a densidade, calor específico e condutividade térmica em função da temperatura (em Kelvin) e fração mássica de água para os produtos derivados de ovos. As correlações apresentaram valores de R^2 superiores a 0,98:

$$\rho(kg/m^3) = 1291,6 - 0,0558 \cdot T - 280,3564 \cdot x_w \quad (11)$$

$$c_p(kJ/kg \cdot K) = 0,7449 + 0,0024 \cdot T + 2,4048 \cdot x_w \quad (12)$$

$$\lambda(W/m^\circ C) = 0,2822 - 0,0004 \cdot T + 0,4260 \cdot x_w \quad (13)$$

As equações acima foram determinadas para as faixas de temperatura de 273 a 311 K e quantidade de água de 51 a 88% (p/p).

Punidades & McKellar (1999) também estudaram o comportamento da densidade do ovo líquido e seus derivados em função da temperatura, na faixa de pasteurização, e obtiveram as seguintes equações:

$$\rho(kg/m^3)_{ovo_integral} = 1043,4 - 0,39836 \cdot T \quad (14)$$

$$\rho(kg/m^3)_{gema} = 1039,1 - 0,46802 \cdot T \quad (15)$$

$$\rho(kg/m^3)_{clara} = 1048,6 - 0,6941 \cdot T \quad (16)$$

III.3.3 Parâmetros reológicos dos fluidos

O conhecimento das propriedades reológicas dos fluidos alimentícios é essencial para o correto dimensionamento e operação de equipamentos. A classificação, propriedades e aplicabilidade dos modelos de fluidos alimentícios não-Newtonianos têm sido amplamente discutidas (Rao & Anantheswaran, 1982).

A água constitui num exemplo de fluido Newtoniano, a sua viscosidade não muda com a variação da taxa de deformação. Os fluidos Newtonianos seguem à equação abaixo.

$$\sigma = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (17)$$

onde:

η é a viscosidade do fluido;

σ é a tensão de cisalhamento;

$\dot{\gamma}$ é a taxa de deformação.

No entanto, a maioria dos produtos alimentícios são fluidos não-Newtonianos e pouco é conhecido dos seus comportamentos reológico e térmico (Kim *et al.*, 1999).

Todos os produtos derivados de ovo apresentam comportamento pseudoplástico que pode ser descrito pela Lei da Potência (Punidades & McKellar, 1999).

A Lei da Potencia é representada pelo seguinte modelo:

$$\sigma = \kappa \dot{\gamma}^n \quad (18)$$

$$\eta_{ap} = \frac{\sigma}{\dot{\gamma}} = \kappa (\dot{\gamma})^{n-1} \quad (19)$$

onde:

η_{ap} é a viscosidade aparente do fluido;

κ é o índice de consistência do fluido;

n é o índice de comportamento.

Ibarz & Sintes (1989) estudaram o comportamento reológico da gema de ovo numa faixa de temperatura de 5 a 60°C e obtiveram experimentalmente os parâmetros da equação da Lei da Potência (equação 18). O índice de comportamento da gema de ovo líquida é praticamente constante, no entanto, o índice de consistência apresenta forte influência da temperatura. As correlações para os parâmetros reológicos da gema de ovo são apresentadas pelas equações (21) e (24).

Punidades & McKellar (1999) estabeleceram correlações para as propriedades reológicas dos produtos de ovo líquido nas temperaturas de pasteurização. As equações (20) e (22) são as correlações obtidas para o índice de consistência do ovo integral e da clara de ovo, respectivamente. Assim como a gema, os índices de comportamento do ovo integral e da clara de ovo assumem valores constantes, conforme apresentado nas equações (23) e (25).

$$\kappa(Pa \cdot s^n)_{ovo_integral} = 0,622542 - 0,029315 \cdot T + 0,000502 \cdot T^2 - 0,02327 \cdot T^3 \quad (20)$$

$$\kappa(Pa \cdot s^n)_{gema} = (0,1363 + 2,783 \cdot (T)^{-1/2})^{1/2} \quad (21)$$

$$\kappa(Pa \cdot s^n)_{clara} = 0,0428114 + 0,0005326 \cdot T \quad (22)$$

$$n_{ovo_integral} = 0,6076 \quad (23)$$

$$n_{gema} = 0,85 \quad (24)$$

$$n_{clara} = 0,5578 \quad (25)$$

III.4 Caracterização do Comportamento Dinâmico dos Processos

Um processo pode assumir dois comportamentos dinâmicos: Linear ou Não Linear.

Se for elevado o grau de severidade, todos os processos físicos exibem algum comportamento não linear. Apesar da conveniência e praticidade oferecida por um modelo linear, nos casos em que os processos são fortemente não lineares, estes modelos não poderão ser utilizados (Ogunnaike & Ray, 1994).

Os sistemas lineares apresentam técnicas poderosas e conhecidas na área de engenharia e tecnologia, com soluções analíticas ideais. Sistemas não lineares não possuem uma teoria geral para solução analítica, e muitas vezes, necessitam ser linearizados em torno de um ponto de operação (Shaw & Simões, 1999).

A linearidade do comportamento dinâmico de um sistema pode ser caracterizada através de duas propriedades básicas: o Princípio da Sobreposição e a Independência da Resposta Característica Dinâmica.

III.4.1 Princípio da Sobreposição

Considerando um sistema em que a resposta dinâmica seja R_1 , sob perturbação degrau de uma entrada I_1 e para uma entrada I_2 seja R_2 , se $(R_1 + R_2)$ for a resposta para uma entrada do tipo $(I_1 + I_2)$, pode-se afirmar que o sistema obedece ao Princípio da Sobreposição, isto é, um sistema obedece ao Princípio da Sobreposição se a soma de N entradas corresponde à soma das N respostas das entradas individuais (Ogunnaike & Ray, 1994).

Desta forma, pode-se concluir que para uma perturbação degrau com magnitude “ T ”, a resposta deve ser “ T ” vezes a resposta de uma perturbação degrau unitária. Logo, numa

mesma condição de operação em regime permanente, as respostas observadas resultantes de perturbações degraus de mesma magnitude positiva e negativa serão imagens especulares uma da outra. O mesmo pode ser aplicado para qualquer tipo de funções de entrada.

III.4.2 Independência da Resposta Característica Dinâmica em Diferentes Condições de Processo

Em sistemas lineares, a característica dinâmica da resposta do processo para uma determinada perturbação é independente das condições específicas de operação no momento de aplicação da perturbação. Isto é, perturbações iguais aplicadas em diferentes condições de operação em regime permanente, terão respostas de magnitude e característica dinâmica idênticas.

Sistemas Não Lineares não exibem nenhuma das duas propriedades acima descritas.

III.5 Comportamento Dinâmico dos Sistemas Lineares

O comportamento dinâmico de um sistema linear pode ser representado por funções de transferência de primeira ordem, segunda ordem ou ordens superiores (Ogunnaike & Ray, 1994; Coughanowr, 1991; Ogata, 1985; Stephanopoulos, 1984).

III.5.1 Sistemas de Primeira Ordem

Sistemas que apresentam sua resposta caracterizada por uma equação diferencial de primeira ordem são classificados como Sistemas de Primeira Ordem.

Os sistemas de primeira ordem são representados pelas equações (26) e (27) nos domínios do tempo e de Laplace, respectivamente.

$$\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_c u(t) \quad (26)$$

$$g(s) = \frac{f(s)}{h(s)} = \frac{K_c}{(\tau s + 1)} \quad (27)$$

onde:

$y(t)$ é a variável de saída do sistema;

$u(t)$ é a variável de entrada do sistema;

$f(s)$ é a transformada de Laplace de $y(t)$;

$h(s)$ é a transformada de Laplace de $u(t)$;

K_c é o ganho do regime permanente e

τ é a constante de tempo do sistema.

Aplicando-se uma perturbação degrau de magnitude I na entrada do sistema de primeira ordem, a resposta dinâmica da saída do sistema é representada pelas equações (28) e (29) nos domínios do tempo e de Laplace, respectivamente.

$$y(t) = IK_c(1 - e^{-t/\tau}) \quad (28)$$

$$f(s) = \frac{K_c}{\tau s + 1} \frac{I}{s} \quad (29)$$

III.5.2 Sistemas de Segunda Ordem

Os sistemas de segunda ordem possuem seu comportamento dinâmico representado por uma equação diferencial de segunda ordem. As equações (30) e (31) caracterizam o sistema de segunda ordem nos domínios do tempo e Laplace, respectivamente.

$$\tau^2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2\zeta\tau \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_c u(t) \quad (30)$$

$$g(s) = \frac{f(s)}{h(s)} = \frac{K_c}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \quad (31)$$

onde:

K_c é o ganho do regime permanente;

τ é a constante de tempo ou período natural do sistema e

ζ é o coeficiente de amortecimento.

Aplicando uma perturbação degrau de magnitude I na entrada do sistema de segunda ordem, a resposta dinâmica da saída do sistema é representada pela equação (32) no domínio de Laplace.

$$y(s) = \frac{K_c}{\tau^2 s^2 + 2\zeta\tau s + 1} \frac{I}{s} = \frac{IK_c / \tau^2}{s(s - r_1)(s - r_2)} \quad (32)$$

onde:

r_1 e r_2 são os zeros do denominador e são obtidos pela seguinte equação:

$$r_1, r_2 = -\frac{\zeta}{\tau} \pm \frac{\sqrt{\zeta^2 - 1}}{\tau} \quad (33)$$

O valor das raízes dependem do valor de ζ , deste modo, a função de transferência no domínio do tempo pode assumir 3 formas:

- Para $0 < \zeta < 1$, as duas raízes são conjugadas e complexas e a resposta do sistema no domínio do tempo é dada pela equação (34).

$$y(t) = IK_c \left[1 - \frac{1}{\beta} e^{-\zeta t / \tau} \sin\left(\frac{\beta}{\tau} t + \phi\right) \right] \quad (34)$$

onde:

$$\beta = |\zeta^2 - 1|^{1/2} \text{ e } \phi = \tan^{-1}\left(\frac{\beta}{\zeta}\right) \quad (35)$$

- Para $\zeta=1$, as duas raízes são reais e iguais e a resposta do sistema no domínio do tempo é dada pela equação (36).

$$y(t) = IK_c \left[1 - \left(1 + \frac{t}{\tau} \right) e^{-t/\tau} \right] \quad (36)$$

- Para $\zeta > 1$, as duas raízes são reais e distintas e a resposta do sistema no domínio do tempo é dada pela equação (37).

$$y(t) = IK_c \left[1 - e^{-\zeta t/\tau} \left(\cosh\left(\frac{\beta}{\tau} t\right) + \frac{\zeta}{\beta} \sinh\left(\frac{\beta}{\tau} t\right) \right) \right] \quad (37)$$

III.5.3 Sistemas de Ordem Superiores

Sistemas com dinâmica de ordem superior aos de segunda ordem não são incomuns nos fenômenos físicos e químicos presentes nos processos tecnológicos. No entanto, três classes de sistemas de ordem superior mais freqüentemente encontradas, são:

- Processos de n-primeira ordem em série;
- Processos com tempo morto;
- Processos com resposta inversa.

As funções de transferência que descrevem a dinâmica dos sistemas de ordem superior dependem do tipo de processo e devem ser analisadas caso a caso.

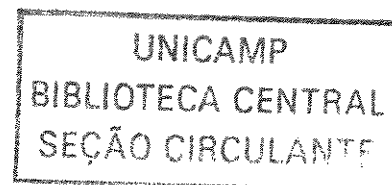
III.5.4 Identificação do Comportamento Dinâmico do Processo

A principal sistemática utilizada para a identificação do comportamento dinâmico do processo é o Teste Degrau (Ogunnaike & Ray, 1994; Coughanowr, 1991; Ogata, 1985; Stephanopoulos, 1984).

O Teste Degrau constitui na sistemática de aplicar uma perturbação degrau na entrada do sistema. Os dados de resposta do processo são obtidos com o propósito de identificar a função de transferência dos modelos conhecidos que melhor representa o processo testado. A vantagem deste teste é a fácil obtenção e manipulação das funções resposta sob perturbação degrau.

O procedimento de identificação do comportamento dinâmico do processo consiste nas seguintes etapas:

- Inspecionar os dados da resposta sob perturbação degrau e propor um potencial modelo (primeira, segunda ordem ou ordem superior);
- Obter a função de transferência que melhor represente o processo dinâmico, e ajustar os parâmetros do modelo escolhido com o objetivo de se obter o menor desvio com os dados experimentais;
- Validar o modelo identificado.



III.6 Estratégias de controle

III.6.1 Estratégia de Controle “Feedback”

A estratégia de controle *feedback* constitui em utilizar a informação do desvio do sistema (erro) sobre seu valor de referência (*set point*) para controlar o processo. A informação sobre o estado do sistema é utilizada para retroalimentar o controlador, que por sua vez se utiliza desta informação para mudar o sistema de alguma forma com o objetivo de eliminar o desvio.

O controle *feedback* está representado no diagrama de blocos apresentado na Figura 2.

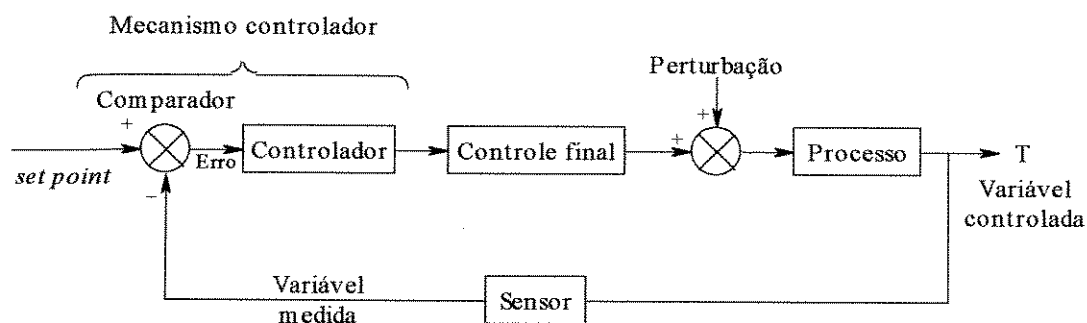


Figura 2 - Diagrama de blocos da estratégia de controle *Feedback*.

III.6.2 Controles “Feedback” Clássicos

III.6.2.1 Controle Proporcional (P)

O controle proporcional produz um sinal de saída que é proporcional ao erro ε . A ação do controle proporcional pode ser expressa pelas equações 38 e 39, nos domínios do tempo e de Laplace, respectivamente.

$$p(t) = K_p \varepsilon(t) + p_s \quad (38)$$

$$g(s) = \frac{c(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \quad (39)$$

onde: K_p é o ganho proporcional e p_s é uma constante.

O controle proporcional acelera a resposta do sistema de controle, no entanto, este controlador permite que o sistema estabilize num regime permanente “não zero”, isto é, diferente do valor de referência (*set point*), permanecendo um *offset*.

III.6.2.2 Controle Proporcional Integral (PI)

A ação do controle proporcional integral pode ser expressa pelas equações 40 e 41, nos domínios do tempo e de Laplace, respectivamente.

$$p(t) = K_p \left[\varepsilon(t) + \frac{1}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t') dt' \right] + p_s \quad (40)$$

$$g(s) = \frac{c(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left(1 + \frac{1}{\tau_I s} \right) \quad (41)$$

onde: τ_I é o tempo integral.

O controle proporcional integral elimina o *offset*, no entanto, a ação integral tende a aumentar a característica oscilatória da resposta.

III.6.2.3 Controle Proporcional Derivativo (PD)

A ação do controle proporcional derivativo pode ser expressa pela equações 42 e 43, nos domínios do tempo e de Laplace, respectivamente.

$$p(t) = K_p \varepsilon(t) + K_p \tau_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + p_s \quad (42)$$

$$g(s) = \frac{c(s)}{\varepsilon(s)} = K_p (1 + \tau_D s) \quad (43)$$

onde: τ_D é o tempo derivativo.

O controle proporcional derivativo apresenta o efeito de antecipação e estabilização da resposta devido a ação derivativa, mas permite que o sistema estabilize num regime permanente “não zero”, isto é, diferente do *set point* (presença de *offset*).

III.6.2.4 Controle Proporcional Integral Derivativo

A ação do controle proporcional integral derivativo pode ser expressa pela equações 44 e 45, nos domínios do tempo e de Laplace, respectivamente.

$$p(t) = K_p \cdot \varepsilon(t) + K_p \cdot \tau_D \frac{d\varepsilon(t)}{dt} + \frac{K_p}{\tau_I} \int_0^t \varepsilon(t') dt' p_s \quad (44)$$

$$g(s) = \frac{c(s)}{\varepsilon(s)} = K_p \left(1 + \tau_D s + \frac{1}{\tau_I s} \right) \quad (45)$$

No controle PID há a interação das contribuições das ações proporcional, integral e derivativa. A ação integral elimina o *offset*, as oscilações normalmente introduzidas como

resultado da ação integral são restringidas pela ação derivativa e a ação proporcional acelera a resposta do controlador.

III.6.3 Sintonia de controladores P, PI, PD e PID

A metodologia mais utilizada para ajustar os parâmetros de sintonia de controladores contínuos (K_p , τ_I e τ_D) é o Método de Curva de Reação do Processo (Ogunnaike & Ray, 1994; Coughanowr, 1991; Ogata, 1985; Stephanopoulos, 1984).

III.6.3.1 Método da Curva de Reação do Processo

O Método da Curva de Reação de Processo consiste na aplicação, à malha de controle aberta, de pequenas perturbações degrau na variável manipulada, registrando-se a curva da variável resposta *versus* tempo. A curva resposta é chamada de curva de reação do processo (Figura 3), a qual é característica dinâmica do comportamento do processo.

Não devem ocorrer variações na carga durante o teste, além disso, todos os componentes dinâmicos da malha, exceto o controlador, devem ser incluídos entre o ponto de aplicação do distúrbio na variável perturbada e o ponto de registro da resposta (Berto, 2000).

Observando-se a curva de reação de processo, exemplificada na Figura 3, é possível determinar graficamente os parâmetros que auxiliam o ajuste do controlador por diferentes métodos de sintonia.

Primeiramente, traça-se uma tangente à curva no ponto de inflexão. A intersecção desta tangente com a abcissa é tomada como o tempo morto aparente T_d . A inclinação da tangente, S , é proporcional a $1/Z$, Z é a constante de tempo efetivo. Neste caso, a inclinação é igual a Bu/Z , onde Bu é a resposta limite.

Assim, tem-se:

$$Z = \frac{Bu}{S} \quad (46)$$

O ganho efetivo (K) em regime permanente entre a perturbação de amplitude I e a resposta Bu é calculado pela seguinte expressão:

$$K = \frac{Bu}{I} \quad (47)$$

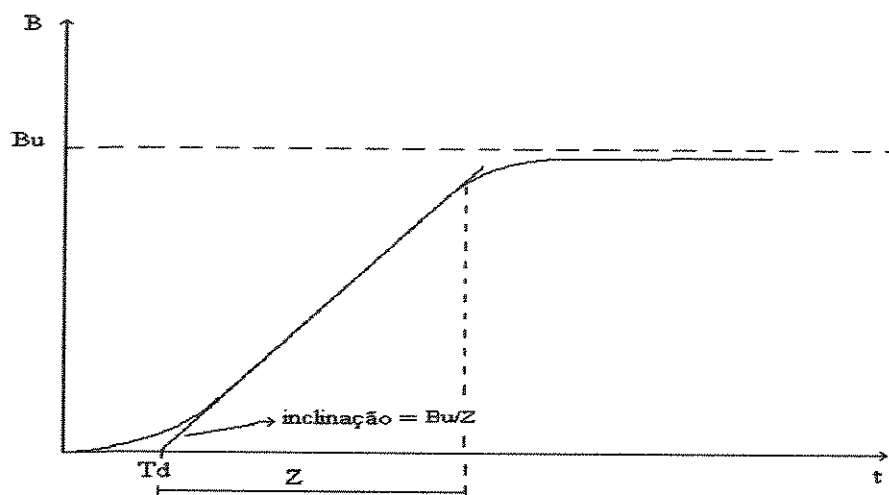


Figura 3 - Curva Típica de Reação de Processo

Os valores de T_d , Z e K determinados graficamente através da curva de reação do processo são utilizados para obter os parâmetros K_p , τ_I e τ_D através das sugestões dos parâmetros de sintonia de controlador apresentadas nas Tabelas 2 e 3. Ambas as sugestões de sintonia são recomendadas para aplicação em modelos que obedecem a seguinte faixa: $0,1 < T_d/Z < 1,0$.

Tabela 2 - Sugestão de Ziegler-Nichols para o cálculo dos parâmetros do controlador.

Tipo de Controlador	K_p	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{Z}{T_d} \right)$	-	-
PI	$\frac{0,9}{K} \left(\frac{Z}{T_d} \right)$	$3,33 T_d$	-
PID	$\frac{1,2}{K} \left(\frac{Z}{T_d} \right)$	$2,0 T_d$	$0,5 T_d$

Fonte: Oggunnaike & Ray (1994).

Tabela 3 - Sugestão de Cohen-Coon para o cálculo dos parâmetros do controlador.

Tipo de Controlador	K_p	τ_I	τ_D
P	$\frac{1}{K} \left(\frac{Z}{T_d} \right) \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{T_d}{Z} \right) \right]$	-	-
PI	$\frac{1}{K} \left(\frac{Z}{T_d} \right) \left[0,9 + \frac{1}{12} \left(\frac{T_d}{Z} \right) \right]$	$T_d \left[\frac{30 + 3 \left(\frac{T_d}{Z} \right)}{9 + 20 \left(\frac{T_d}{Z} \right)} \right]$	-
PD	$\frac{1}{K} \left(\frac{Z}{T_d} \right) \left[\frac{5}{4} + \frac{1}{6} \left(\frac{T_d}{Z} \right) \right]$	-	$T_d \left[\frac{6 - 2 \left(\frac{T_d}{Z} \right)}{22 + 3 \left(\frac{T_d}{Z} \right)} \right]$
PID	$\frac{1}{K} \left(\frac{Z}{T_d} \right) \left[\frac{4}{3} + \frac{1}{4} \left(\frac{T_d}{Z} \right) \right]$	$T_d \left[\frac{32 + 6 \left(\frac{T_d}{Z} \right)}{13 + 8 \left(\frac{T_d}{Z} \right)} \right]$	$T_d \left[\frac{4}{11 + 2 \left(\frac{T_d}{Z} \right)} \right]$

Fonte: Oggunnaike & Ray (1994).

Stephanopoulos (1984), comparou as sintonias de um controlador PID obtidas pelas sugestões de Ziegler-Nichols e Cohen-Coon e observou que: o ganho proporcional (K_p) é ligeiramente maior para a sintonia pelos parâmetros de Cohen-Coon e as constantes de tempo integral e derivativo (τ_I e τ_D) são maiores para as sugestões de Ziegler-Nichols.

Num sistema de malha fechada, submetido a uma perturbação degrau no *set-point* e na carga, notou-se que as respostas obtidas para sintonia com os parâmetros sugeridos por Ziegler-Nichols é ligeiramente melhor que a sintonia com os parâmetros sugeridos por Cohen-Coon. A superioridade de um método sobre outro não é conclusiva, no entanto, pode-se afirmar que ambos os métodos constituem em boas sugestões para os parâmetros de sintonia de um controlador (Stephanopoulos, 1984).

III.6.4 Estratégia de Controle “Feedforward”

A estratégia de controle *feedforward* consiste em identificar uma mudança de carga anteriormente à sua ocorrência e utilizar esta informação para alimentar o sistema agindo antecipadamente à ocorrência do erro.

III.6.5 Estratégia de Controle Adaptativo

O controle adaptativo consiste num sistema de controle cujos parâmetros podem ser ajustados automaticamente para compensação das variações nas características do processo e seus controles (Stephanopoulos, 1984).

A estratégia de controle adaptativo é uma importante extensão dos sistemas de controle tradicionais, necessária na prática porque, em muitos casos, certos parâmetros dos sistemas são desconhecidos (Byrnes & Lindquist, 1986).

O controle adaptativo é utilizado, principalmente para controle de processos não lineares. Os controles convencionais (P, PI, PD e PID) são desenvolvidos a partir de modelos linearizados, limitando o processo em torno de um regime permanente particular. Quando o regime permanente a que foi projetado ou as condições de operação do processo

mudam, os melhores valores dos parâmetros do controlador mudam e isto implica na necessidade de adaptação do controlador (Stephanopoulos, 1984).

É necessário um critério de performance para guiar a sintonia adaptativa do controlador, desse modo, o mecanismo adaptativo ajustará os parâmetros do controlador de forma que a resposta do processo se mantenha dentro do critério adotado.

O controlador adaptativo ajusta um ou mais valores dos parâmetros de sintonia do sistema, o ajuste pode ou não ser feito em malha fechada. O controlador adaptativo é assim considerado um segundo sistema e faz com que o sistema principal varie com o tempo por ajuste de seus parâmetros (Eveleigh, 1967).

Os vários tipos de controle adaptativo diferem somente na maneira em que os parâmetros do controlador são ajustados. No geral, o processo de controle adaptativo pode ser dividido em três funções, são elas: identificação, decisão e modificação.

Identificação: é definida como o processo pelo qual o sistema é caracterizado, ou pelo qual o valor do índice de performance é medido, ou seja, é a informação contínua sobre o presente estado da planta;

Decisão: é o processo em que o índice de performance medido é usado para comparar a presente performance do sistema com o valor desejado ou de ótima performance. Nesta etapa o sistema toma a decisão para adaptar-se em direção ao “ótimo”;

Modificação: é o processo de mudança dos parâmetros do sistema rumo ao “ótimo”.

Estas três funções são inerentes a qualquer sistema adaptativo. A Figura 4 apresenta, de uma forma geral, o funcionamento de um sistema adaptativo.

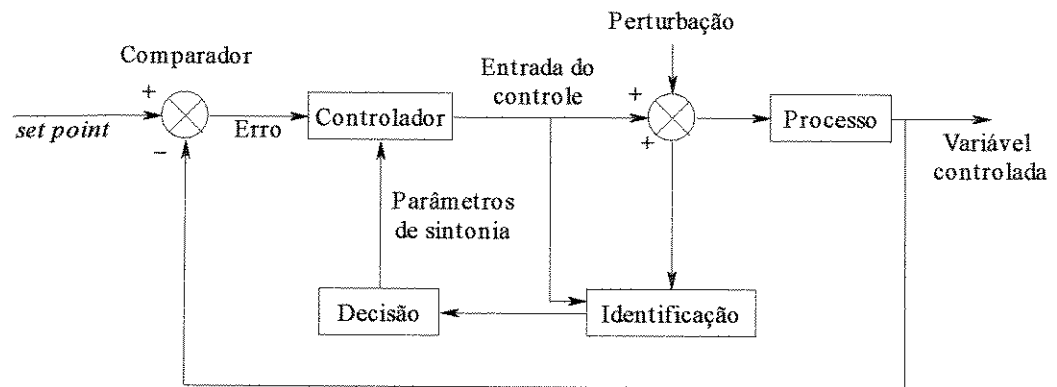


Figura 4 - Diagrama de blocos de um sistema de controle adaptativo.

III.6.5.1 Controle PID Adaptativo

O controlador PID é muito utilizado para controle de processos industriais por apresentar vantagens como a simplicidade de operação, razoável performance e o custo relativamente barato. A sintonia manual de controladores PID, nos quais os parâmetros são fixos, é perfeitamente capaz de atender as necessidades de muitos sistemas (Warwick, 1988), porém as adequações dos seus parâmetros melhoram a eficiência do controlador básico (PID), cuja aplicação é dedicada para processos lineares.

No entanto, as variações nas plantas causadas por possíveis modificações ou envelhecimento podem resultar na redução da performance do controlador e, em alguns casos, na perda completa do controle (Warwick, 1988). Além disso, a maior parte dos processos industriais apresenta características não lineares, com parâmetros que variam com o tempo, o que reduz a eficiência do controlador PID convencional.

Estes problemas podem ser resolvidos utilizando um controlador PID que possa comportar as variações dinâmicas das plantas de processo dentro de toda a sua faixa de operação (Miklovicova *et al.*, 1996). Problemas de processos não lineares podem ser controlados utilizando um apropriado projeto de controlador PID adaptativo.

Controladores PID auto-sintonizantes são computacionalmente simples de trabalhar e têm propriedades que dependem diretamente das regras de sintonia de Ziegler-Nichols para a auto-sintonia (Warwick, 1988).

Com o objetivo de melhorar a performance da sintonia de controladores PID utilizados em processos não lineares, várias estratégias de sintonia automática têm sido propostas.

O controle PID adaptativo tem sido muito aplicado nas áreas da engenharia química e mecânica. Miklovicova *et al.* (1996) projetou um controlador PID adaptativo para controlar a temperatura em reatores químicos, utilizando um refinamento das conhecidas sugestões de sintonia de Ziegler-Nichols, obtendo os parâmetros dos controladores (K_p , τ_I e τ_D) em função dos parâmetros característicos do processo fortemente não linear. Liu & Daley (2000) desenvolveram para a área de sistemas hidráulicos um controlador PID não linear que absorvesse as variações do processo em estudo.

No setor de alimentos, poucos trabalhos têm sido realizados sobre aplicação do controle PID adaptativo nos processos. Mendes (2003) estudou a aplicação do controle PID adaptativo no processo de extrusão de ração animal.

IV MATERIAIS

Para o desenvolvimento deste estudo foram necessários os seguintes recursos:

- Microcomputador ADM Duron 847 MHz;
- Software Matlab[®] 6.1;
- Software Statistica[®] 5.0;
- Software Microsoft Excel 2000 Professional;
- Software Table Curve 2D.

V MÉTODOS

V.1 Modelagem Matemática

V.1.1 Descrição do Processo de Aquecimento

Produtos derivados do ovo (ovo integral, gema e clara) com propriedades termofísicas e parâmetros reológicos distintos escoam separadamente através de um trocador de calor a placas (TCP) com vazão mássica aproximada de 220 kg/h, relativa a um protótipo experimental presente no Laboratório de Automação e Controle de Processos de Alimentos da Faculdade de Engenharia de Alimentos - Unicamp. Os resultados obtidos na simulação deste protótipo são análogos aos de outro TCP, respeitando as respectivas escalas.

O produto entrou na seção de aquecimento do TCP com temperatura de 10°C e foi aquecido até a sua temperatura de pasteurização por um fluido térmico (água) em contracorrente com temperatura de entrada de 94°C.

O TCP utilizado no desenvolvimento deste trabalho corresponde apenas à seção de aquecimento de um pasteurizador.

O TCP possui 24 placas com corrugações geométricas tipo espinha de peixe e ângulo de inclinação de 60°.

O escoamento no interior do trocador ocorre em um passe em contra-corrente, sendo o fluxo interno composto de 11 canais destinados ao produto e o fluxo externo composto por 12 canais destinados ao fluido térmico de aquecimento. O diagrama da configuração do TCP está apresentado na Figura 5.

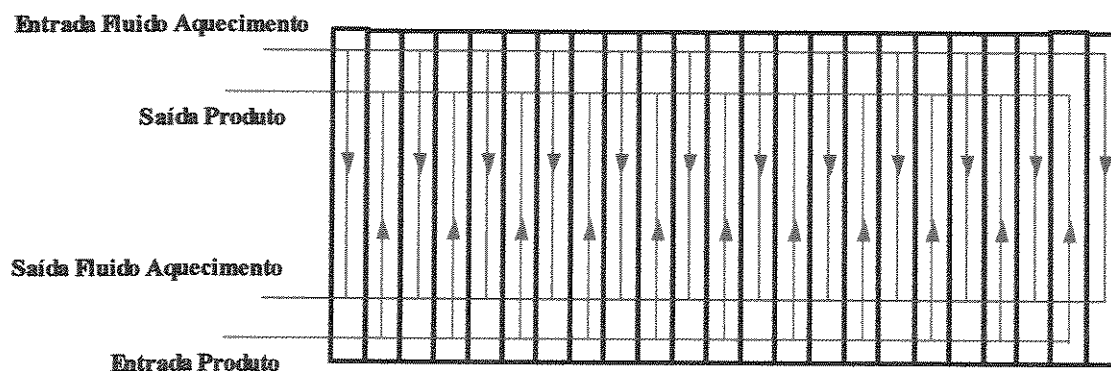


Figura 5 - Configuração do TCP.

V.1.2 Considerações no Desenvolvimento do Modelo

A modelagem matemática do processo de aquecimento do ovo e seus derivados no TCP foi desenvolvida com o objetivo de prever comportamento da temperatura de saída do produto em relação às variações nas temperaturas de entrada e vazões de ambos os fluidos.

O modelo matemático foi desenvolvido a partir do balanço de energia sobre pequenos elementos de volume de controle nos canais do TCP.

O volume de controle adotado é semelhante ao utilizado por Sharifi *et al.* (1995) e Berto (2000) em seus estudos sobre a modelagem dinâmica do processo em regime transiente num TCP, onde cada canal (j) foi subdividido em 8 seções (k) iguais. Cada seção constitui num elemento de controle, conforme apresentado na Figura 6.

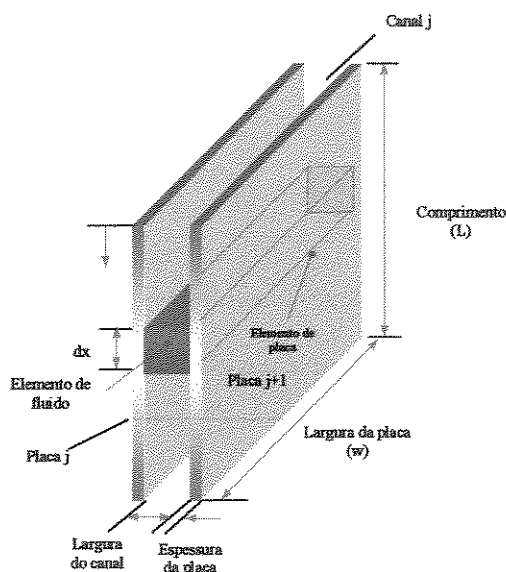


Figura 6 - Elemento de Volume de Controle.

Fonte: Berto (2000).

Foram feitas as seguintes considerações para o desenvolvimento do modelo matemático:

- Não existe transporte de calor por condução na direção do fluxo nos canais e nas placas;
- A transferência de calor ocorre apenas através das placas e não entre as bordas brazadas ou gaxetas;
- Os perfis de velocidade e de temperatura são uniformes ao longo do canal na direção da largura das placas;
- Os perfis de escoamento nos canais estão totalmente desenvolvidos;
- Não há acúmulo de massa durante o processo;
- As perdas de calor para o ambiente são desconsideradas;
- Não há mudanças de fase durante a troca térmica;
- Cada fluido é idealmente misturado na direção normal ao escoamento;

- A primeira e a última placa são isoladas e, portanto, consideradas perfeitamente adiabáticas;
- O escoamento é turbulento;
- Os cálculos das propriedades físicas, termofísicas e reológicas são realizados através dos valores médios de temperatura de cada elemento de volume de controle;
- A capacidade térmica das placas é desprezível;
- Embora a placa seja corrugada, a área da seção transversal do canal ($b \times w$) é assumida como uniforme.

Manipulando o balanço de energia de acordo com as considerações apresentadas obteve-se como resultante a equação diferencial (48) que representa a variação da temperatura do produto em função do tempo em cada volume de controle considerado (canal j , seção k).

$$\frac{dT_{k,j}}{dt} = \frac{1}{M_{k,j} c_{p_{k,j}}} \left[\dot{m} c_{p_{k+1,j}} T_{k+1,j} - \dot{m} c_{p_{k,j}} T_{k,j} \right] + \dot{q}_{k,j \rightarrow j+1} + \dot{q}_{k,j \rightarrow j-1} \quad (48)$$

Considerando:

$$\dot{q}_{k,j \rightarrow j+1} = U_{k,j \rightarrow j+1} A_{TC} \Delta T_{lm} \quad (49)$$

onde:

$$U_{k,j \rightarrow j+1} = \frac{1}{\frac{1}{h_{fq}} + \frac{b}{k_{placa}} + \frac{1}{h_p}} \quad (50)$$

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{k+1,j} + T_{k+1,j+1}) - (T_{k,j} + T_{k,j+1})}{\ln \frac{(T_{k+1,j} + T_{k+1,j+1})}{(T_{k,j} + T_{k,j+1})}} \quad (51)$$

A_{TC} é a área de troca de calor entre os fluidos no elemento de volume de controle considerado.

A resolução das equações diferenciais foi realizada através do método implícito de Runge-Kutta através da ferramenta ode23tb do software Matlab® (Mathworks Incorporation, 2001).

V.1.3 Características das placas e configuração do TCP

As informações sobre as placas e a configuração do TCP se encontram apresentadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Dimensões e configuração do trocador de calor a placas.

Item	Especificação	Unidade
Comprimento da placa	0,173	m
Largura da placa	0,768	m
Espessura da placa	0,0006	m
Espessura média do canal	0,0069	m
Diâmetro Equivalente	0,0013	m
Área total de troca	1,36	m ²
Quantidade total de placas	24	-
Número de canais fluido de aquecimento	12	-
Número de passes fluido de aquecimento	1	-
Número de canais produto	11	-
Número de passes produto	1	-
Material da placa	Inox 316	-
Material da gaxeta	NBR	-

V.1.4 Desenvolvimento do Simulador

O simulador foi programado no software Matlab® 6.1 de acordo com o fluxograma apresentado na Figura 7.

Primeiramente foi feita a escolha do produto a ser aquecido (ovo integral, gema ou clara de ovo) e, conseqüentemente, há a seleção das condições iniciais e das correlações para o respectivo produto.

O programa iniciou a seqüência de cálculos até atingir o primeiro regime permanente, que constitui no equilíbrio obtido a partir das condições iniciais. Então é aplicada a perturbação em uma ou mais variáveis manipuláveis ou de entrada e o programa reinicializa a seqüência de cálculos até atingir o segundo regime permanente que é o equilíbrio obtido após a perturbação no primeiro regime permanente.

O alcance do regime permanente acontece quando a diferença entre as temperaturas no instante $i+1$ e i é inferior a $0,0001^{\circ}\text{C}$ (precisão estabelecida para o programa). Na prática pode ser adotada a diferença de $0,1^{\circ}\text{C}$ que constitui na precisão dos sensores de temperatura normalmente utilizados neste processo.

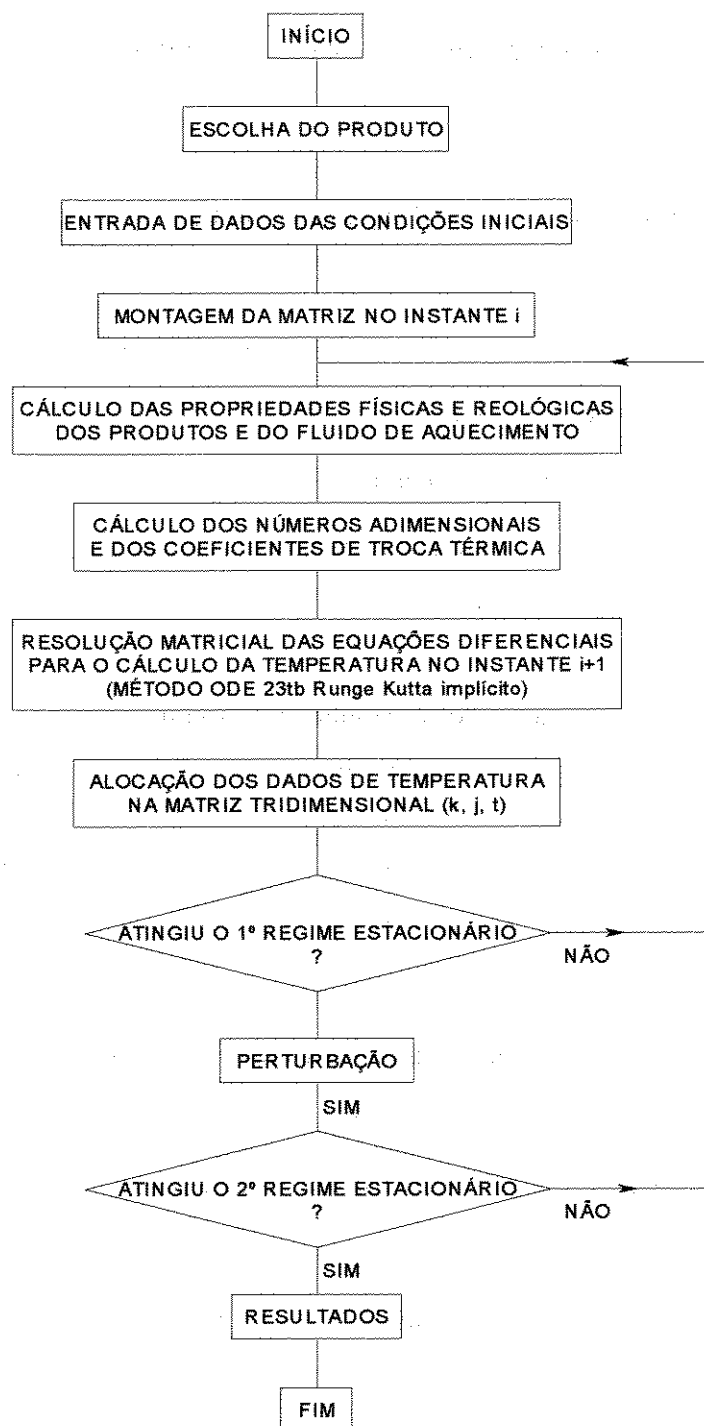


Figura 7 - Fluxograma do Simulador.

V.1.5 Correlações para as propriedades físicas e termofísicas dos fluidos

Neste trabalho foram utilizadas as correlações de Choi e Okos (1986) para os cálculos das propriedades termofísicas da água quente (fluido de aquecimento) em função da temperatura.

Para os produtos de ovos (ovo integral, gema de ovo e clara de ovo) foram utilizados os modelos de Coimbra *et al.* (2003), que correlaciona as propriedades termofísicas dos produtos em função da temperatura e do conteúdo de água.

Os conteúdos de água considerados nos cálculos das propriedades termofísicas dos produtos de ovos se encontram na Tabela 5.

Tabela 5 - Porcentagem de água e sólidos presentes nos produtos de ovos.

Produto	% de sólidos	% de água
Ovo integral	24,34 ¹	75,66
Gema de ovo	44,40 ²	55,60
Clara de ovo	12,00 ¹	88,00

Fonte: ¹Punidas & McKellar (1999).

²Ibarz & Sintes (1989).

Embora as equações de densidade e condutividade térmica, ajustadas por Coimbra *et al.*, (2003), não terem sido validadas para toda a faixa de temperatura considerada neste trabalho, a falta de mais informações sobre o comportamento termodinâmico dos produtos de ovo na literatura e, principalmente, o fato destas propriedades não apresentarem grandes mudanças de comportamento em diferentes faixas de temperatura, permitiram que fosse adotada a extrapolação.

V.1.6 Parâmetros reológicos dos fluidos

Para o cálculo das propriedades reológicas da clara de ovo e ovo integral foram utilizadas as correlações obtidas por Punidadas & McKellar (1999).

Para a gema, o índice de consistência (κ) foi ajustado com dados experimentais obtidos por Ibarz & Sintès (1989). O ajuste foi realizado pelo Software *Table Curve*, onde foi obtida a correlação de κ em função da temperatura (equação 21) com $R^2=0,995$.

V.1.7 Condições Iniciais de Operação

Os produtos de ovos apresentam temperaturas de pasteurização distintas, portanto, cada produto teve sua condição inicial de ensaio que está apresentada na Tabela 6.

O *set point* de cada produto será a sua própria temperatura de pasteurização.

Tabela 6 - Condições iniciais de operação do TCP para aquecimento de cada produto.

Variáveis	Ovo Integral	Gema de Ovo	Clara de Ovo
$T_{(Produto)} (^{\circ}C)$	10,0	10,0	10,0
$T_{(Fluido\ térmico)} (^{\circ}C)$	94,0	94,0	94,0
$m_{(Produto)} (kg/h)$	221,4	221,4	221,4
(kg/s)	0,0615	0,0615	0,0615

A partir destas condições operacionais foram realizados os ensaios para obtenção das vazões do fluido térmico, a fim de satisfazer as condições de temperatura de pasteurização dos produtos.

V.2 Planejamento de Ensaios

Segundo Barros Neto *et al.* (1996), a essência de um bom planejamento consiste em projetar um experimento de forma que ele seja capaz de fornecer exatamente o tipo de informação que se procura.

Foram realizados dois tipos de planejamentos experimentais para a obtenção dos dados de análise: Planejamento Individual e o Planejamento Fatorial Composto Central.

V.2.1 Planejamento Individual

O planejamento individual consiste na realização de experimentos, onde apenas uma variável independente é perturbada entre os níveis estabelecidos (- - -, - -, -, 0, +, ++, e +++) e as outras permanecem fixas no ponto central.

Através do planejamento individual, obtêm-se as curvas de reação do processo em relação a perturbação de cada variável independente, realiza-se a avaliação da linearidade e a caracterização da curva de reação do processo e obtêm-se os parâmetros para a sintonia de controle.

O planejamento individual foi utilizado para obtenção de dados para a realização das seguintes etapas:

- Avaliação da linearidade do processo;
- Caracterização da dinâmica do processo;
- Obtenção dos parâmetros da curva de reação;
- Sintonia do controlador PID adaptativo.

Para cada produto foram aplicadas perturbações individuais do tipo degrau nas variáveis manipuláveis ou de entrada, desta forma as variáveis independentes do planejamento são:

- Perturbação da temperatura de entrada do produto ($\Delta T_{p_entrada}$);
- Perturbação da temperatura de entrada do fluido de aquecimento ($\Delta T_{fq_entrada}$);
- Perturbação da vazão do produto (Δm_p);
- Perturbação da vazão do fluido de aquecimento (Δm_{fq}).

As variáveis dependentes foram:

- Temperatura de saída do produto em função do tempo ($T_{p_saida}(t)$);
- Parâmetros do modelo de comportamento dinâmico do processo (K_c , τ e ζ);
- Parâmetros da curva de reação do processo (K , T_d e Z).

Os níveis do planejamento individual estão apresentados na Tabela 7, para ovo integral, gema de ovo e clara de ovo, respectivamente.

Tabela 7 - Níveis das perturbações individuais para os produtos ovo integral, gema e clara de ovo.

Níveis	$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	Δm_p (kg/s)	Δm_{fq_ovo} (kg/s)	Δm_{fq_gema} (kg/s)	Δm_{fq_clara} (kg/s)
+++	+4,50	+6,00	+0,015	+0,216	+0,357	+0,108
++	+3,00	+4,00	+0,010	+0,139	+0,200	+0,095
+	+1,50	+2,00	+0,005	+0,077	+0,157	+0,013
0	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000
-	-1,50	-2,00	-0,005	-0,077	-0,157	-0,013
--	-3,00	-4,00	-0,010	-0,139	-0,200	-0,095
---	-4,50	-6,00	-0,015	-0,216	-0,357	-0,108

Os níveis de cada variável independente do planejamento individual foram escolhidos de acordo com as limitações dos equipamentos e do processo (capacidade das bombas, sistema de aquecimento resistivo e temperatura inicial do produto) de forma que a variável dependente temperatura de saída do produto ($T_{p_saida}(t)$), no segundo regime estacionário, tivesse variação mínima de 0,2°C para garantir a sensibilidade do sensor de temperatura PT100.

V.2.1.1 Avaliação da Linearidade do Processo

Para os três produtos foi realizada a avaliação da linearidade através de dois testes que verificam a adequação do processo quanto ao princípio da sobreposição, teste da imagem especular da resposta e teste da soma das respostas.

V.2.1.1.1 Teste da Imagem Especular da Resposta

No teste da imagem especular da resposta foi calculado o ganho relativo a uma perturbação degrau unitária em módulo, $|K(t)|$, para as respostas obtidas após a aplicação de perturbações degrau nos níveis ++, +, - e - - aplicadas nas quatro variáveis manipuladas ou de entrada para cada produto. O ganho em módulo foi calculado de acordo com a equação 52.

$$|K(t)| = \frac{|T_{p_saida}(t) - T_{1^{\circ}RP}|}{|\Delta I|} \quad (52)$$

onde:

$T_{1^{\circ}RP}$ é a temperatura do primeiro regime permanente;

$T_{p_saida}(t)$ é a temperatura resposta após a aplicação da perturbação degrau em função de tempo $0 < t < 1000s$;

ΔI é a magnitude da perturbação degrau.

O ganho relativo em módulo $|K(t)|$ foi calculado para cada ponto da temperatura de saída do produto e plotado em função do tempo. Os gráficos obtidos para cada variável manipulável nas perturbações aplicadas foram sobrepostos para verificar se o ganho em módulo é o mesmo em todos os pontos, qualquer que seja a perturbação aplicada.

V.2.1.1.2 Teste da Soma das Respostas

No teste da soma das respostas verificou-se se a soma das respostas de duas perturbações individuais (+ e ++) corresponde à resposta obtida pela entrada da soma das duas perturbações (+++).

De acordo com o princípio da sobreposição, os processos lineares apresentam a soma das respostas de duas entradas igual a resposta de uma perturbação cujo valor seja a soma das entradas individuais.

V.2.1.2 Caracterização da Dinâmica do Processo

A caracterização da dinâmica do processo de cada produto foi realizada através das curvas de reação do processo obtidas pelo planejamento de perturbações individuais.

Foram calculados os ganhos K relativos a uma perturbação degrau unitária de acordo com a equação (53).

$$K = \frac{T_{p_saída}(t) - T_{1^{o}RP}}{|\Delta I|} \quad (53)$$

Para cada variável manipulável foram testados os modelos de sistemas de primeira, primeira ordem em série e segunda ordem no software Statística®, os ajustes foram efetuados pelo método de Quasi-Newton.

A escolha do modelo de comportamento dinâmico do sistema em relação à perturbação de cada variável manipulável foi feita com base no melhor ajuste, valores de R^2 próximos de 1 e baixo desvio.

V.2.1.2.1 Ajuste dos parâmetros do modelo (K_c e τ) para processos lineares

Nos sistemas lineares, os parâmetros do modelo: K_c , τ e ζ (se o modelo for de segunda ordem) independem da perturbação aplicada. Nos sistemas não lineares, os parâmetros variam com a magnitude da perturbação aplicada ao sistema.

Assim, avaliou-se a possibilidade desta consideração para então realizar o ajuste para os processos não lineares.

V.2.1.2.2 Ajuste dos parâmetros do modelo (K_c e τ) para processos não lineares

Para os processos não lineares foi determinada uma faixa de aplicação de perturbações para cada variável em função das condições operacionais do processo. Foram obtidas curvas de resposta de 20 perturbações positivas e 20 perturbações negativas. Para cada curva foi ajustado o modelo previamente identificado pelas perturbações individuais e determinados os parâmetros K_c e τ .

Com os valores obtidos para K_c e τ , foi possível ajustar uma relação para cada parâmetro em função da perturbação aplicada.

V.2.1.3 Obtenção dos Parâmetros da Curva de Reação do Processo

Os parâmetros da curva de reação foram calculados para cada curva de reação obtida no planejamento experimental individual e para os processos não lineares foi selecionada uma faixa ampla de aplicação de perturbações para cada variável em função das condições operacionais do processo. Foram obtidas curvas de resposta de 20

perturbações positivas e 20 perturbações negativas. Para cada curva de resposta foram calculados os parâmetros gráficos (K , Z e T_d).

Com os valores obtidos para K , Z e T_d foi possível ajustar uma função para cada parâmetro em relação à perturbação aplicada.

V.2.1.4 Sintonia do controlador PID Adaptativo

Os parâmetros de sintonia do controlador foram obtidos através da aplicação das funções ajustadas para os parâmetros gráficos (K , Z e T_d) nas sugestões de sintonia do controlador PID sugeridas por Ziegler-Nichols, apresentadas na Tabela 2.

V.2.2 Planejamento Fatorial Composto Central (PFCC)

Através do planejamento fatorial composto central (PFCC) obtêm-se as curvas de reação do processo sob perturbações simultâneas.

O PFCC consiste em combinar as diferentes variáveis independentes (perturbações) entre o nível inferior (-1) e superior (+1) para realização de um número de ensaios estatisticamente suficiente para avaliação dos efeitos sobre as respostas em observação, tanto os principais quanto os de interação entre as variáveis (Barros Neto *et al.*, 1996).

A seleção dos níveis (-1) e (+1) de cada variável independente foi realizada de acordo com as limitações das condições operacionais do processo.

Para testar um modelo de segunda ordem, a quantidade de ensaios do PFCC foi estimada em $2^E + 2E$ ensaios, onde “E” é a quantidade de variáveis independentes.

A quantidade de ensaios 2^E é aplicada para análise das interações de primeira ordem, nos quais as variáveis abrangem os níveis (-1) a (+1), enquanto que $2E$ é a

quantidade de ensaios referente aos pontos axiais, com uma amplitude de variação de $(-\alpha)$ a $(+\alpha)$, cujo valor absoluto é $2^{E/4}$.

Pela metodologia do PFCC, devem ser acrescentados, ainda, ensaios onde todas as variáveis teriam seus valores no nível central (“0”) para que seja possível obter o erro puro e verificar se o processo é reprodutível ou não (Box *et al.*, 1978). No caso de simulação, apenas um ensaio foi realizado nas condições do ponto central, não permitindo a avaliação do erro puro.

A metodologia do PFCC foi utilizada para obter dados para avaliação do comportamento do processo sob perturbações simultâneas através das seguintes etapas:

- Caracterização do comportamento dinâmico do processo sob perturbações simultâneas;
- Obtenção das correlações de predição da temperatura de saída do produto;
- Aplicação do teste de soma das respostas entre variáveis distintas.

Com a finalidade de garantir que as respostas de todos os ensaios com perturbações multivariável tivessem o comportamento semelhante à curva “S”, os planejamentos experimentais foram realizados com os níveis das variáveis manipuláveis ou de entrada variando de forma a obter a temperatura de saída do produto nas tendências específicas positiva e negativa.

Para cada produto foram realizados os seguintes PFCC para tendências positivas e negativas:

- A) PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis;*
- B) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos;*
- C) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das vazões dos fluidos.*

Observa-se que cada produto possui condições iniciais específicas, conforme Tabela 6.

V.2.2.1 PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis

Para cada produto foram realizados 2 PFCC com 25 ensaios (2^4+8+1), um para tendências positivas e outro para tendências negativas da temperatura de saída de produto no TCP. O planejamento dos ensaios está apresentado na Tabela 8, neste caso, o valor de “ α ” é 2.

As variáveis independentes são:

- Perturbação da vazão do fluido de aquecimento (Δm_{fq});
- Perturbação da vazão do produto (Δm_p);
- Perturbação da Temperatura de entrada do fluido de aquecimento ($\Delta T_{fq_entrada}$);
- Perturbação da Temperatura de entrada do produto ($\Delta T_{p_entrada}$).

Como variáveis dependentes foram consideradas:

- Temperatura de saída do produto ($T_{p_saida}(t)$);
- Ganho Multivariável (K^*) e
- Constante de tempo Multivariável (τ^*).

Tabela 8 - PFCC com 25 ensaios.

Ensaio	Variáveis independentes				Variáveis dependentes		
	Δm_{fq} (kg/s)	Δm_p (kg/s)	$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	$T_{p_saida}(t)$ (°C)	K^*	τ^*
1	-1	-1	-1	-1			
2	+1	-1	-1	-1			
3	-1	+1	-1	-1			
4	+1	+1	-1	-1			
5	-1	-1	+1	-1			
6	+1	-1	+1	-1			
7	-1	+1	+1	-1			
8	+1	+1	+1	-1			
9	-1	-1	-1	+1			
10	+1	-1	-1	+1			
11	-1	+1	-1	+1			
12	+1	+1	-1	+1			
13	-1	-1	+1	+1			
14	+1	-1	+1	+1			
15	-1	+1	+1	+1			
16	+1	+1	+1	+1			
17	$-\alpha$	0	0	0			
18	$+\alpha$	0	0	0			
19	0	$-\alpha$	0	0			
20	0	$+\alpha$	0	0			
21	0	0	$-\alpha$	0			
22	0	0	$+\alpha$	0			
23	0	0	0	$-\alpha$			
24	0	0	0	$+\alpha$			
25	0	0	0	0			

As tabelas 9 e 10 apresentam os níveis do PFCC (25 ensaios) realizados para cada produto.

Tabela 9 - Níveis do PFCC (25 ensaios) para temperatura de saída dos produtos com tendência positiva.

Níveis	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
$\Delta m_{fq_ovo} (kg/s)$	+0,007	+0,057	+0,107	+0,157	+0,207
$\Delta m_{fq_gema} (kg/s)$	+0,02	+0,1	+0,18	+0,26	+0,34
$\Delta m_{fq_clara} (kg/s)$	+0,003	+0,028	+0,053	+0,078	+0,103
$\Delta m_p (kg/s)$	-0,009	-0,007	-0,005	-0,003	-0,001
$\Delta T_{fq_entrada} (^{\circ}C)$	+0,25	+1,0	+1,75	+2,5	+3,25
$\Delta T_p_entrada (^{\circ}C)$	+0,5	+1,5	+2,5	+3,5	+4,5

Tabela 10 - Níveis do PFCC (25 ensaios) para temperatura de saída o produto com tendência negativa.

Níveis	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
$\Delta m_{fq_ovo} (kg/s)$	-0,213	-0,163	-0,113	-0,63	-0,013
$\Delta m_{fq_gema} (kg/s)$	-0,34	-0,26	-0,18	-0,1	-0,02
$\Delta m_{fq_clara} (kg/s)$	-0,104	-0,079	-0,054	-0,029	-0,004
$\Delta m_p (kg/s)$	+0,001	+0,003	+0,005	+0,007	+0,009
$\Delta T_{fq_entrada} (^{\circ}C)$	-3,25	-2,5	-1,75	-1,00	-0,25
$\Delta T_p_entrada (^{\circ}C)$	-4,5	-3,5	-2,5	-1,5	-0,5

V.2.2.2 PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos

Para cada produto foram realizados 2 PFCC com 9 ensaios (2^2+4+1), um para tendências positivas e outro para tendências negativas da temperatura de saída do produto no TCP. O planejamento dos ensaios está apresentado na Tabela 11, neste caso o valor de “ α ” é 1,41.

As variáveis independentes são:

- Perturbação da Temperatura de entrada do fluido de aquecimento ($\Delta T_{fq_entrada}$) e
- Perturbação da Temperatura de entrada do produto ($\Delta T_{p_entrada}$).

Como variáveis dependentes foram consideradas:

- Temperatura de saída do produto ($T_{p_saida}(t)$);
- Ganho Multivariável (K^*);
- Constante de tempo Multivariável (τ^*).

Tabela 11 - PFCC com 9 ensaios.

Ensaio	Variáveis Independentes		Variáveis dependentes		
	$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	$T_{p_saida}(t)$ (°C)	K^*	τ^*
1	-1	-1			
2	+1	-1			
3	-1	+1			
4	+1	+1			
5	$-\alpha$	0			
6	$+\alpha$	0			
7	0	$-\alpha$			
8	0	$+\alpha$			
9	0	0			

A Tabela 12 e a Tabela 13 apresentam os níveis do PFCC (9 ensaios) realizados para cada produto.

Tabela 12 - Níveis do PFCC (9 ensaios) para temperatura de saída do produto com tendência positiva.

Níveis	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	+0,5	+1,1	+2,5	+3,9	+4,5
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	+1,0	+1,6	+3,0	+4,4	+5,0

Tabela 13 - Níveis do PFCC (9 ensaios) para temperatura de saída do produto com tendência negativa.

Níveis	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
$\Delta T_{fq_entrada} (^{\circ}\text{C})$	-4,5	-3,9	-2,5	-1,1	-0,5
$\Delta T_{p_entrada} (^{\circ}\text{C})$	-5,0	-4,4	-3	-1,6	-1,0

V.2.2.3 PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das vazões dos fluidos

Para cada produto foram realizados 2 PFCC com 9 ensaios (2^2+4+1), um para tendências positivas e outro para tendências negativas da temperatura de saída do produto no TCP. A sequência de ensaios do PFCC para as vazões é a mesma apresentada na Tabela 11, o valor de “ α ” é 1,41.

As variáveis independentes são:

- Perturbação da vazão do fluido de aquecimento (Δm_{fq});
- Perturbação da vazão do produto (Δm_p).

Como variáveis dependentes foram consideradas:

- Temperatura de saída do produto (T_{p_saida});
- Ganho Multivariável (K^*);
- Constante de tempo Multivariável (τ^*).

A Tabelas 14 e 15 apresentam os níveis do PFCC (9 ensaios) realizados para cada produto com tendências positivas e negativas.

Tabela 14 - Níveis das perturbações das vazões do PFCC (9 ensaios) com tendência positiva.

Níveis	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
$\Delta m_{fq_ovo} (kg/s)$	+0,0069	+0,036	+0,1069	+0,1778	+0,2069
$\Delta m_{fq_gema} (kg/s)$	+0,0190	+0,0600	+0,1600	+0,2600	+0,3010
$\Delta m_{fq_clara} (kg/s)$	+0,0028	+0,0173	+0,0528	+0,0883	+0,1028
$\Delta m_p (kg/s)$	-0,0100	-0,0087	-0,0056	-0,0024	-0,0011

Tabela 15 - Níveis das perturbações das vazões do PFCC (9 ensaios) com tendência negativa.

Níveis	$-\alpha$	-1	0	+1	$+\alpha$
$\Delta m_{fq_ovo} (kg/s)$	-0,2069	-0,1778	-0,1069	-0,0360	-0,0069
$\Delta m_{fq_gema} (kg/s)$	-0,3010	-0,2600	-0,1600	-0,0600	-0,0190
$\Delta m_{fq_clara} (kg/s)$	-0,1028	-0,0883	-0,0528	-0,0173	-0,0028
$\Delta m_p (kg/s)$	+0,0011	+0,0024	+0,0056	+0,0087	+0,0100

Por se tratar de dados obtidos através de simulação foi realizado apenas um ensaio no ponto central, desta forma, os efeitos são calculados apenas pela falta de ajuste do modelo, isto é, pelo erro residual.

Para a análise dos efeitos principais são realizados os seguintes testes estatísticos:

- Teste t: o valor de t indica o quão grande é o efeito de um fator (variável independente) na resposta em relação ao desvio padrão;
- Teste p: ou nível de significância está relacionado com o valor t calculado, neste trabalho foi considerado $p < 0,05$, que corresponde a um limite de 95% de nível de confiança para um teste hipotético no qual o coeficiente em questão é igual a zero. Valores pequenos de p estão associados a grandes valores de t, porque eles implicam que o coeficiente é muito maior que seu erro padrão;
- Coeficiente de correlação (R^2): explica o quanto a variação em torno da média é explicada pela regressão;

- Teste F: é obtido pela relação entre o $F_{\text{calculado}}$ e o F_{tabelado} e verifica se a regressão é ou não estatisticamente significativa, constitui numa evidência estatística de que há uma relação entre as variáveis dependentes e independentes. O teste F é utilizado para avaliar se o modelo obtido está ou não bem ajustado aos dados observados;

O tratamento dos dados obtidos pelo PFCC foi realizado no software Statistica[®], obtendo os efeitos das variáveis, os coeficientes de regressão, a análise da variância do modelo e as superfícies de respostas para os casos estatisticamente significativos.

V.2.2.4 Caracterização da dinâmica do processo sob perturbações Simultâneas

Para a caracterização da dinâmica do processo em sistemas com perturbações simultâneas será realizada uma analogia à metodologia de caracterização para sistemas com perturbações individuais.

Então, para cada ensaio realizado nos diversos PFCCs foi obtida a curva de resposta às perturbações degrau aplicadas.

Para cada ponto da curva de temperatura da resposta foi calculado o ganho multivariável que é o ganho relativo às perturbações degrau simultâneas (K^*). O ganho multivariável foi calculado de acordo com a equação (54).

$$K^* = \frac{T_{p_saida}(t) - T_{1^{o}RE}}{\prod_1^p |\Delta T|} \quad (54)$$

onde:

$T_{1^{o}RE}$ é a temperatura do primeiro regime permanente;

$T_{p_saida}(t)$ é a temperatura resposta após a aplicação das perturbações degrau em função de tempo $0 < t < 1000s$;

ΔI é a magnitude de cada perturbação degrau aplicada.

ψ é o número de perturbações aplicadas

Foram testados os modelos de sistemas de primeira ordem, primeira ordem em série e segunda ordem no software Statistica®, o ajuste foi efetuado pelo método de Quasi-Newton.

A escolha do modelo de comportamento dinâmico do sistema em relação às perturbações multivariável foi feita com base no melhor ajuste (valores de R^2 próximos de 1 e baixo desvio). Para cada PFCC foi selecionado um modelo que pudesse ajustar satisfatoriamente todas as curvas de reação obtidas através dos ensaios.

Desta forma, foram obtidas as respostas K^* e τ^* para a curva de temperatura de saída do produto resultante de cada ensaio do PFCC.

Através dos valores das respostas foram realizadas as análises estatísticas de acordo com a metodologia do PFCC.

Foram verificados os efeitos de cada variável independente e suas interações sobre os parâmetros K^* e τ^* e realizada as análises de variância (ANOVA) para a obtenção de modelos estatisticamente significativos que correlacione K^* e τ^* com as variáveis independentes.

Foram considerados modelos preditivos aqueles cujo R^2 esteja próximo a 1 ($R^2 > 0,9$) e teste $F > 4$.

Para os modelos preditivos foram obtidas as superfícies de resposta e curvas de nível que ilustram o comportamento de K^* e τ^* em função das variáveis independentes.

V.2.2.5 Obtenção das Correlações Multivariáveis de Predição da Temperatura de Saída do Produto

Através das curvas de respostas obtidas para cada ensaio dos PFCCs, foram obtidas as temperaturas de saída do produto ($T_{p_saída}(t)$) no regime permanente.

De forma análoga às respostas K^* e τ^* , foram realizadas as análises estatísticas pertinentes à metodologia do PFCC, dos efeitos e interações das variáveis independentes sobre a resposta e obtidos os modelos preditivos que correlacionem a temperatura de saída do produto com as variáveis independentes definidas.

Para os modelos preditivos foram obtidas as superfícies de resposta e curvas de nível que ilustram o comportamento da temperatura de saída do produto no regime permanente em função das variáveis independentes.

V.2.2.6 Aplicação do teste da soma das respostas entre variáveis distintas

Para aplicar o teste da soma das respostas entre variáveis distintas foram realizadas as seguintes considerações:

- Para uma perturbação individual (I_A) da variável A, a resposta do sistema é R_A ;
- Para uma perturbação individual (I_B) da variável B, a resposta do sistema é R_B ;
- Para uma perturbação simultânea da variável A (I_A) e da variável B (I_B), será verificado se resposta do sistema R_{AB} é $R_A + R_B$.

Será verificado se o teste da soma das respostas aplica-se entre duas variáveis distintas neste processo, sobrepondo as curvas $R_A + R_B$ e R_{AB} , verificando o teste da soma das respostas de variáveis distintas.

Se o teste da soma das respostas for aplicável, bastará saber o comportamento e a resposta do sistema com relação à perturbação individual, tendo em vista que resposta do sistema à perturbações simultâneas será a soma das respostas das variáveis perturbadas individualmente.

VI RESULTADOS E DISCUSSÕES

VI.1 Modelagem Matemática

VI.1.1 Obtenção das condições do primeiro estado estacionário

Considerando as características do TCP (Tabela 4) e as condições iniciais propostas (Tabela 6), obteve-se as temperaturas de estabilização apresentadas na Tabela 16 com as respectivas vazões de fluido térmico.

Tabela 16 - Temperaturas de saída do produto no primeiro regime permanente, obtidas pelo simulador e temperaturas de pasteurização para os produtos de ovos e respectivas vazões de fluido térmico.

Produto	Temperatura no Regime permanente (°C)	Temperatura de Pasteurização (°C)	Vazões de fluido térmico (kg/s)	Vazões de fluido térmico $\times 10^{-3}$ (kg/h)
Ovo	60,03	60,0	0,303	1,091
Integral				
Gema de	61,12	61,1	0,500	1,800
Ovo				
Clara de	56,63	56,6	0,152	0,547
Ovo				

Percebe-se que a temperatura referente ao primeiro regime permanente coincide com as temperaturas de pasteurização de cada produto. Desta forma, a resposta do sistema em relação às perturbações aplicadas será considerada como desvio do processo em relação à temperatura de pasteurização (*set point*).

VI.2 Planejamento de Ensaios

VI.2.1 Planejamento Individual

VI.2.1.1 Avaliação da Linearidade do Processo

VI.2.1.1.1 Teste da imagem especular da resposta

De acordo com o princípio da sobreposição o processo é considerado linear se o comportamento da resposta a uma perturbação positiva apresenta perfeita imagem especular da resposta a uma perturbação negativa de mesma amplitude.

Se a comparação do comportamento das respostas for realizada através do módulo do ganho relativo $|K(i)|$ (calculado através da equação 52), os processos lineares apresentarão curvas de reação (característica) sobrepostas, obtidas a partir de quaisquer perturbações, sejam positivas ou negativas.

Os gráficos apresentados nas Figuras 8 a 11 comparam o comportamento da resposta (temperatura de saída do produto) quando aplicadas perturbações de diferentes amplitudes (positivas e negativas) nas variáveis independentes: temperatura de entrada do produto, temperatura de entrada do fluido de aquecimento e vazões do produto e do fluido de aquecimento, respectivamente.

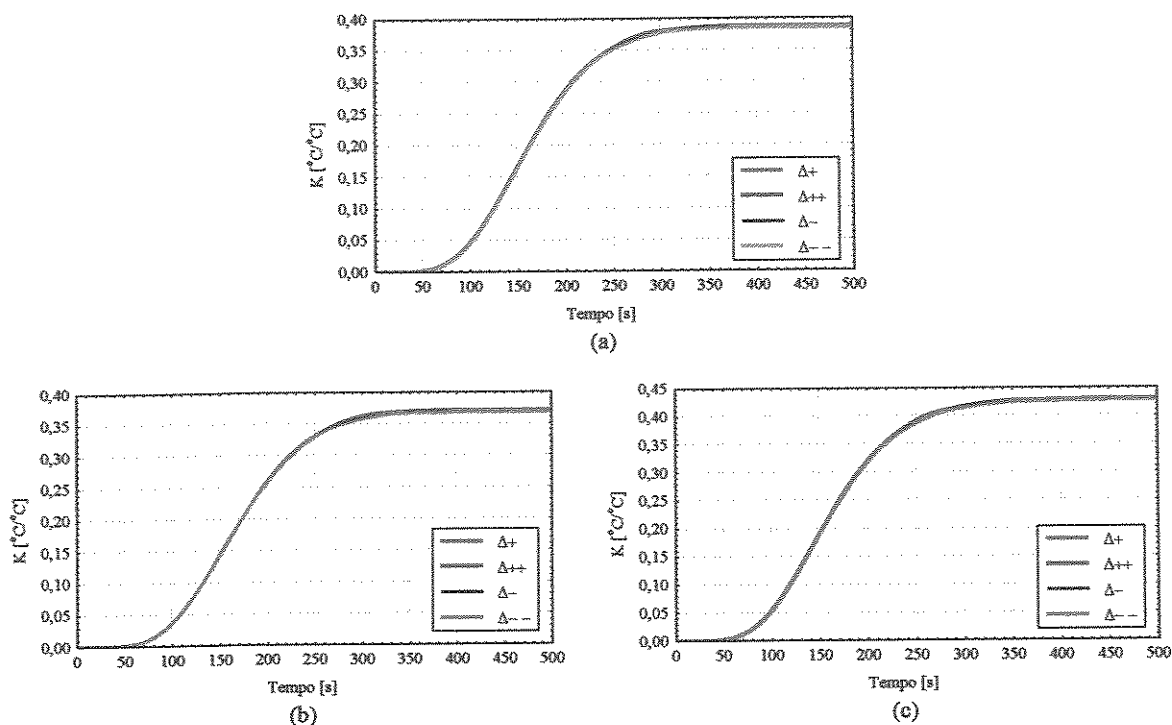


Figura 8 - Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da temperatura de entrada do produto: (a) ovo integral, (b) gema, (c) clara.

Na Figura 8 pode-se observar que as curvas de reação a perturbações na temperatura de entrada do produto apresentam pronunciado tempo morto, este fato é uma característica do sistema que apresenta um retardamento da reação à perturbação aplicada, devido ao tempo de residência do produto nos canais do TCP.

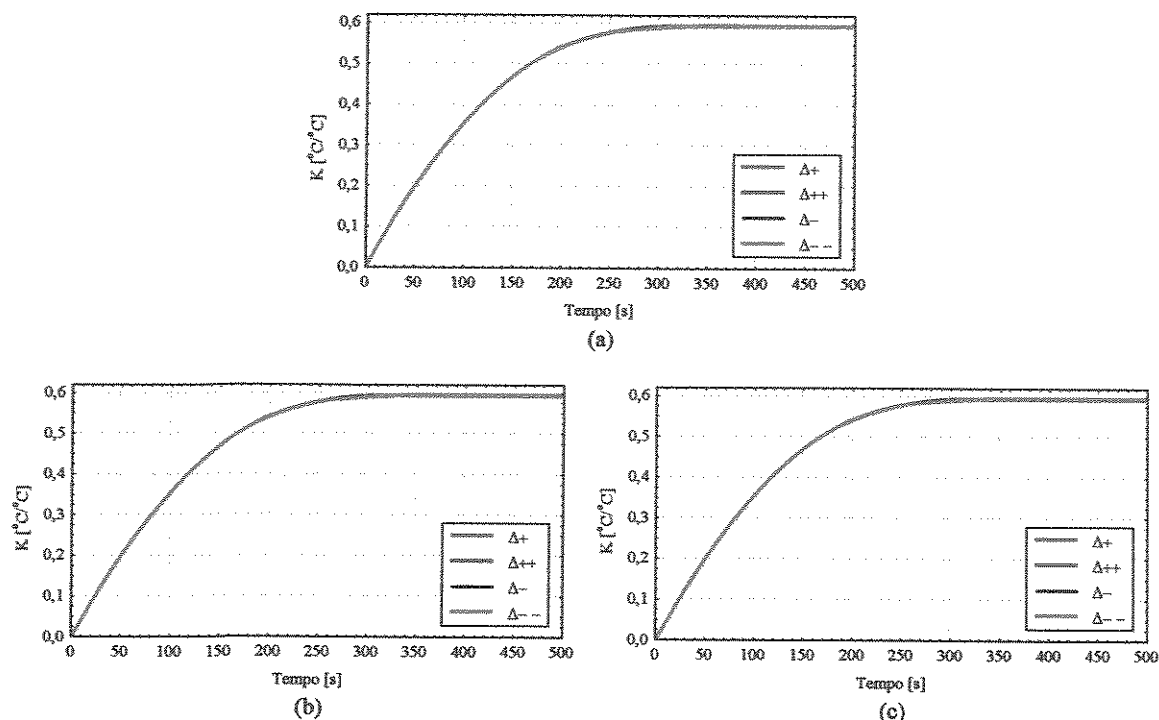


Figura 9 - Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da temperatura de entrada do fluido de aquecimento: (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.

Na Figura 9 verifica-se que a reação à perturbação da temperatura de entrada do fluido apresenta resposta mais rápida. Este comportamento pode ser explicado pela configuração de fluxo contra-corrente do TCP, a temperatura da água quente impacta primeiramente as últimas seções dos canais dos produtos, isto é, próximo à saída do produto.

Observando as Figuras 8 e 9 verifica-se que as curvas de reação a diferentes perturbações estão sobrepostas, portanto, pelo princípio da imagem especular, pode-se afirmar que o processo apresenta comportamento linear em relação às perturbações nas

temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento tanto para o ovo integral, como para a gema e clara de ovo.

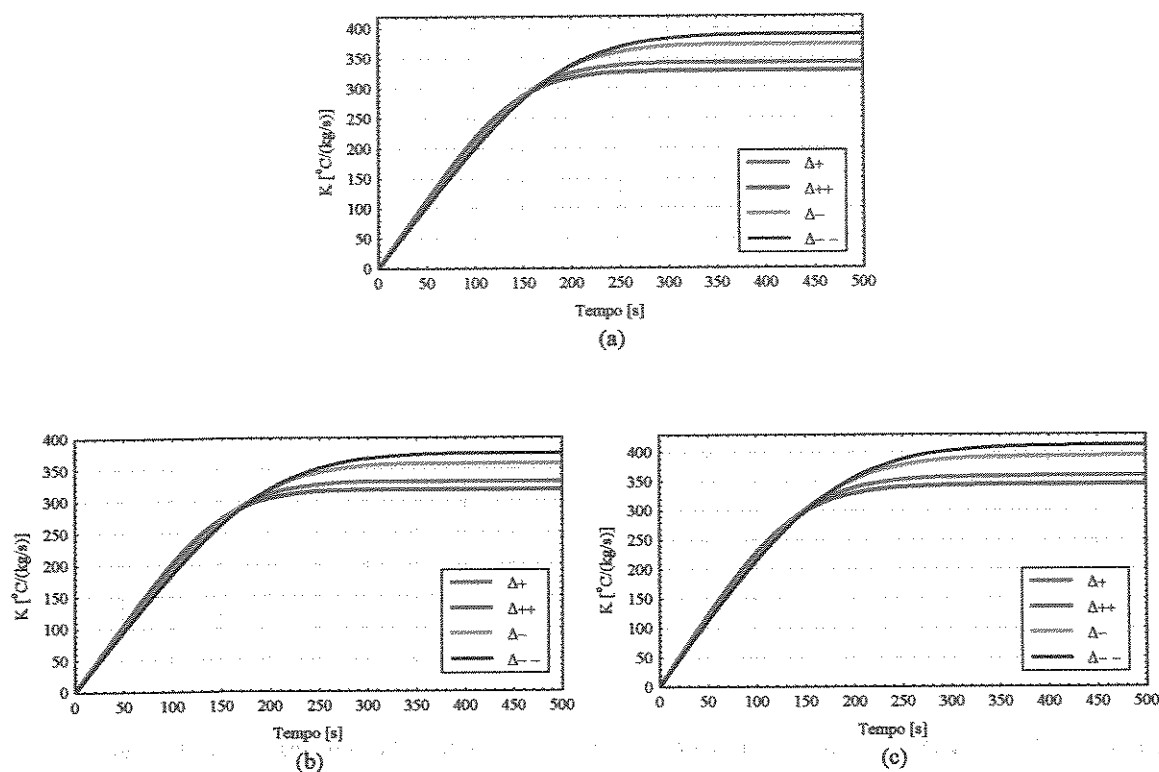


Figura 10 - Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da vazão do produto: (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.

Na Figura 10 pode-se verificar que o tempo de subida das curvas de reação do processo a diferentes amplitudes de perturbação da vazão do produto são semelhantes, no entanto, os ganhos em módulo no regime permanente diferem. As perturbações negativas apresentam ganhos em módulo maiores que as perturbações positivas.

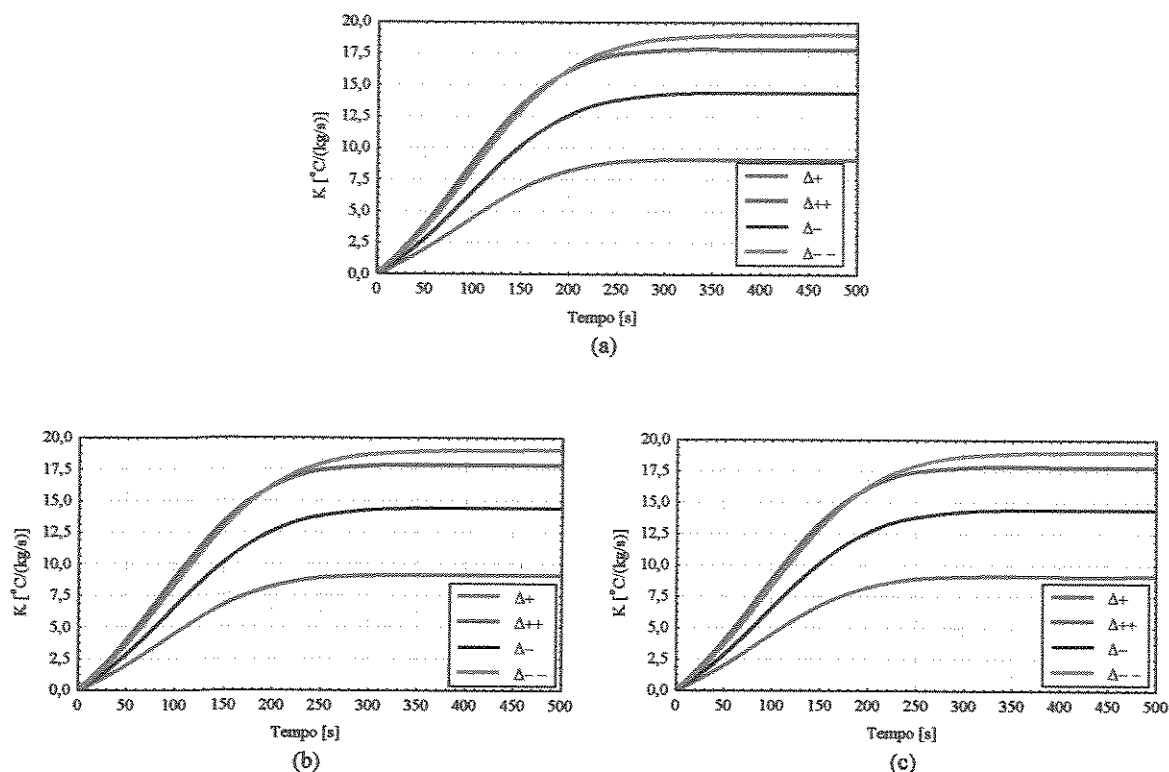


Figura 11- Curvas de reação do módulo do ganho relativo da temperatura de saída do produto após as perturbações degrau positivas e negativas da vazão de fluido de aquecimento. (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.

A Figura 11 mostra que a diferença entre os ganhos em módulo das curvas de reação para perturbações positivas e negativas da vazão do fluido de aquecimento são acentuados. Os ganhos em módulo das curvas de reação obtidas pela perturbação negativa são sempre superiores aos ganhos em módulo das perturbações positivas.

Observa-se que, nas Figuras 10 e 11, as curvas de reação a diferentes perturbações não apresentam sobreposição, portanto, pelo princípio da imagem especular pode-se afirmar que o processo não apresenta comportamento linear em relação a perturbações nas vazões dos produtos e do fluido de aquecimento.

VI.2.1.1.2 Teste da soma das respostas

Conforme citado no item V.2.1.1.2, o princípio da sobreposição também implica que sistemas lineares apresentam a soma das respostas de duas perturbações individuais igual à resposta obtida pela soma destas perturbações.

Para analisar esta característica no processo, foram plotados em uma mesma figura as curvas de reação das respostas da temperatura relativa de saída do produto, T^* (calculada pela equação 55), *versus* as respostas das perturbações individuais Δ_+ e Δ_{++} , a soma de suas respostas em relação às perturbações Δ_+ e Δ_{++} e a resposta da soma das perturbações ($\Delta_{++} = \Delta_+ + \Delta_{++}$).

$$T^* = T_{p_saida}(t) - T_{1^{o}RE} \quad (55)$$

Onde:

$T_{1^{o}RE}$ é a temperatura do primeiro regime permanente;

$T_{p_saida}(t)$ é a temperatura resposta após a aplicação das perturbações degrau em função de tempo $0 < t < 1000s$;

Observa-se na Figura 12 que as respostas referentes às perturbações na temperatura do produto nos níveis Δ_{++} e $(\Delta_+) + (\Delta_{++})$ apresentam boa sobreposição, caracterizando, portanto, o processo como linear respectivamente a cada produto ensaiado. Também é possível verificar nestas figuras a presença de um grande tempo morto na curva de reação em relação à perturbação na temperatura do produto, como identificado no teste da imagem especular da resposta.

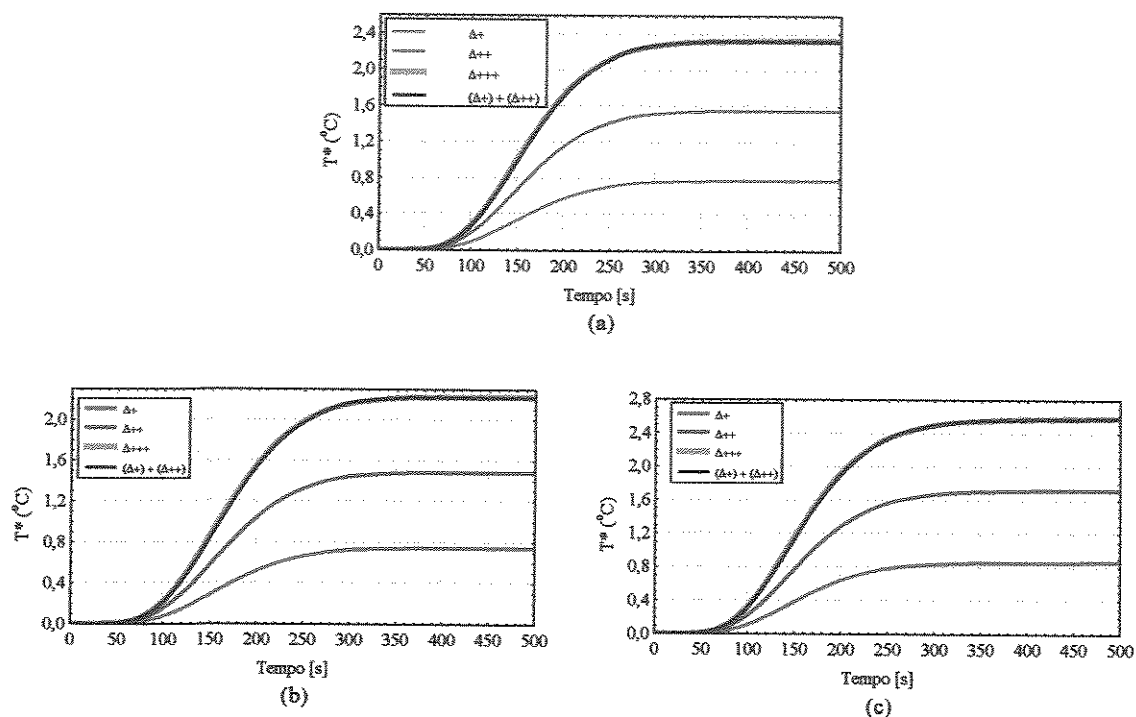


Figura 12 - Curvas de reação da temperatura relativa de saída do produto, após as perturbações $\Delta+$, $\Delta++$, $(\Delta+)+(\Delta++)$ e $\Delta+++$ na temperatura de entrada do produto: (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.

Na Figura 13 é possível verificar a sobreposição das curvas de reação em relação às perturbações Δ_{+++} e $(\Delta_{+}) + (\Delta_{++})$.

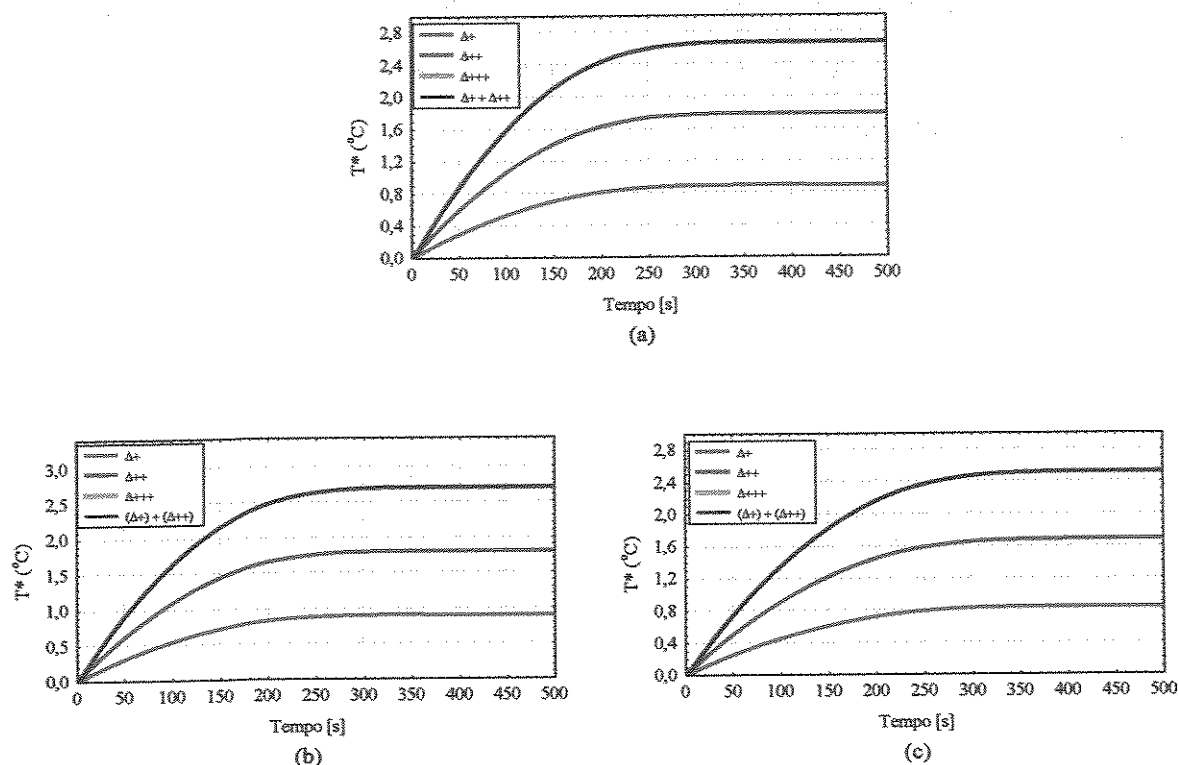


Figura 13 - Curvas de reação da temperatura relativa da saída do produto, após as perturbações Δ_{+} , Δ_{++} , $(\Delta_{+}) + (\Delta_{++})$ e Δ_{+++} na temperatura de entrada do fluido de aquecimento (a) ovo integral, (b) gema (c) clara.

Pode-se afirmar que o processo em relação às perturbações das variáveis temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento é linear para os três produtos: ovo integral, gema e clara, conforme identificado no teste da imagem especular da resposta.

Embora os tempos de subida das curvas de reação em relação às perturbações Δ_{+++} e $(\Delta_{+}) + (\Delta_{++})$ na vazão do produto sejam os próximos, a Figura 14 mostra que as curvas não se sobrepõem completamente, apresentando pequena diferença de ganho no regime permanente. Por isso, o processo em relação a perturbações da vazão do produto foi classificado como não linear.

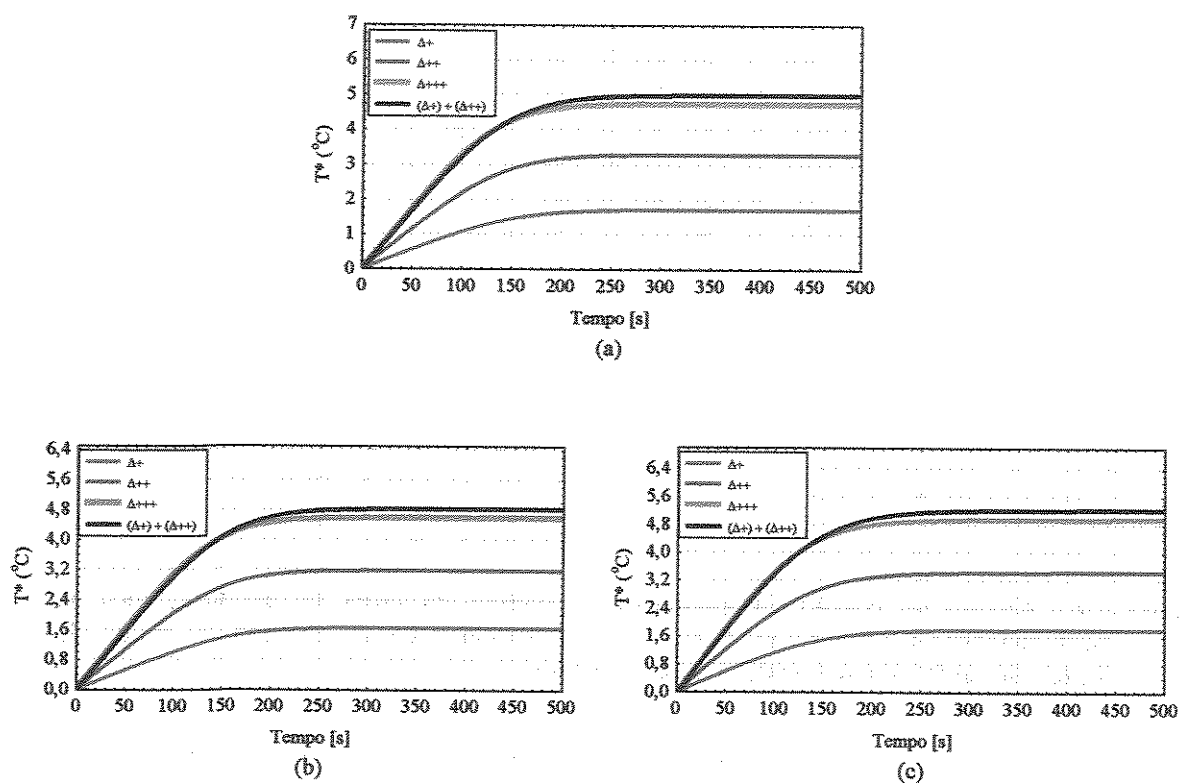


Figura 14 - Curvas de reação da temperatura relativa de saída do produto, após as perturbações Δ_{+} , Δ_{++} , $(\Delta_{+}) + (\Delta_{++})$ e Δ_{+++} na vazão de produto: (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.

Através da Figura 15 verifica-se a forte não linearidade do processo em relação às perturbações da vazão do fluido de aquecimento, visto que as curvas de reação em relação às perturbações Δ_{+++} e $(\Delta_{+}) + (\Delta_{++})$ na variável vazão do fluido de aquecimento não se sobrepõem.

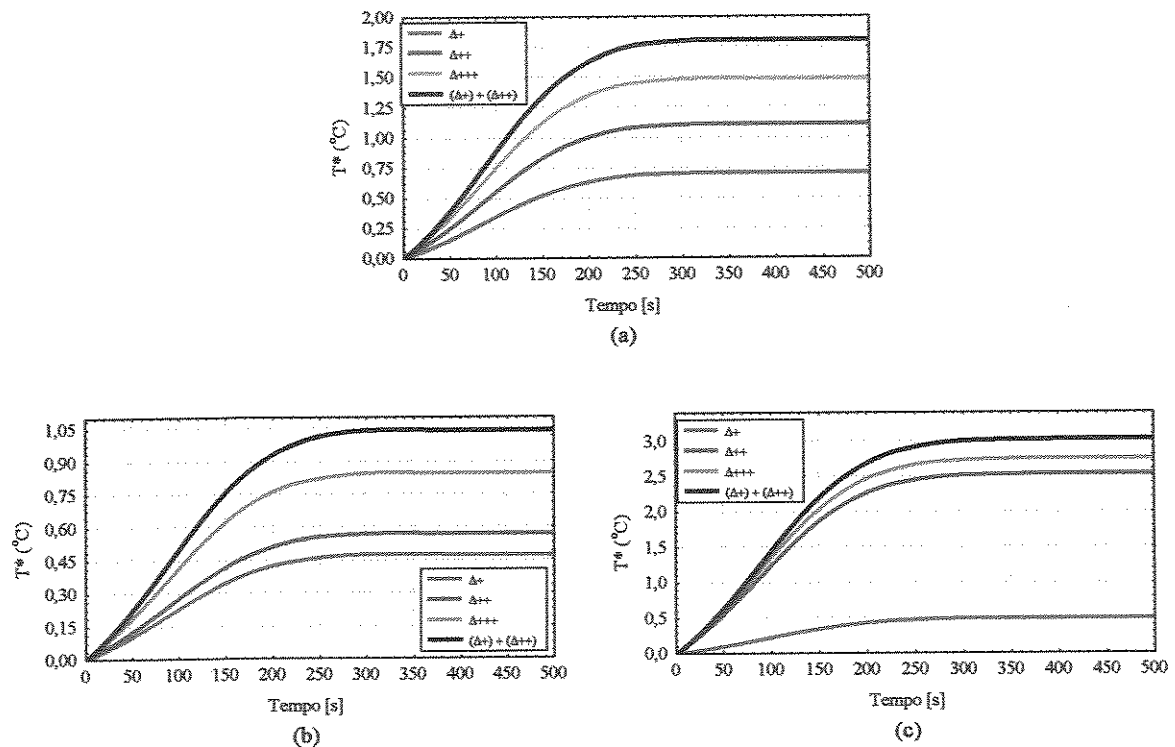


Figura 15 - Curvas de reação da temperatura relativa de saída do produto, após as perturbações Δ_{+} , Δ_{++} , $(\Delta_{+}) + (\Delta_{++})$ e Δ_{+++} na vazão de fluido de aquecimento: (a) ovo integral, (b) gema e (c) clara.

Pode-se concluir, portanto, que em relação aos testes da imagem especular e da soma das respostas, os processos são lineares para perturbações nas temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento e não lineares para as perturbações nas vazões de produto e fluido de aquecimento.

VI.2.1.2 Caracterização da Dinâmica do Processo

Conforme descrito no item V.2.1.2, foram utilizadas as curvas de reação da temperatura de saída do produto obtidas pelo planejamento individual para a realização do ajuste do modelo que melhor representasse o sistema.

Utilizando o software Statistica foram testados ajustes pelas equações de primeira ordem, primeira ordem com tempo morto e equações de segunda ordem variando o fator de amortecimento (ζ) entre os valores maiores, menores e igual a 1.

Na etapa de identificação dos processos de aquecimento de ovo integral, gema e clara houve a preocupação de ajustar o mesmo tipo de modelo para descrever a reação dos processos dos diferentes produtos em relação às perturbações da mesma variável independente.

As Figuras 16 a 18 apresentam os melhores ajustes obtidos para as curvas de reação em relação às perturbações aplicadas, em cada produto e seu respectivo R^2 .

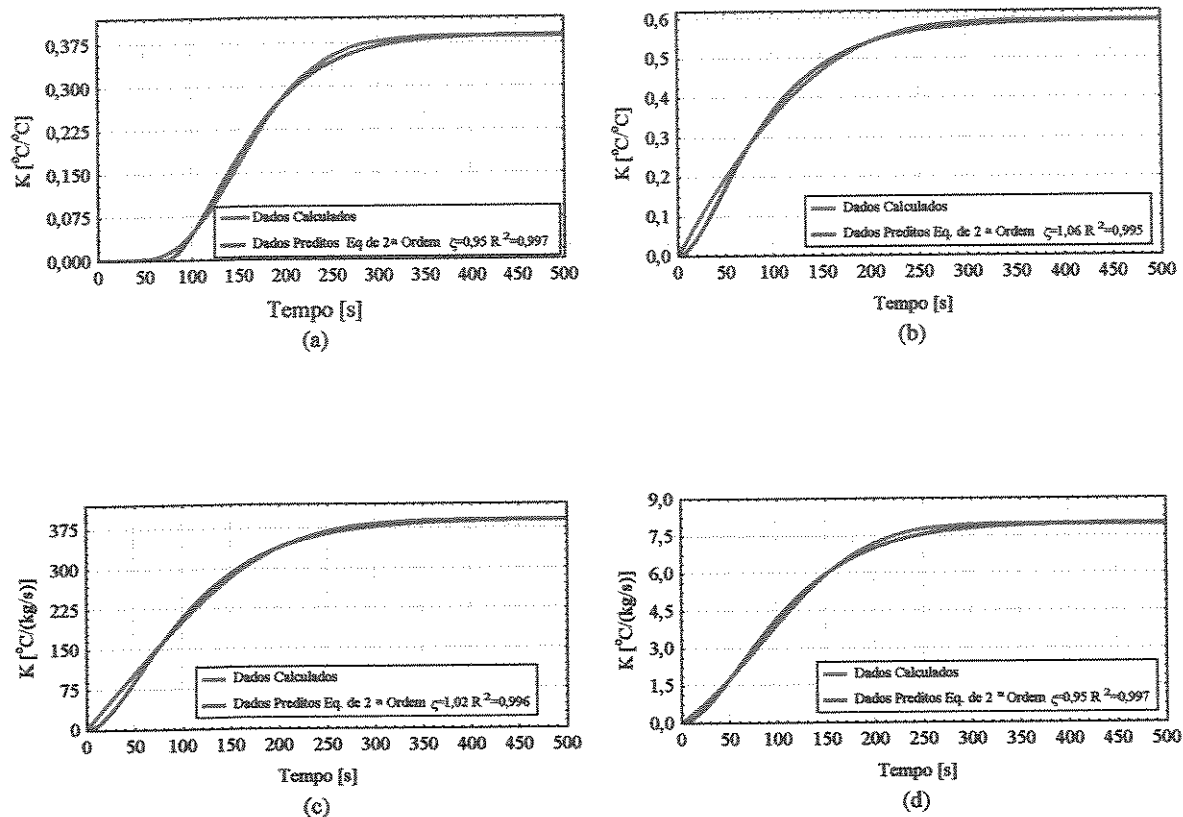


Figura 16 - Ajuste da curva de reação da temperatura de saída do ovo integral sob perturbação degrau das variáveis: (a) temperatura de entrada do produto, (b) temperatura de entrada do fluido de aquecimento, (c) vazão do produto e (d) vazão do fluido de aquecimento.

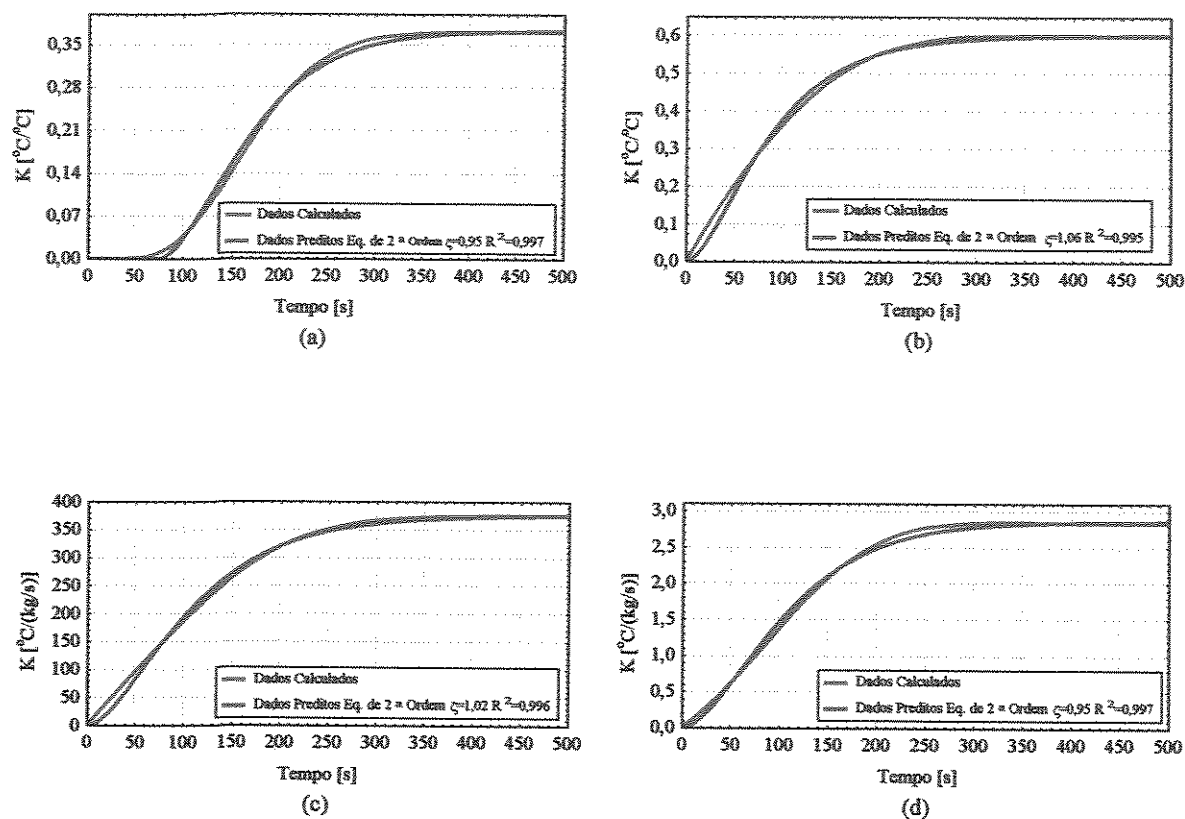


Figura 17 - Ajuste da curva de reação da temperatura de saída da gema de ovo sob perturbação degrau das variáveis: (a) temperatura de entrada do produto, (b) temperatura de entrada do fluido de aquecimento, (c) vazão do produto e (d) vazão do fluido de aquecimento.

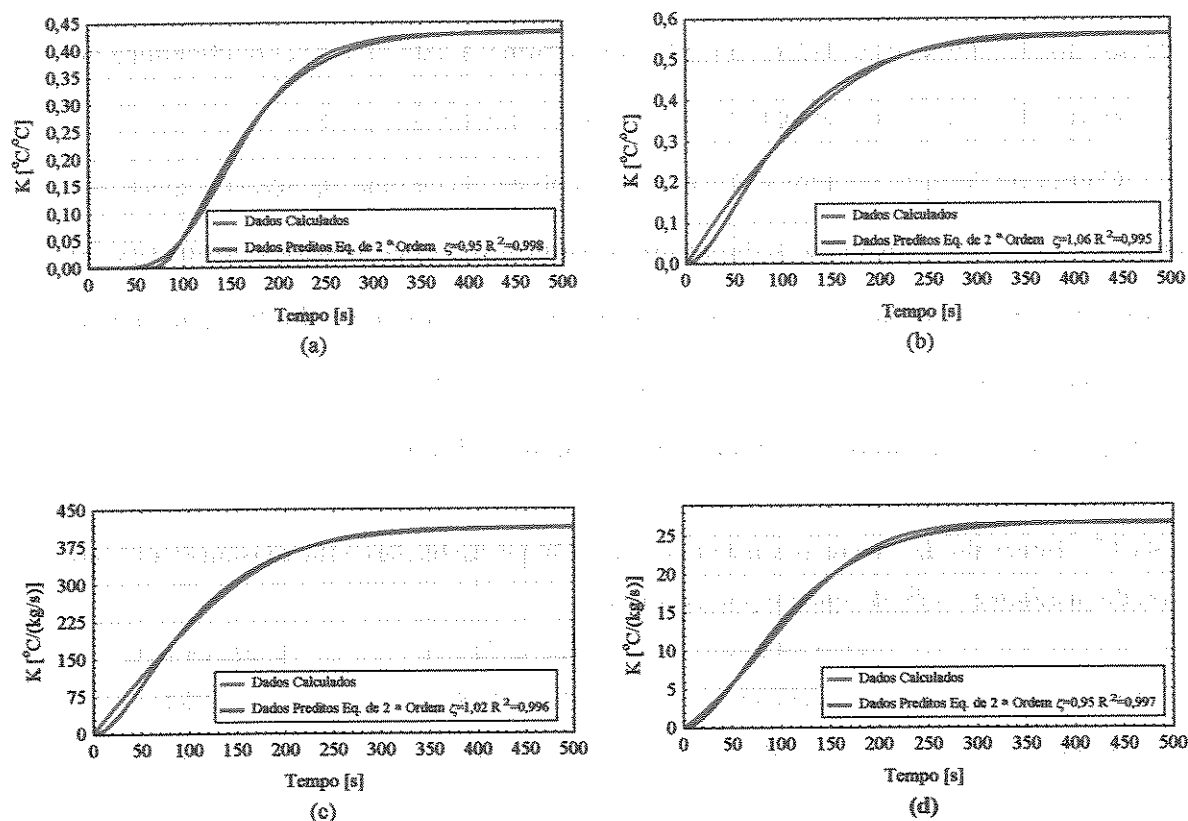


Figura 18 - Ajuste da curva de reação da temperatura de saída da clara de ovo sob perturbação degrau das variáveis: (a) temperatura de entrada do produto, (b) temperatura de entrada do fluido de aquecimento, (c) vazão do produto e (d) vazão do fluido de aquecimento.

VI.2.1.2.1 Ajustes dos parâmetros do modelo (K_c e τ) para os processos lineares

Para os processos lineares, os parâmetros K_c e τ obtidos são constantes determinadas de acordo com o modelo já identificado e ajustado pelo software Statistica® através do método de Quasi-Newton.

Os valores dos parâmetros K_c e τ para os três produtos estão apresentados nas Tabelas 18 a 23.

VI.2.1.2.2 Ajustes dos parâmetros do modelo (K_c e τ) para os processos não lineares

Devido à característica de não linearidade, os parâmetros de ajuste de curva do processo variam com a perturbação aplicada. Desta forma, a caracterização da dinâmica do processo deve levar em consideração esta variação no modelo ajustado.

Conforme descrito no item V.2.1.2.2, para a obtenção de uma equação de ajuste dos parâmetros K_c e τ em função da perturbação, foi aplicado 20 perturbações positivas e 20 perturbações negativas das variáveis vazão de produto e vazão de fluido de aquecimento nos processos de aquecimento de ovo integral, gema e clara. Os intervalos de variação das perturbações para cada variável e produto se encontram na Tabela 17.

Tabela 17 - Intervalo de variação utilizado entre as 40 perturbações aplicadas nas variáveis vazões do produto e do fluido quente por produto.

	Ovo integral	Gema de ovo	Clara de ovo
Δm_{fq} (kg/s)	0,01785	0,0108	0,0054
Δm_p (kg/s)	0,00200	0,0020	0,0020

Para cada perturbação foi imposto o modelo de segunda ordem já identificado e ajustado os parâmetros K_c e τ da equação (32).

A Figuras 19 e 20 apresentam os valores de K_c e τ obtidos para o ovo integral. Os gráficos do gema e da clara apresentam comportamento semelhante e se encontram em anexo (Anexo I).

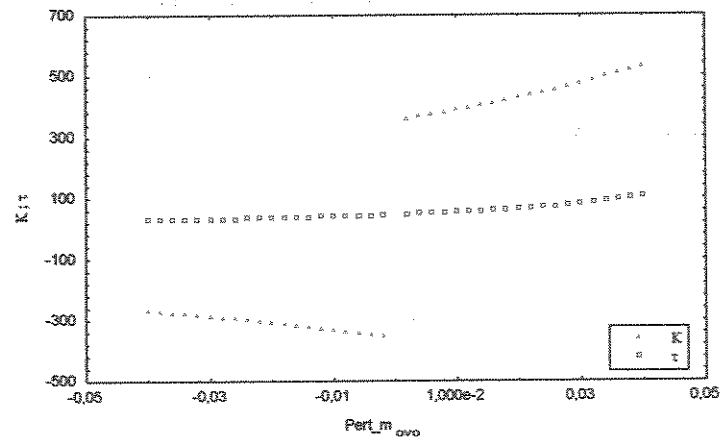


Figura 19 - Valores de K_c e τ obtidos em função da perturbação da vazão de ovo integral.

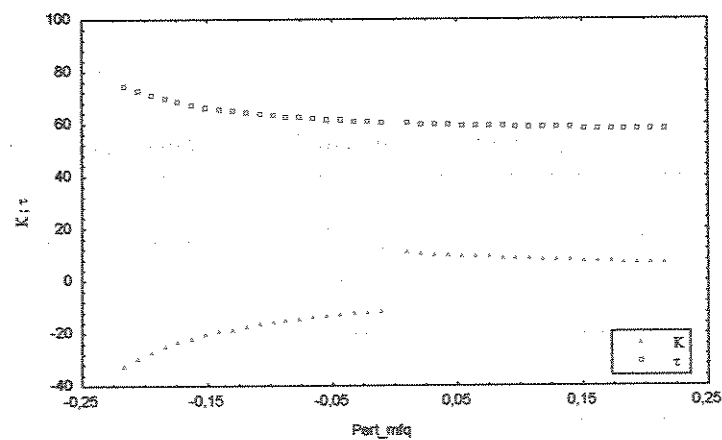


Figura 20 - Valores de K_c e τ obtidos em função da perturbação da vazão de fluido de aquecimento para o produto ovo integral.

Observando as Figuras 19 e 20 nota-se que os valores de K_c (ganho em regime estacionário) está diretamente relacionado com a perturbação aplicada. Verifica-se também, que para valores de perturbações nulos não há ganho por definição.

As equações de ajuste dos valores de K_c e τ foram obtidas pelo software *Table Curve*. Para a obtenção de melhores ajustes optou-se por ajustar os valores de K_c através de duas equações que descrevem K_c em função das perturbações positivas e negativas.

Das equações sugeridas pelo software *Table Curve*, optou-se pelos seguintes modelos para os parâmetros K_c e τ .

$$K_c = \frac{1}{a_1 + b_1 \Delta I} \quad (56)$$

$$\tau = \frac{a_2 + b_2 \Delta I}{c_2 + d_2 \Delta I} \quad (57)$$

onde:

a_1, b_1, a_2, b_2, c_2 e d_2 são parâmetros de ajuste e ΔI é a intensidade da perturbação.

As Tabelas 18 a 23 apresentam as equações obtidas para K_c e τ em função das perturbações aplicadas para os produtos ovo integral, gema e clara.

Tabela 18 - Equações de ajuste de K_c ⁽¹⁾ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para o ovo integral.

Variáveis	Ovo	R ²	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	0,594	0,995	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	0,387	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{1}{0,0895 + 0,257 \Delta m_{fq}}$	0,999	$0,0108 < \Delta m_{fq} < 0,2160$
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{1}{-0,0903 - 0,275 \Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,2160 < \Delta m_{fq} < -0,0108$
Δm_p (kg/s)	$\frac{1}{0,0028 - 0,0229 \Delta m_p}$	0,999	$0,002 < \Delta m_p < 0,040$
Δm_p (kg/s)	$\frac{1}{-0,0028 + 0,0235 \Delta m_p}$	0,999	$-0,040 < \Delta m_p < -0,002$

¹ $[K_c] = ^\circ\text{C}/[\Delta I]$, onde $[\Delta I]$ é a unidade da variável perturbada.

Tabela 19 - Equações de ajuste de K_c ⁽¹⁾ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para gema de ovo.

Variáveis	Gema	R ²	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	0,601	0,995	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	0,370	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{1}{0,2596 + 0,454\Delta m_{fq}}$	0,999	$0,0179 < \Delta m_{fq} < 0,357$
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{1}{-0,2626 - 0,49\Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,357 < \Delta m_{fq} < -0,179$
Δm_p (kg/s)	$\frac{1}{0,0029 - 0,0239\Delta m_p}$	0,999	$0,002 < \Delta m_p < 0,036$
Δm_p (kg/s)	$\frac{1}{-0,0029 + 0,0239\Delta m_p}$	0,999	$-0,040 < \Delta m_p < -0,002$

¹ $[K_c] = ^\circ\text{C}/[\Delta I]$, onde $[\Delta I]$ é a unidade da variável perturbada.

Tabela 20 - Equações de ajuste de K_c ⁽¹⁾ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para clara de ovo.

Variáveis	Clara	R ²	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	0,561	0,995	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	0,430	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{1}{0,0244 + 0,137\Delta m_{fq}}$	0,999	$0,0054 < \Delta m_{fq} < 0,1080$
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{1}{-0,0245 - 0,142\Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,1080 < \Delta m_{fq} < -0,0054$
Δm_p (kg/s)	$\frac{1}{-0,0027 - 0,0240\Delta m_p}$	0,999	$0,002 < \Delta m_p < 0,004$
Δm_p (kg/s)	$\frac{1}{0,0027 + 0,023\Delta m_p}$	0,999	$-0,040 < \Delta m_p < -0,002$

¹ $[K_c] = ^\circ\text{C}/[\Delta I]$, onde $[\Delta I]$ é a unidade da variável perturbada.

Tabela 21 - Equações de ajuste de $\tau^{(2)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para ovo integral.

Variáveis	Ovo	R ²	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	46,18	0,995	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	51,90	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{61,01 + 110,6\Delta m_{fq}}{1 + 1,939\Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,216 < \Delta m_{fq} < 0,216$
Δm_{fp} (kg/s)	$\frac{49,79 + 18,63\Delta m_p}{1 - 13,57\Delta m_p}$	0,999	$-0,04 < \Delta m_p < 0,04$

² [τ] = s.Tabela 22 - Equações de ajuste de $\tau^{(2)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para gema de ovo.

Variáveis	Gema	R ²	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	45,06	0,995	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	53,46	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{60,54 + 172,0\Delta m_{fq}}{1 + 3,178\Delta m_{fq}}$	0,998	$-0,357 < \Delta m_{fq} < 0,357$
Δm_{fp} (kg/s)	$\frac{47,70 + 2,777\Delta m_p}{1 - 13,85\Delta m_p}$	0,999	$-0,04 < \Delta m_p < 0,036$

² [τ] = s.Tabela 23 - Equações de ajuste de $\tau^{(2)}$ em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para clara de ovo.

Variáveis	Clara	R ²	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	52,75	0,995	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	53,01	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{64,64 + 307,0\Delta m_{fq}}{1 + 5,942\Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,108 < \Delta m_{fq} < 0,108$
Δm_{fp} (kg/s)	$\frac{47,46 - 6,916\Delta m_p}{1 + 13,75\Delta m_p}$	0,999	$-0,04 < \Delta m_p < 0,04$

² [τ] = s.

Observa-se que os modelos escolhidos forneceram para os três produtos ótimos ajustes para os parâmetros K_c e τ , tanto na perturbação da vazão do fluido de aquecimento quanto na perturbação da vazão do produto.

Mesmo para as perturbações das temperaturas de entrada do fluido de aquecimento e do produto que possuem valores de K_c e τ constantes, foi obtido um alto coeficiente de correlação (R^2).

VI.2.1.3 Obtenção dos parâmetros da curva de reação do processo

O processo de aquecimento estudado para o ovo integral, gema de ovo e clara de ovo apresentou comportamento não linear em relação às perturbações nas vazões de produto e fluido de aquecimento. Da mesma forma que o item anterior, utilizou-se os ajustes do modelo de segunda ordem linear para a representação do comportamento dinâmico dos processos. Para representar a não linearidade foram admitidos parâmetros não constantes da curva de reação, os quais foram ajustadas funções dependentes das perturbações aplicadas.

Para cada resposta dinâmica da temperatura de saída do produto, originada dos ensaios do planejamento individual, foi aplicado o método da curva de reação do processo e obtidos os parâmetros gráficos K , Z e T_d .

Para os processos lineares estes parâmetros são constantes, porém para os processos não lineares variam em função da perturbação aplicada.

De forma análoga à obtenção dos parâmetros de caracterização do modelo do processo, foi verificada a tendência de cada um dos parâmetros gráficos (K , T_d e Z) da curva de reação (Figura 3) e realizado o ajuste de uma equação preditiva em função da perturbação aplicada no processo.

Foram obtidos os parâmetros K , Z e T_d das curvas de resposta à aplicação de 20 perturbações positivas e 20 perturbações negativas das variáveis vazão de produto e vazão de fluido de aquecimento nos processos de aquecimento de ovo integral, gema e clara.

Para a obtenção dos parâmetros gráficos (K , T_d e Z) da curva de reação foi utilizado um programa no software Matlab[®] que através dos dados experimentais ajustou o modelo definido anteriormente para o processo e calculou os parâmetros K , Z e T_d , conforme estabelecido pelo método da curva de reação.

O ajuste do parâmetro K foi realizado na etapa de identificação do comportamento do processo. Para a validação do ajuste foram comparados, ponto a ponto, os valores de K_c e K obtidos pelo software Statistica[®] e Matlab[®] e foram encontradas apenas diferenças inferiores a 0,3%. Desta forma, K será representado pelas equações de K_c presentes nas Tabelas 18, 19 e 20.

O ajuste dos valores de Z e T_d foram feitos pelo software *Table Curve*. Os modelos das equações ajustadas para as perturbações nas vazões do produto e do fluido de aquecimento de cada produto estão apresentados abaixo e os resultados dos ajustes estão mostrados nas Tabelas 24 a 26.

$$Z = \frac{a_3 + b_3 \Delta m_{fq}}{1 + c_3 \Delta m_{fq}} \quad (58)$$

$$T_d = \frac{a_4 + b_4 \Delta m_{fq}}{1 + c_4 \Delta m_{fq}} \quad (59)$$

$$Z = \frac{1}{a_5 + b_5 \Delta m_p} \quad (60)$$

$$T_d = \frac{1}{a_5 + b_5 \Delta m_p} \quad (61)$$

Tabela 24 - Equações de ajuste de T_d e Z em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para ovo integral.

Variáveis	T_d	Z	R^2	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	12,62	130,33	0,997	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	87,11	137,31	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{17,44 + 49,58\Delta m_{fq}}{1 + 3,179\Delta m_{fq}}$	$\frac{158,42 + 457,15\Delta m_{fq}}{1 + 3,219\Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,216 < \Delta m_{fq} < 0,216$
Δm_{fp} (kg/s)	$\frac{1}{0,0751 + 1,042\Delta m_p}$	$\frac{1}{0,0076 + 0,106\Delta m_p}$	0,999	$-0,04 < \Delta m_p < 0,04$

Tabela 25 - Equações de ajuste de T_d e Z em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para gema de ovo.

Variáveis	T_d	Z	R^2	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	12,31	127,18	0,994	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	90,40	139,96	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{17,58 + 31,89\Delta m_{fq}}{1 + 1,94\Delta m_{fq}}$	$\frac{159,58 + 293,99\Delta m_{fq}}{1 + 1,966\Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,357 < \Delta m_{fq} < 0,357$
Δm_{fp} (kg/s)	$\frac{1}{0,0722 + 1,01\Delta m_p}$	$\frac{1}{0,00733 + 0,103\Delta m_p}$	0,999	$-0,04 < \Delta m_p < 0,036$

Tabela 26 - Equações de ajuste de T_d e Z em função das perturbações nas variáveis manipuláveis para clara.

Variáveis	T_d	Z	R^2	Intervalo de aplicação
$\Delta T_{fq_entrada}$ (°C)	14,41	148,91	0,998	-
$\Delta T_{p_entrada}$ (°C)	83,27	139,01	0,997	-
Δm_{fq} (kg/s)	$\frac{18,62 + 88,46\Delta m_{fq}}{1 + 5,94\Delta m_{fq}}$	$\frac{169,27 + 824,11\Delta m_{fq}}{1 + 6,065\Delta m_{fq}}$	0,999	$-0,108 < \Delta m_{fq} < 0,108$
Δm_{fp} (kg/s)	$\frac{1}{0,0757 + 1,045\Delta m_p}$	$\frac{1}{0,00765 + 0,106\Delta m_p}$	0,999	$-0,04 < \Delta m_p < 0,04$

VI.2.1.4 Sintonia do Controlador PID Adaptativo

A obtenção dos parâmetros de sintonia do controlador PID adaptativo foi baseada nas sugestões de sintonia do controlador PID convencional de Ziegler-Nichols (apresentadas na Tabela 2).

Substituindo as equações dos parâmetros gráficos da curva de reação (Tabelas 24 a 26), nas expressões de sintonia do controlador, obtêm-se os parâmetros do controlador PID: K_p , τ_I e τ_D .

Estes parâmetros variam em função da perturbação aplicada nos processos não lineares, adaptando o controlador PID a cada estado de processo.

Abaixo estão apresentadas as funções dos parâmetros de sintonia de um controlador PID adaptativo de uma malha *SISO/Feedback*: $T_{p_saida} \times \Delta m_{fq}$ (equações 62, 63 e 64), cujos parâmetros estão presentes na Tabela 27.

$$K_p = \frac{A_1 (\Delta m_{fq})^3 + B_1 (\Delta m_{fq})^2 + C_1 \Delta m_{fq} + D_1}{E_1 (\Delta m_{fq})^2 + F_1 \Delta m_{fq} + G_1} \quad (62)$$

$$\tau_I = \frac{2(H_1 + I_1 \Delta m_{fq})}{1 + J_1 \Delta m_{fq}} \quad (63)$$

$$\tau_D = \frac{H_1 + I_1 \Delta m_{fq}}{2(1 + J_1 \Delta m_{fq})} \quad (64)$$

Tabela 27 - Coeficientes dos parâmetros de sintonia do controlador PID adaptativo de uma malha *SISO/ Feedback*: ($T_{p_saida} \times \Delta m_{fq}$) para perturbações positivas e negativas de cada produto.

Parâmetros	Ovo + ¹	Ovo - ²	Gema+	Gema-	Clara+	Clara-
A ₁	448,2	-479,6	310,7	-335,4	804,8	-834,1
B ₁	452,4	-474,5	506,5	-534,6	444,1	-455,7
C ₁	152,0	-156,4	275,0	-284,0	81,4	-82,6
D ₁	17,0	-17,2	49,7	-50,3	5,0	-5,0
E ₁	159,6	159,6	62,7	62,7	536,5	536,5
F ₁	105,7	105,7	66,5	66,5	201,4	201,4
G ₁	17,4	17,4	17,6	17,6	18,6	18,6
H ₁	17,4	17,4	17,6	17,6	18,6	18,6
I ₁	49,6	49,6	31,9	31,9	88,5	88,5
J ₁	3,2	3,2	1,9	1,9	5,9	5,9

¹ O índice "+" se refere à faixa positiva da perturbação.

² O índice "-" se refere à faixa negativa da perturbação.

Abaixo estão apresentadas as funções dos parâmetros de sintonia de um controlador PID adaptativo de uma malha *SISO/ Feedback*: $T_{p_saida} \times \Delta m_p$ (equações 65, 66 e 67), cujos parâmetros estão mostrados na Tabela 28.

$$K_p = \frac{A_2(\Delta m_p)^2 + B_2\Delta m_p + C_2}{D_2\Delta m_p + E_2} \quad (65)$$

$$\tau_I = \frac{2}{F_2 + G_2\Delta m_p} \quad (66)$$

$$\tau_D = \frac{1}{2(F_2 + G_2 \Delta m_p)} \quad (67)$$

Tabela 28 - Coeficientes dos parâmetros de sintonia do controlador PID adaptativo de uma malha SISO/ Feedback: ($T_{p_saida} \times \Delta m_p$) para perturbações positivas e negativas de cada produto.

Parâmetros	Ovo + ¹	Ovo - ²	Gema+	Gema-	Clara+	Clara-
A ₂	-0,0286	0,0294	-0,0290	0,0290	0,0000	0,0002
B ₂	0,0014	-0,0014	0,0014	-0,0014	-0,0002	0,0021
C ₂	0,0003	-0,0003	0,0003	-0,0003	-0,0002	0,0002
D ₂	0,1060	0,1060	0,1030	0,1030	0,1060	0,1060
E ₂	0,0076	0,0076	0,0073	0,0073	0,0077	0,0077
F ₂	0,0751	0,0751	0,0722	0,0722	0,0757	0,0757
G ₂	1,0420	1,0420	1,0100	1,0100	0,0077	0,0077

¹ O índice "+" se refere à faixa positiva da perturbação.

² O índice "-" se refere à faixa negativa da perturbação.

Desta forma, para cada perturbação individual aplicada no sistema ou correção da variável manipulada, os parâmetros do controlador são recalculados de acordo com as expressões obtidas e o controle se adapta a nova situação.

VI.2.2 Planejamento Fatorial Composto Central (PFCC)

O PFCC foi proposto com o objetivo de avaliar o comportamento do processo sob perturbações simultâneas através da temperatura de saída do produto e dos parâmetros de caracterização da dinâmica do processo.

VI.2.2.1 Caracterização da dinâmica do processo sob perturbações simultâneas

Conforme apresentado no item V.2.2.4, a caracterização da dinâmica do processo sob perturbação simultânea foi baseada na teoria de caracterização da dinâmica do processo para perturbações individuais de sistemas lineares.

Os comportamentos da temperatura de saída de produto e os parâmetros K^* e τ^* foram avaliados através do PFCC, onde foram testados modelos empíricos destes parâmetros em função das variáveis independentes, conforme proposto na Tabela 8 e 11.

As curvas de reação obtidas pelos ensaios do PFCC foram ajustadas pelo modelo de comportamento de processo de segunda ordem com $\zeta=0,95$. Os coeficientes de correlação dos ajustes do modelo de segunda ordem foram obtidos para cada ensaio determinado pelos PFCCs.

A Figura 21 ilustra o ajuste do 5º ensaio do PFCC da gema de ovo para avaliação da influência da temperatura de entrada dos fluidos ($R^2=0,976$ ver Tabela 47), que apresentou o menor coeficiente de correlação encontrado entre os ajustes de todos os outros ensaios dos PFCCs. Os coeficientes de correlação obtidos para cada ajuste de cada ensaio dos PFCCs se encontram no Anexo II.

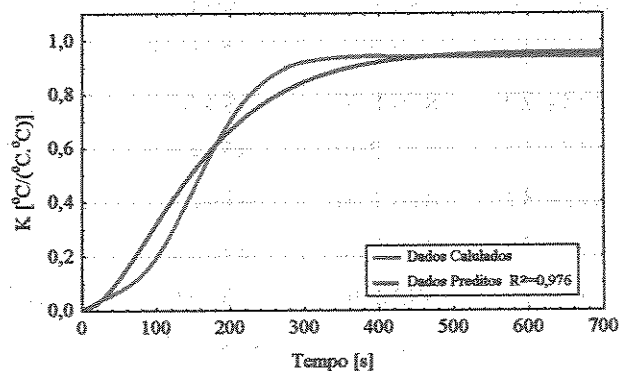


Figura 21 – Ajuste da curva de reação obtida do 5º ensaio do PFCC para avaliação da influência das temperaturas de entrada.

Os parâmetros K^* obtidos para cada ensaio dos PFCCs realizados estão apresentados nas Tabelas 29 a 31, conforme proposições das Tabela 8 e Tabela 11.

Tabela 29 - Respostas do ganho multivariável obtidas dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das variáveis perturbação da temperatura de entrada do produto ($\Delta T_{p_entrada}$), perturbação na temperatura de entrada do fluido de aquecimento ($\Delta T_{fl_entrada}$), perturbação na vazão do produto (Δm_p) e perturbação na vazão do fluido de aquecimento (Δm_{fl}) sobre K^* .

Ensaio	PFCC_Ovo + ¹	PFCC_Ovo - ²	PFCC_ Gema+	PFCC_ Gema-	PFCC_ Clara+	PFCC_ Clara-
1	7239,40	-1771,39	3818,50	-850,70	7467,50	-4860,70
2	3008,20	-2904,24	1593,40	-1644,0	26419,4	-7212,90
3	10929,1	-897,190	5625,60	-447,30	12911,4	-2374,90
4	4878,90	-1,59000	2463,20	-915,40	7945,30	-3879,20
5	3524,10	-3950,85	1887,20	-1813,7	3435,70	-1128,70
6	1433,60	-5961,66	776,400	-3276,4	1334,00	-15408,1
7	5796,90	-2044,14	3067,10	-987,50	6180,70	-5577,30
8	2474,30	-3438,87	1301,10	-1939,7	8342,90	-8607,40
9	3612,40	-3643,46	19169,7	-1704,5	3595,30	-10160,8
10	199,500	-5605,59	789,400	-3138,7	14123,1	-13965,8
11	5935,30	-1876,20	3099,30	-919,20	6501,70	-5019,60
12	2535,50	-3195,68	1317,20	-1826,1	3861,90	-7782,20
13	1713,90	-7995,54	920,700	-3531,0	1630,20	-23376,3
14	686,700	-10984,9	375,300	-5901,2	6836,00	-28801,2
15	2984,10	-4227,26	1589,20	-1993,1	3035,70	-11710,6
16	1237,90	-6725,09	662,000	-3751,9	62860,9	-16914,7
17	25685,9	-2284,29	8763,20	-984,50	2922,40	-1779,50
18	1158,60	-13710,0	611,200	-8534,4	3483,70	-167260
19	1495,70	-8718,82	816,100	-4292,8	17622,4	-24089,0
20	6985,20	-1577,74	3615,50	-843,60	28519,0	-4000,10
21	113689	-1424,99	5922,40	-762,80	3026,50	-3603,30
22	1303,10	-13814,9	710,900	-6870,7	19560,4	-37881,5
23	8574,5	-1478,98	4530,90	-780,80	2927,80	-3830,00
24	1295,00	-9787,09	700,800	-4962,6	4589,80	-26042,3
25	2022,10	-2309,98	1083,20	-1199,0	7467,50	-6051,70

Tabela 30 - Resposta do ganho multivariável obtidas dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das variáveis perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento ($\Delta T_{p, entrada}$ e $\Delta T_{f, entrada}$) sobre o parâmetro K [$^{\circ}\text{C}/(^{\circ}\text{C} \cdot ^{\circ}\text{C})$].

Ensaio	PFCC_ Ovo + ¹	PFCC_ Ovo - ²	PFCC_ Gema+	PFCC_ Gema-	PFCC_ Clara+	PFCC_ Clara-
1	0,73	-0,24	0,72	-0,23	0,75	-0,24
2	0,47	-0,49	0,48	-0,48	0,46	-0,52
3	0,49	-0,47	0,49	-0,47	0,53	-0,46
4	0,24	-0,73	0,23	-0,72	0,24	-0,75
5	0,99	-0,28	0,96	-0,28	1,06	-0,28
6	0,28	-0,98	0,28	-0,95	0,28	-1,06
7	0,75	-0,28	0,75	-0,27	0,73	-0,29
8	0,28	-0,75	0,27	-0,75	0,29	-0,73
9	0,35	-0,35	0,35	-0,35	0,36	-0,36

¹ O índice “+” se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice “-” se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

Tabela 31 - Respostas do ganho multivariável dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas vazões produto e fluido de aquecimento (Δm_p e Δm_f), sobre o parâmetro K [$^{\circ}\text{C}/(\text{kg/s} \cdot \text{kg/s})$].

Ensaio	PFCC_ Ovo + ¹	PFCC_ Ovo - ²	PFCC_ Gema+	PFCC_ Gema-	PFCC_ Clara+	PFCC_ Clara-
1	11784,5	-12061,1	6553,32	-4397,22	27576,4	-38934,2
2	2964,85	-14979,0	1711,22	-7444,61	7602,38	-40237,5
3	14269,4	-4708,92	7279,60	-2112,37	37504,6	-20700,7
4	5084,00	-10716,5	2435,97	-5863,08	15616,1	-38778,3
5	56125,4	-7073,87	19622,5	-2675,47	147833	-21427,1
6	3016,56	-51433,3	1632,06	-1802,98	8346,14	-134904
7	4438,51	-18264,4	2622,79	-7090,67	10778,9	-60477,1
8	11080,4	-4776,73	4884,44	-2552,53	35710,3	-12476,1
9	4972,08	-6177,18	2770,90	-3049,52	12951,2	-17344,9

¹ O índice “+” se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice “-” se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

As estimativas dos efeitos e interações das variáveis independentes sobre o ganho multivariável K^* para cada PFCC realizado para perturbações com tendências positivas e negativas para cada produto, estão apresentados no Anexo III.

Nas Tabelas 32 e 33 são apresentados os valores dos coeficientes de correlação (R^2) e do teste F obtidos da análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis independentes sobre o ganho multivariável K^* para cada PFCC realizado.

Apenas os termos estatisticamente significativos foram considerados na realização da Análise de Variância (ANOVA). Em alguns PFCCs não houve graus de liberdade suficientes para a realização da análise de variância, nestes casos, os campos dos parâmetros R^2 , teste F e F_{tabelado} encontram-se incompletos nas tabelas.

As tabelas com os cálculos dos parâmetros da ANOVA se encontram no Anexo IV.

Tabela 32 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com 25 ensaios com variáveis independentes Δm_{fp} , Δm_{pp} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$, e variável dependente ganho multivariável K^* , a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
R^2	-	0,73	0,39	0,60	-	-
Teste F	-	6,16	3,50	4,81	-	-
F_{tabelado}	-	$F_{0,95;3;21} = 3,07$	$F_{0,95;1;23} = 4,28$	$F_{0,95;2;22} = 3,44$	-	-

Tabela 33 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com 9 ensaios com variáveis independentes $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$, e variável dependente ganho multivariável K^* , a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo +	PFCC Ovo -	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
R^2	-	-	0,83	0,83	-	-
Teste F	-	-	6,27	6,30	-	-
F_{tabelado}	-	-	$F_{0,95;1;7} = 5,59$	$F_{0,95;1;7} = 5,59$	-	-

Para os PFCCs com 9 ensaios realizados para a análise da influência das variáveis independentes Δm_p e Δm_{fq} sobre o ganho multivariável não foi possível gerar a ANOVA para nenhum dos produtos, pois não havia parâmetros significativos a 95% de nível de confiança para a análise.

Analisando-se a Tabela 32 e a Tabela 33 verifica-se que os coeficientes de correlação obtidos na ANOVA não foram satisfatórios a 95% de nível de confiança, o que não permitiu a obtenção do modelo que correlaciona o ganho multivariável K^* com as variáveis independentes analisadas.

Os parâmetros τ^* obtidos para cada ensaio dos PFCCs realizados estão apresentados nas Tabelas 34 a 36, conforme proposições das Tabelas 8 e 11.

Tabela 34 - Respostas das constantes de tempo multivariável obtidas dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada e vazões do produto e fluido de aquecimento sobre o parâmetro τ^* .

Ensaio	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
1	62,47	67,41	64,37	66,17	64,01786	74,56
2	62,04	63,94	64,09	64,57	63,28	67,96
3	62,92	61,88	64,65	60,58	65,00	68,43
4	61,72	57,94	63,85	58,58	63,07	61,24
5	60,88	68,32	62,19	68,22	63,30	74,69
6	60,41	66,52	61,92	68,35	62,36	69,18
7	59,99	62,30	60,82	61,71	63,33	68,30
8	59,11	59,20	60,31	60,58	61,56	61,59
9	68,41	64,17	70,91	61,65	69,47	72,32
10	67,20	58,62	70,12	58,29	67,60	63,50
11	70,15	59,04	72,83	56,81	71,22	66,31
12	67,86	53,62	71,27	53,67	67,89	57,37
13	66,09	64,84	67,91	63,24	68,12	72,30
14	65,01	60,54	67,24	61,26	66,27	64,19
15	66,30	59,24	67,93	57,59	68,82	66,04
16	64,56	54,38	66,83	55,08	65,91	57,28
17	65,23	68,84	66,72	64,72	67,65	60,74
18	62,93	58,35	65,25	59,48	63,92	78,56
19	64,79	67,72	66,90	67,97	66,15	73,18
20	65,15	55,71	67,32	55,63	66,87	60,03
21	66,87	59,75	69,93	58,96	67,18	65,41
22	61,77	61,83	63,16	62,87	64,24	65,71
23	57,25	64,16	58,16	64,90	60,17	68,33
24	68,70	55,78	71,38	54,36	70,29	61,75
25	63,84	60,65	65,82	60,58	65,99	65,55

¹ O índice "+" se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

Tabela 35 - Resposta das constantes de tempo multivariável obtidas para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento sobre o parâmetro τ^* .

Ensaio	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
1	71,56	68,98	72,19	69,23	76,40	74,34
2	59,85	80,79	59,18	82,80	66,52	83,43
3	80,87	59,92	82,90	59,22	83,48	66,62
4	68,98	71,55	69,28	72,19	74,28	76,39
5	83,60	63,90	86,08	63,59	85,46	70,10
6	63,84	83,54	63,56	86,02	70,00	85,41
7	59,68	74,73	58,99	75,76	66,39	78,87
8	74,78	59,72	75,87	59,03	78,89	66,43
9	69,60	69,60	69,98	69,95	74,79	74,83

¹ O índice "+" se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

Tabela 36 - Respostas das constantes de tempo multivariável obtidas para estudo do efeito das perturbações nas vazões do produto e fluido de aquecimento sobre o parâmetro τ^* .

Ensaio	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
1	58,17	64,22	60,19	59,70	58,87	74,02
2	59,20	52,74	60,81	53,09	60,53	56,12
3	54,91	55,99	55,91	52,14	57,25	64,38
4	56,73	46,60	57,47	47,70	58,97	48,13
5	55,02	63,70	57,23	57,07	55,04	74,64
6	57,50	47,24	58,71	49,10	59,20	47,38
7	59,88	60,72	61,71	58,97	61,02	67,43
8	57,09	49,16	57,52	48,49	59,96	53,64
9	57,06	53,39	58,30	52,18	58,95	58,90

¹ O índice "+" se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

A estimativa dos efeitos e interações das variáveis independentes sobre a constante de tempo multivariável τ^* para cada PFCC realizado se encontram no Anexo V.

As Tabelas 37 a 39 apresentam os valores de coeficientes de correlação (R^2) e do teste F obtidos da análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis independentes sobre o parâmetro τ^* para cada PFCC realizado.

Apenas os termos estatisticamente significativos foram considerados na realização da Análise de Variância (ANOVA). Em alguns PFCCs não houve graus de liberdade suficientes para a realização da análise de variância, nestes casos, os campos dos parâmetros R^2 , teste F e F_{tabelado} encontram-se incompletos nas tabelas.

As tabelas com os cálculos dos parâmetros da ANOVA se encontram no Anexo VI.

Na Tabela 37 e na Tabela 38 verifica-se que para todos os PFCCs em que foi possível realizar a ANOVA, os coeficientes de correlação obtidos e o teste F são satisfatórios a 95% de confiança, permitindo a obtenção do modelo que descreve o comportamento de τ^* em função das variáveis analisadas.

Tabela 37 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_{fp} , Δm_p , $\Delta T_{ft_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ e variável dependente a constante de tempo multivariável, τ^* , a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
R^2	0,999	0,985	0,999	0,996	0,999	-
Teste F	63,25	71,78	17,91	54,69	56,65	-
F_{tabelado}	$F_{0,95;11;13}=2,63$	$F_{0,95;6;18}=2,66$	$F_{0,95;10;14}=2,60$	$F_{0,95;10;14}=2,60$	$F_{0,95;11;13}=2,63$	-

Tabela 38 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes $\Delta T_{ft_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ e variável dependente a constante de tempo multivariável, τ^* , a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC_ Gema+	PFCC_ Gema-	PFCC_ Clara+	PFCC_ Clara-
R^2	0,920	0,919	0,985	0,986	0,924	0,922
Teste F	14,33	14,13	14,02	44,66	15,13	14,82
F_{tabelado}	$F_{0,95;1;7}=5,59$	$F_{0,95;1;7}=5,59$	$F_{0,95;1;7}=5,59$	$F_{0,95;2;6}=4,75$	$F_{0,95;1;7}=5,59$	$F_{0,95;1;7}=5,59$

Na Tabela 39 verifica-se que apenas para os PFCCs do ovo e clara com tendência negativa da temperatura de saída do produto, os coeficientes de correlação obtidos e o teste F são satisfatórios a 95% de nível de confiança, permitindo a obtenção do modelo que descreve o comportamento de τ^* em função das variáveis analisadas.

Tabela 39 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_{fq} e Δm_p , e variável dependente a constante de tempo multivariável, τ^* , a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC_ Gema+	PFCC_ Gema-	PFCC_ Clara+	PFCC_ Clara-
R ²	0,748	0,986	0,878	0,878	-	0,992
Teste F	3,708	85,84	9,037	44,66	-	151,82
F _{tabelado}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}	-	F _{0,95;1;7=5,59}

As equações 68 a 80 apresentam os modelos codificados obtidos, considerados válidos pelas análises estatísticas realizadas.

No modelo codificado, as variáveis independentes estão codificadas para os níveis inferior (-1) e superior (+1) estabelecidos.

Modelos obtidos pelos PFCCs com 25 ensaios para avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis ($\Delta T_{fq_entrada}$, $\Delta T_{p_entrada}$, Δm_{fq} e Δm_p) sobre o parâmetro τ^ :*

$$\begin{aligned} \tau^*_{ovo+saída} = & 63,84 - 0,057 \Delta m_{fq} - 1,28 \Delta T_{fq_entrada} + 2,87 \Delta T_{p_entrada} + 0,12 (\Delta T_{fq_entrada})^2 + \\ & + 0,28 (\Delta m_p)^2 - 0,21 (\Delta T_{p_entrada})^2 - 0,18 \Delta m_{fq} \Delta m_p + 0,06 \Delta m_{fq} \Delta T_{fq_entrada} + \\ & - 0,31 \Delta m_p \Delta T_{fq_entrada} + 0,26 \Delta m_p \Delta T_{p_entrada} - 0,18 \Delta T_{p_entrada} \Delta T_{fq_entrada} - 0,21 \Delta m_{fq} \Delta T_{p_entrada} \end{aligned} \quad (68)$$

$$\begin{aligned} \tau^*_{ovo-saída} = & 60,65 - 2,226 \Delta m_{fq} - 2,949 \Delta T_{fq_entrada} - 2,077 \Delta T_{p_entrada} + 0,537 \Delta T_{fq_entrada} + \\ & + 0,712 (\Delta m_{fq})^2 + 0,270 \Delta m_{fq} \Delta T_{fq_entrada} - 0,488 \Delta m_{fq} \Delta T_{p_entrada} \end{aligned} \quad (69)$$

$$\begin{aligned}\tau^*_{\text{gema+}_\text{saida}} = & 65,82 - 0,371\Delta m_{fq} - 1,687\Delta T_{fq_entrada} + 3,303\Delta T_{p_entrada} + 0,176(\Delta T_{fq_entrada})^2 + \\ & + 0,024(\Delta m_p)^2 - 0,268(\Delta T_{p_entrada})^2 - 0,122\Delta m_{fq}\Delta m_p - 0,142\Delta m_{fq}\Delta T_{p_entrada} + \\ & - 0,405\Delta m_p\Delta T_{fq_entrada} + 0,353\Delta m_p\Delta T_{p_entrada} - 0,220\Delta T_{p_entrada}\Delta T_{fq_entrada}\end{aligned}\quad (70)$$

$$\begin{aligned}\tau^*_{\text{gema-}_\text{saida}} = & 60,58 - 1,086\Delta m_{fq} - 2,993\Delta m_p + 0,979\Delta T_{fq_entrada} - 2,593\Delta T_{p_entrada} + \\ & + 0,367(\Delta m_{fq})^2 + 0,292(\Delta m_p)^2 - 0,252(\Delta T_{p_entrada})^2 + 0,288\Delta m_{fq}\Delta T_{fq_entrada} + \\ & - 0,400\Delta m_{fq}\Delta T_{p_entrada} - 0,317\Delta m_p\Delta T_{fq_entrada} + 0,284\Delta m_p\Delta T_{p_entrada}\end{aligned}\quad (71)$$

$$\begin{aligned}\tau^*_{\text{clara+}_\text{saida}} = & 65,99 - 0,949\Delta m_{fq} + 0,159\Delta m_p - 0,739\Delta T_{fq_entrada} + 2,484\Delta T_{p_entrada} + 0,110(\Delta m_p)^2 \\ & - 0,209(\Delta T_{p_entrada})^2 - 0,089(\Delta T_{fq_entrada})^2 - 0,284\Delta m_{fq}\Delta m_p - 0,286\Delta m_{fq}\Delta T_{p_entrada} \\ & - 0,203\Delta m_p\Delta T_{fq_entrada} + 0,148\Delta m_p\Delta T_{p_entrada} - 0,139\Delta T_{p_entrada}\Delta T_{fq_entrada}\end{aligned}\quad (72)$$

Modelos obtidos pelos PFCCs com 9 ensaios para avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos sobre o parâmetro τ^ :*

$$\tau^*_{\text{ovo+}} = 69,60 - 12,90\Delta T_{fq_entrada} + 9,965\Delta T_{p_entrada} \quad (73)$$

$$\tau^*_{\text{ovo-}} = 69,60 + 6,409\Delta T_{fq_entrada} + 1,238\Delta T_{p_entrada} \quad (74)$$

$$\tau^*_{\text{gema}} = 69,99 - 7,321\Delta T_{fq_entrada} + 5,595\Delta T_{p_entrada} \quad (75)$$

$$\tau^*_{\text{gema-}} = 69,95 + 7,292\Delta T_{fq_entrada} - 5,542\Delta T_{p_entrada} + 2,379(\Delta T_{fq_entrada})^2 \quad (76)$$

$$\tau^*_{\text{clara+}} = 74,80 - 5,124\Delta T_{fq_entrada} + 4,069\Delta T_{p_entrada} \quad (77)$$

$$\tau^*_{\text{clara-}} = 74,83 - 5,071\Delta T_{fq_entrada} + 4,050\Delta T_{p_entrada} \quad (78)$$

Modelos obtidos pelos PFCCs com 9 ensaios para avaliação da influência das vazões de entrada dos fluidos sobre o parâmetro τ^ :*

$$\tau_{ovo-}^* = 53,40 - 5,527\Delta m_{fq} - 3,845\Delta m_p \quad (79)$$

$$\tau_{clara-}^* = 58,91 - 9,101\Delta m_{fq} - 4,648\Delta m_p \quad (80)$$

Embora as correlações do parâmetro τ^* sejam preditivas para alguns PFCCs, ele não poderá ser utilizada na composição do modelo da dinâmica do processo multivariável, pois o parâmetro K^* não é estatisticamente válido e são necessários os dois parâmetros (K^* e τ^*) para definição do modelo.

Desta forma, o esforço de correlacionar o comportamento dinâmico do processo através do modelo multivariável que o caracteriza não obteve sucesso. Porém a tentativa mostrou-se especulativa, havendo necessidades de aperfeiçoamento nas correlações dos parâmetros de identificação do modelo de segunda ordem proposto, às perturbações simultâneas aplicadas ao sistema.

VI.2.2.2 Obtenção das correlações multivariáveis de predição da temperatura de saída do produto.

As temperaturas de saída do produto do TCP no regime permanente após a aplicação das perturbações simultâneas para cada PFCC realizado estão apresentadas nas Tabelas 40 a 42. Observa-se que os PFCCs utilizados são os mesmos que obteve-se os resultados do parâmetro K^* apresentados nas Tabelas 34 a 36, respectivamente.

Tabela 40 - Resposta da temperatura de saída do produto no regime permanente dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada e vazões do produto e fluido de aquecimento.

Ensaio	PFCC_Ovo + ¹	PFCC_Ovo - ²	PFCC_ Gema+	PFCC_ Gema-	PFCC_ Clara+	PFCC_ Clara-
1	64,35	52,48	65,12	55,34	62,73	46,56
2	64,98	55,25	65,46	56,82	59,94	51,16
3	62,82	51,10	63,64	54,02	61,14	45,13
4	63,46	53,91	63,99	55,53	62,46	49,75
5	65,30	53,30	66,07	56,20	63,65	47,28
6	65,93	56,11	66,41	57,70	60,82	51,96
7	63,74	51,90	64,56	54,86	62,04	45,83
8	64,39	54,74	64,92	56,39	62,33	50,53
9	65,05	53,37	65,79	56,15	63,47	47,59
10	65,66	56,07	66,12	57,60	60,75	52,08
11	63,56	52,02	64,35	54,86	61,92	46,20
12	64,18	54,75	64,69	56,33	63,23	50,70
13	66,00	54,18	66,74	57,00	64,39	48,32
14	66,61	56,93	67,08	58,47	61,63	52,88
15	64,47	52,81	65,27	55,69	62,82	46,90
16	65,11	55,59	65,62	57,19	60,74	51,48
17	63,95	49,41	64,94	53,82	63,19	52,59
18	65,26	56,14	65,65	57,40	63,88	41,91
19	66,32	55,74	66,89	57,76	60,69	50,96
20	63,28	53,03	63,95	55,16	61,33	48,13
21	63,81	53,51	64,43	55,56	63,13	48,73
22	65,68	55,17	66,31	57,27	61,16	50,25
23	64,04	53,48	64,68	55,62	62,70	48,51
24	65,46	55,20	66,06	57,22	61,93	50,47
25	64,75	54,34	65,37	56,42	62,73	49,49

¹ O índice "+" se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

Tabela 41 - Resposta da temperatura de saída do produto no regime permanente dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento.

Ensaio	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
1	61,30	56,01	62,37	57,15	57,93	52,55
2	62,96	57,68	64,05	58,84	59,50	54,12
3	62,38	57,09	63,41	58,18	59,13	53,75
4	64,04	58,76	65,08	59,87	60,70	55,32
5	61,48	56,20	62,53	57,31	58,20	52,81
6	63,86	58,58	64,92	59,71	60,43	55,06
7	61,90	56,62	62,99	57,78	58,46	53,08
8	63,44	58,16	64,47	59,25	60,17	54,79
9	62,67	57,39	63,73	58,51	59,31	53,94

¹ O índice "+" se refere ao planeamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planeamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

Tabela 42 - Resposta da temperatura de saída do produto no regime permanente dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas vazões de entrada do produto e fluido de aquecimento.

Ensaio	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
1	63,72	54,89	64,54	58,38	60,78	48,36
2	64,61	58,74	64,98	60,05	62,46	54,96
3	61,26	52,75	62,16	56,35	58,18	46,17
4	62,19	56,67	62,63	58,06	59,93	52,80
5	62,20	51,84	63,20	56,62	58,95	44,21
6	63,52	58,04	63,86	59,20	61,42	54,51
7	64,77	57,89	65,31	59,87	62,32	53,12
8	61,33	54,93	61,98	57,04	58,69	50,03
9	63,00	56,34	63,60	58,39	60,45	51,49

¹ O índice "+" se refere ao planeamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planeamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

A estimativa dos efeitos e interações das variáveis independentes sobre a temperatura de saída do produto no regime permanente $T_{p_saída}$ para cada PFCC realizado está apresentada no Anexo VII.

As Tabelas 43 a 45 apresentam os valores de coeficientes de correlação (R^2) e do teste F obtidos da análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis independentes sobre a temperatura de saída do produto no TCP no regime permanente. Apenas os termos estatisticamente significativos foram considerados na ANOVA. As tabelas com os parâmetros e cálculos da ANOVA se encontram no Anexo VIII.

Em alguns PFCC, não houve graus de liberdade suficientes para a realização da análise de variância, nestes casos, os campos dos parâmetros R^2 , teste T e F_{tabelado} , encontram-se incompletos nas tabelas.

Tabela 43 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_{fp} , Δm_p , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ e variável dependente temperatura final do produto ($T_{p_saída}$), a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
R^2	0,99	0,993	0,633	0,996	0,985	-
Teste F	2073,35	258,77	9,43	460,35	115,50	-
F_{tabelado}	$F_{0,95;3;21}=2,61$	$F_{0,95;4;20}=2,87$	$F_{0,95;1;23}=4,28$	$F_{0,95;4;20}=2,87$	$F_{0,95;4;20}=2,87$	-

Verifica-se que para os PFCCs realizados para o ovo e clara na tendência positiva e para o ovo e gema na tendência negativa da temperatura de saída do produto, os coeficientes de correlação obtidos (R^2) e o teste F são satisfatórios a 95% de nível de confiança, permitindo a obtenção do modelo que descreve a resposta em função das variáveis analisadas.

Já para o PFCC realizado para a gema com tendência positiva da temperatura da saída do produto, o coeficiente de correlação não foi satisfatório a 95% de confiança, limitando a obtenção do modelo.

Tabela 44 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes $\Delta T_{f_{\text{entrada}}}$ e $\Delta T_{p_{\text{entrada}}}$ e variável dependente temperatura final do produto ($T_{p_{\text{saída}}}$), a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
R ²	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999	0,999
Teste F	29185,5	29225,3	28932,9	27696,4	30348,9	29106,4
F _{tabelado}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}	F _{0,95;1;7=5,59}

Tabela 45 - Parâmetros obtidos pela ANOVA realizada nos PFCCs com variáveis independentes Δm_f e Δm_p e variável dependente temperatura final do produto ($T_{p_{\text{saída}}}$), a 95% de nível de confiança.

Parâmetro	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
R ²	0,999	0,996	0,999	0,998	0,999	0,998
Teste F	3329,28	361,23	460,21	499,90	2763,33	224,89
F _{tabelado}	F _{0,95;2;6=5,14}	F _{0,95;2;6=5,14}	F _{0,95;2;6=5,14}	F _{0,95;2;6=5,14}	F _{0,95;2;6=5,14}	F _{0,95;2;6=5,14}

Verifica-se que para os PFCCs realizados para o ovo integral, gema e clara na tendências positivas e negativas, os coeficientes de correlação obtidos (R²) e o teste F são satisfatórios a 95% de nível de confiança, permitindo a obtenção do modelo que descreve a resposta em função das variáveis analisadas.

As equações 81 a 96 apresentam os modelos codificados obtidos, considerados válidos pelas análises estatísticas realizadas.

No modelo codificado, as variáveis independentes estão codificadas para os níveis inferior (-1) e superior (+1) estabelecidos.

Modelos obtidos pelos PFCCs com 25 ensaios para avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis ($\Delta T_{p_entrada}$, $\Delta T_{fq_entrada}$, Δm_p e Δm_{fq}) sobre a temperatura de saída do produto do TCP:

$$T_{ovo+_saida} = 64,75 + 0,319\Delta m_{fq} - 0,759\Delta m_p + 0,467\Delta T_{fq_entrada} + 0,355\Delta T_{p_entrada} + \\ - 0,035(\Delta m_{fq})^2 + 0,013(\Delta m_p)^2 - 0,007\Delta m_p\Delta T_{fq_entrada} + 0,009\Delta m_p\Delta T_{p_entrada} \quad (81)$$

$$T_{ovo-_saida} = 54,34 + 1,486\Delta m_{fq} - 0,679\Delta m_p - 0,415\Delta T_{fq_entrada} + 0,431\Delta T_{p_entrada} + \\ - 0,379(\Delta m_{fq})^2 \quad (82)$$

$$T_{gema-_saida} = 56,42 + 0,794\Delta m_{fq} - 0,650\Delta m_p + 0,429\Delta T_{fq_entrada} + 0,401\Delta T_{p_entrada} + \\ - 0,195(\Delta m_{fq})^2 \quad (83)$$

$$T_{clara+_saida} = 61,93 + 0,623\Delta m_{fq} - 0,773\Delta m_p + 0,474\Delta T_{fq_entrada} + 0,362\Delta T_{p_entrada} + \\ - 0,773(\Delta m_p)^2 \quad (84)$$

Os modelos propostos descrevem as superfícies de resposta e as curvas de nível que mostram o comportamento da temperatura de saída do produto em relação às variáveis independentes, Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{p_entrada}$ e $\Delta T_{fq_entrada}$; as figuras estão apresentadas no Anexo IX, item A.

Observa-se que as superfícies de resposta apresentam curvatura, devido à presença do termo quadrático no modelo.

Modelos obtidos pelos PFCCs com 9 ensaios para avaliação da influência das variáveis perturbação da temperatura de entrada do produto e do fluido quente ($\Delta T_{p_entrada}$ e $\Delta T_{fq_entrada}$) sobre a temperatura de saída do produto no TCP:

$$T_{ovo+_saida} = 62,67 + 0,835\Delta T_{fq_entrada} + 0,545\Delta T_{p_entrada} \quad (85)$$

$$T_{ovo-_saida} = 57,39 + 0,838\Delta T_{fq_entrada} + 0,543\Delta T_{p_entrada} \quad (86)$$

$$T_{gema+_saida} = 67,73 + 0,844\Delta T_{fq_entrada} + 0,522\Delta T_{p_entrada} \quad (87)$$

$$T_{gema-_saida} = 58,51 + 0,847\Delta T_{fq_entrada} + 0,519\Delta T_{p_entrada} \quad (88)$$

$$T_{clara+_saida} = 59,31 + 0,789\Delta T_{fq_entrada} + 0,605\Delta T_{p_entrada} \quad (89)$$

$$T_{clara-_saida} = 53,94 + 0,791\Delta T_{fq} + 0,604\Delta T_p \quad (90)$$

Os modelos propostos descrevem as superfícies de resposta e as curvas de nível que mostram o comportamento da temperatura de saída do produto em relação às variáveis independentes, $\Delta T_{p_entrada}$ e $\Delta T_{fq_entrada}$; as figuras estão apresentadas no Anexo IX, item B.

Verifica-se que as superfícies de resposta são planas, pois o modelo é constituído apenas de termos lineares.

Modelos obtidos pelos PFCCs com 9 ensaios para avaliação da influência das variáveis perturbação nas vazões do produto e do fluido quente (Δm_p e Δm_{fq}) sobre a temperatura de saída do produto no TCP:

$$T_{ovo+_saida} = 63,00 + 0,462\Delta m_{fq} - 1,220\Delta m_p - 0,074(\Delta m_{fq})^2 \quad (91)$$

$$T_{ovo-_saida} = 56,34 + 2,070\Delta m_{fq} - 1,051\Delta m_p - 0,678(\Delta m_{fq})^2 \quad (92)$$

$$T_{gema+_saida} = 63,60 + 0,232\Delta m_{fq} - 1,182\Delta m_p - 0,034(\Delta m_{fq})^2 + 0,021(\Delta m_p)^2 \quad (93)$$

$$T_{\text{gema-}_\text{saida}} = 58,39 + 0,880\Delta m_{fq} - 1,005\Delta m_p - 0,234(\Delta m_{fq})^2 \quad (94)$$

$$T_{\text{clara+}_\text{saida}} = 60,45 + 0,868\Delta m_{fq} - 1,284\Delta m_p - 0,136(\Delta m_{fq})^2 \quad (95)$$

$$T_{\text{clara-}_\text{saida}} = 51,49 + 3,480\Delta m_{fq} - 1,091\Delta m_p - 1,047(\Delta m_{fq})^2 \quad (96)$$

Os modelos propostos descrevem as superfícies de resposta e as curvas de nível que mostram o comportamento da temperatura de saída do produto em relação às variáveis independentes, Δm_p e Δm_{fq} ; as figuras estão apresentadas no Anexo IX, item C.

Observa-se que as curvas de nível apresentam acentuada curvatura, devido à existência de termos quadráticos no modelo.

VI.2.2.3 Aplicação do Teste da Soma das Respostas entre variáveis distintas

Com a finalidade de avaliar a sinergia das perturbações individuais, quando aplicadas simultaneamente, aplicou-se o teste da soma das respostas entre variáveis distintas.

Conforme proposto no item V.2.2.6 foram obtidas as seguintes respostas do sistema:

R_A – resposta da perturbação individual (I_A) na variável A;

R_B – resposta da perturbação individual (I_B) na variável B;

R_{AB} – resposta das perturbações simultâneas (I_A e I_B) das variáveis A e B;

R_A+R_B - soma das respostas obtidas das perturbações I_A e I_B individualmente.

Os valores das perturbações I_A e I_B estão apresentados na Tabela 140, no Anexo X.

Para analisar esta característica do processo, foram colocados na mesma figura os históricos das respostas da temperatura relativa da saída do produto T^* (equação 55).

As Figuras 22 a 27 apresentam os resultados obtidos na aplicação do teste da soma das repostas entre as variáveis distintas, sobre as temperaturas de saída dos três produtos.

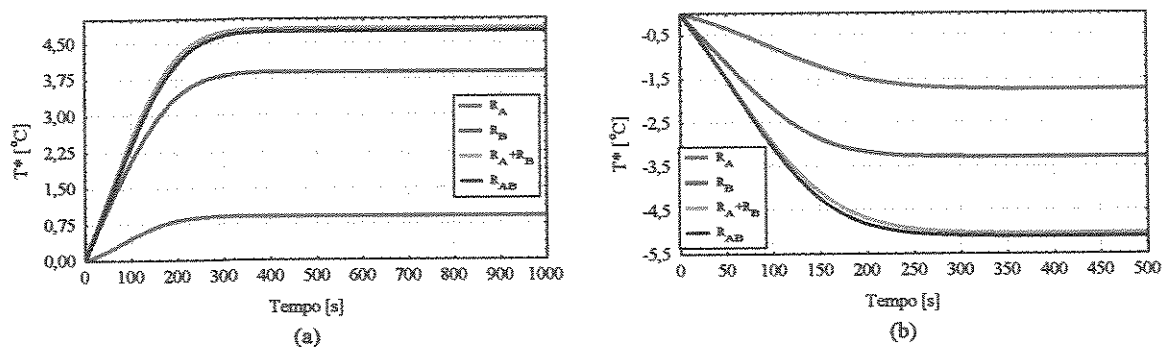


Figura 22 - Teste da soma das respostas para as perturbações das vazões dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída do ovo integral e (b) negativa da temperatura de saída do ovo integral.

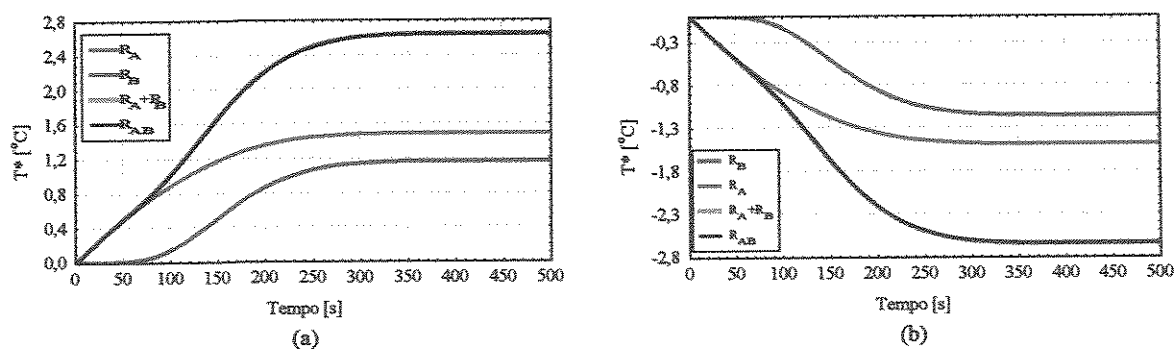


Figura 23 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída do ovo integral e (b) negativa da temperatura de saída do ovo integral.

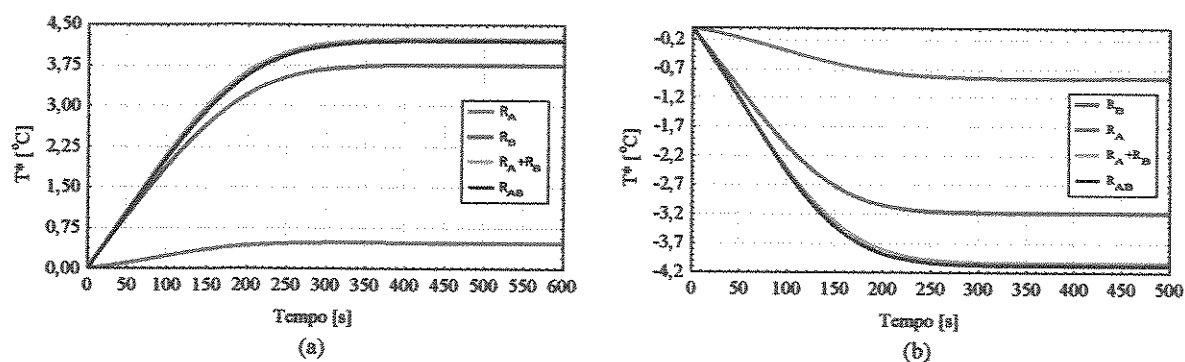


Figura 24 - Teste da soma das respostas para as perturbações das vazões dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da gema e (b) negativa da temperatura de saída da gema.

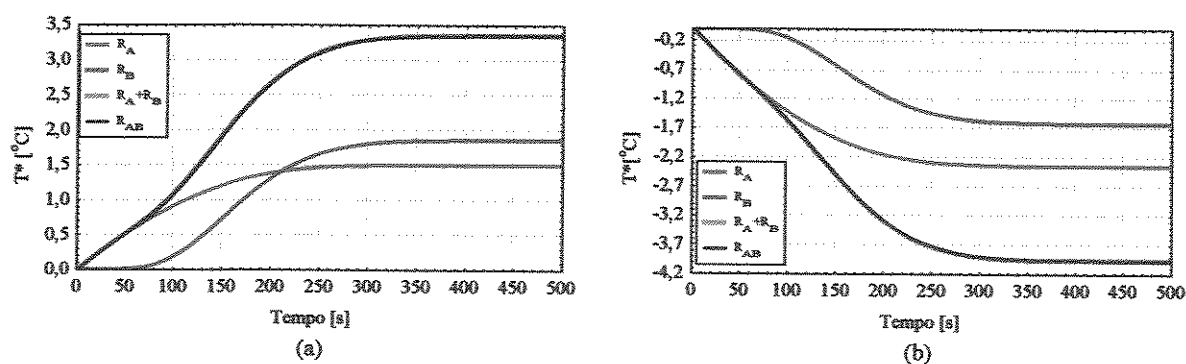


Figura 25 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da gema e (b) negativa da temperatura de saída da gema.

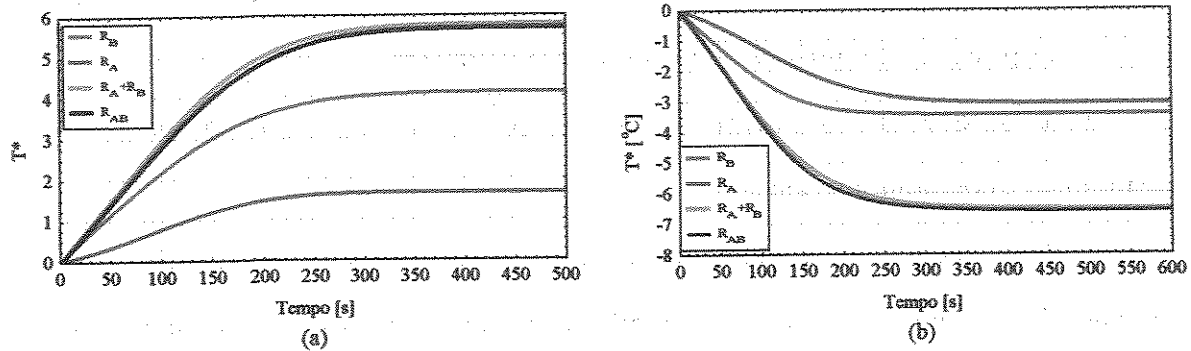


Figura 26 - Teste da soma das respostas para as perturbações das vazões dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da clara e (b) negativa da temperatura de saída da clara.

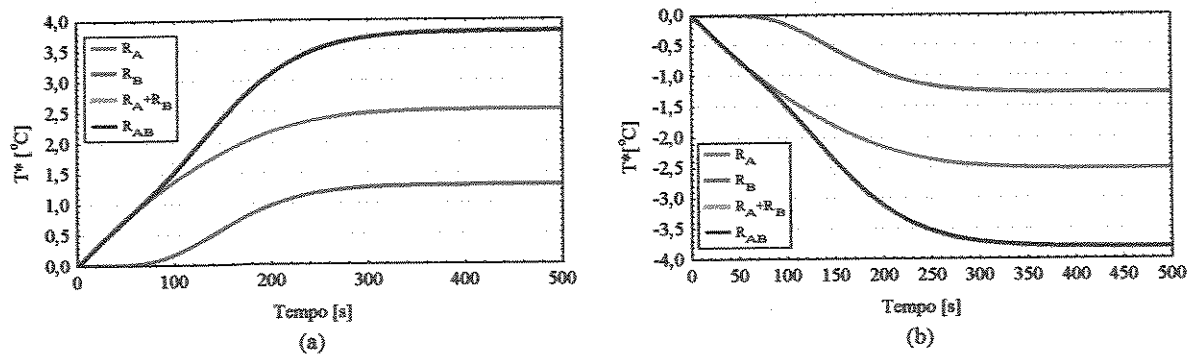


Figura 27 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada dos fluidos com tendência: (a) positiva da temperatura de saída da clara e (b) negativa da temperatura de saída da clara.

Verificou-se que para a perturbação nas temperaturas de entrada dos fluidos, a soma das respostas é idêntica às respostas das perturbações simultâneas.

Para as perturbações na vazão observa-se pequenas diferenças no tempo de subida da curva que podem ser desprezadas, pois as duas curvas alcançam o mesmo valor de temperatura no segundo regime permanente.

Desta forma, o estudo das perturbações simultâneas pode ser simplificado, pois obtendo as respostas das perturbações individuais de cada variável em separado, pode-se reproduzir a resposta sob perturbação simultânea destas variáveis.

Verifica-se que não há sinergia das perturbações individuais, quando aplicadas simultaneamente conforme apresentado.

Nos PFCCs com duas variáveis independentes (9 ensaios), a temperatura de saída do produto (T_{p_saida}) mostrou-se fracamente influenciada pelas interações, conforme visto nos modelos lineares (equações 83 a 88) e quadráticos (equações 89 a 94) obtidos. Devido a esta constatação, pode-se observar a quase nula sinergia nos testes de soma entre variáveis distintas.

O mesmo pode ser verificado aplicando o teste da soma em com quatro variáveis distintas, através das Figuras 28 e 29.

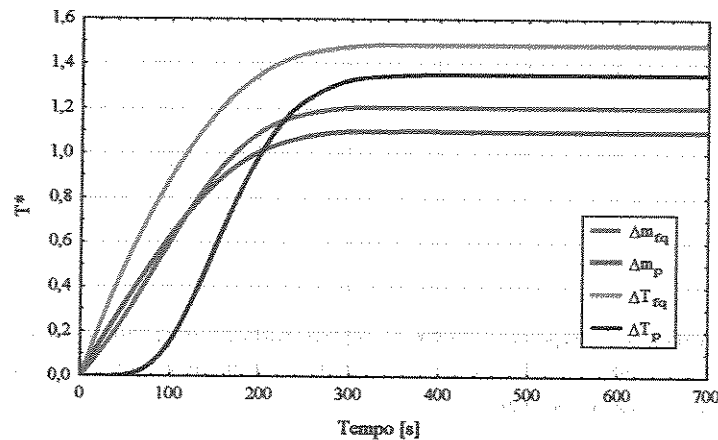


Figura 28 – Curva de resposta do sistema sob perturbações individuais das variáveis Δm_{tq} , Δm_p , $\Delta T_{tq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ (correspondentes ao ensaio 16 do PFCC com 25 ensaios para ovo integral com tendência positiva).

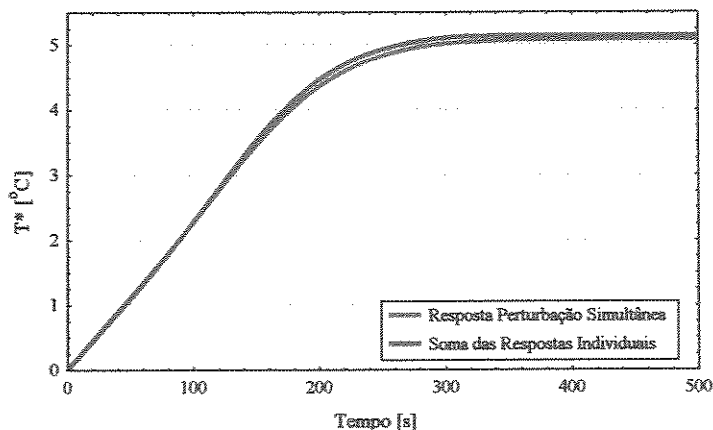


Figura 29 - Teste da soma das respostas para as perturbações das temperaturas de entrada e vazões dos fluidos com tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.

Verifica-se que mesmo ao perturbar mais variáveis simultaneamente a sinergia não se pronuncia intensamente, observando o modelo que prediz a temperatura de saída do ovo obtida pelo PFCC para o ovo com tendência positiva, nota-se que os termos de interação entre as variáveis são pequenos, já que as interações envolvem a perturbação da vazão do produto que apresenta sua faixa de variação com ordem de grandeza inferior às outras variáveis, além disso, pela a Tabela 106 do Anexo VII observa-se que o termo das interações apresentam um valor bem inferior aos termos lineares dos efeitos.

VII CONCLUSÕES

As análises realizadas neste estudo permitiram concluir que o processo de aquecimento de produtos de ovos em TCP apresenta comportamento característico não linear. Por isso, não se recomenda a utilização de controladores convencionais, pois o controle destes sistemas deve considerar as variações resultantes da sua não linearidade.

Sob esta ótica, o controle PID adaptativo se apresenta como uma boa opção, pois incorpora a não linearidade do sistema nos seus parâmetros de sintonia que se ajustam de acordo com as perturbações aplicadas.

Analisando a não linearidade do sistema, verificou-se que para os três produtos testados (ovo integral, gema e clara) é conveniente adotar diferentes funções de predição do ganho estacionário para perturbações positivas e negativas aplicadas às variáveis manipuláveis.

Supondo a utilização da mesma planta de processo para o aquecimento do ovo integral, gema e clara, conclui-se que os parâmetros de controle devem ser re-sintonizados, considerando as características particulares de cada produto.

O estudo do comportamento do sistema em relação às temperaturas de entrada dos dois fluidos (produto e fluido de aquecimento) é de extrema relevância para o projeto de controladores com estratégia *feedforward*.

O estudo do comportamento dinâmico do processo sob perturbações simultâneas mostrou-se complexo, por isso não foi possível obter as correlações de predição dos parâmetros K^* e τ^* em função das perturbações aplicadas para a caracterização do processo.

Nos casos em que não há sinergia entre as variáveis perturbadas, o comportamento dinâmico multivariável pode ser avaliado através da soma das respostas das perturbações

individuais das variáveis distintas. A sinergia pode ser verificada pelos efeitos de interação obtidos pelo PFCC.

VIII SUGESTÕES

A partir dos resultados obtidos neste estudo, propõe-se como sugestão para futuros trabalhos:

- Simular a aplicação do controle PID adaptativo sobre o processo de aquecimento de produtos de ovos, utilizando os parâmetros obtidos neste trabalho e comparar o seu desempenho em relação a um controle PID convencional;
- Realizar a comparação do desempenho do controle PID adaptativo com outros tipos de controles não convencionais como: lógica *Fuzzy* e redes neurais;
- Desenvolver um trabalho experimental com aplicação de controle PID adaptativo;
- Desenvolver um trabalho experimental ou de simulação com aplicação de controle PID adaptativo com estratégia *feedforward*.
- Desenvolver uma melhor correlação para o cálculo do ganho multivariável, que permita a obtenção de um modelo do ganho multivariável em função das diferentes perturbações aplicadas ao sistema e, desta forma, possibilitar a caracterização do comportamento do sistema sob perturbações simultâneas.

IX BIBLIOGRAFIA

AFONSO, I. M.; HES, L.; MAIA, J. M. e MELO, L. F. Heat transfer and rheology of stirred yoghurt during cooling in plate heat exchangers. **Journal of Food Engineering**, v.57, p.179-187, 2003.

APV. **Pasteurized liquid eggs**. Disponível em: <[www.apv.invensys.com/Homogenisers/Products and Process Bulletins/PB-Past%20Liquid%20Egg.pdf](http://www.apv.invensys.com/Homogenisers/Products%20and%20Process%20Bulletins/PB-Past%20Liquid%20Egg.pdf)>. Acesso em: 05 Jul. 2003.

BARBOSA, S. F. **O ovo**. Campinas: Secretaria da Agricultura, s.d. 1-11p. Publicação Interna.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S. e BRUNS, R. E. **Planejamento e otimização de experimentos**. 2.ed. Campinas: Editora da Unicamp, 1996. 299p.

BERTO, M. I. Modelagem matemática e simulação dinâmica de trocadores de calor de placas para o resfriamento de sucos de laranja natural e concentrado. Campinas, 2000. 110p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP.

BOX, G. E.; HUNTER, W. G. e HUNTER, J. S. **Statistics for experiments**. New York: Wiley, 1978. 652p.

BYRNES, C. I. e LINDQUIST, A. **Modelling, identification and robust control**. Amsterdam: Elsevier Science, 1986. 631p.

CHOI, Y. e OKOS, M. R. Effects of temperature and composition on the thermal properties of foods. In: MAGUER, M.; JELEN, P. **Food engineering and process applications**. Canada: Elsevier Applied Science Publisher, 1986. v. I - Transport Phenomena, p.93-101.

COIMBRA, J. S. R.; GABAS, A. L.; MINIM, L. A.; ROJAS, E. E. G. e TELIS-ROMERO, J. Density heat capacity and thermal conductivity of liquid egg products as a function of temperature and water content. **International Journal of Food Properties**, 2003 (no prelo).

COUGHANOWR, D. R. **Process systems analysis and control**. 2nd.ed. New York: McGraw-Hill, 1991. 566p.

DAS, S. K. e ROETZEL, W. Dynamic analysis of plate heat exchangers with dispersion in both fluids. **Int. J. Heat Mass Transfer**, v.38, n.6, p.1127-1140, 1995.

ENVASE asséptico de ovos líquidos. São Paulo: Secretaria da Agricultura. Instituto de tecnologia de alimentos. **Seminário em sistemas UHT produtos e tecnologia** 28 e 29 de setembro de 1994. Campinas, 1994. 1-4p.

EVELEIGH, V. W. **Adaptive control and optimization techniques**. New York: McGraw-Hill, 1967. 434p.

HAMID-SAMIMI, M. H. e SWARTZEL, K. R. Maximum change in physical and quality parameters of fluids foods during continuous flow heating. Application to liquid whole egg. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.8, p.225-239, 1984 a.

HAMID-SAMIMI, M. H.; SWARTZEL, K. R. e BALL JR., H. R. Flow behavior of liquid whole egg during thermal treatments. **Journal of Food Science**, v.49, p.132-136, 1984 b.

IBARZ, A. e SINTES, J. Rheology of egg yolk. **Journal of Texture Studies**, v.20, p.161-167, 1989.

JARBADO, J. M. S. Amônia em sistemas frigoríficos. **Revista Abrava**, v.4, p.17-23, Jan./Fev., 1994.

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

- KUSUNOKI, A. S. **Ovos. Armazenamento de gêneros e produtos alimentícios.** São Paulo: Secretaria da Ind. Com. Ciência e tecnologia, 1983. p.175-200.
- LEULIET, J. C.; MAINGONNAT, J. F. e LALANDE, M. Ecoulements et transferts de chaleur dans les échangeurs à plaques traitant des produits visqueux newtoniens et pseudoplastiques. **The Canadian Journal of Chemical Engineering**, v.68, p.220-229, 1990.
- LEULIET, J. C.; MAINGONNAT, J. F. e LALANDE, M. Etude de la perte de charge dans des échangeurs de chaleur à plaques traitant des produits non-newtoniens. **Revue Générale Thermique**, n.308-309, p.445-450, 1987.
- LIU, G. P. e DALEY, S. Optimal-tuning nonlinear PID control of hydraulic systems. **Control Engineering Practice**, v.8, p.1045-1053, 2000.
- MARTUCCI, E. T. **Produtos desidratados de ovos.** Campinas, 1989. 141p. Tese (Doutor em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP.
- MASUBUCHI, M. e ITO, M. Dynamic analysis of a plate heat exchanger system. **Bulletin of the JSME**, v.20, n.142, p.434-441, April, 1977.
- MATHWORKS INCORPORATION. **Matlab version 6: the language of technical computing.** 5th.ed. Natick, 2001.
- MENDES, A. C. **Análise do processo de extrusão na indústria de "pet foods" para aplicação de técnica de controle avançado.** Campinas, 2003. 338p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, Unicamp.
- MIKLOVICOVA, E.; LATIFI, M. A.; M'SAAD, M. e HEJDA, I. PID adaptive control of temperature in batch and semi-batch chemical reactors. **Chemical Engineering Science**, v.51, n.11, p.3139-3144, 1996.

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

OGUNNAIKE, B. A. e RAY, W. H. **Process dynamics, modeling and control**. New York: Oxford University, 1994. 1260p.

OHATA, S. M. **Comportamento reológico do ovo integral, gema e clara nas formas pasteurizada e reconstituída**. Campinas, 2000. 116p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP.

PANCHAL, C. B. e RABAS, T. J. Thermal performance of advanced heat exchangers for ammonia refrigeration systems. **Heat Transfer Engineering**, v.14, n.4, p.42-57, Out./Dez., 1993.

PAYAWAL, S. R.; LOWIE, B. e STEWART, G. F. Pasteurization of liquid-egg products. **Food Research**, v.11, p.246-260, 1945.

PUNIDADAS, P. e MCKELLAR, R. C. Selected physical properties of liquid egg products at pasteurization temperatures. **Journal of Food Processing and Preservation**, v.23, p.153-168, 1999.

RAO, M. A. e ANANTHESWARAN, R. C. Rheology of fluids in food processing. **Food Technology**, p.116-126, 1982.

SCARIOT, M. R. **Influência reológica de fluidos não newtonianos na caracterização da curva de reação do processo de aquecimento em trocadores de calor a placas**. Campinas, 2002. 143p. Dissertação (Mestre em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP.

SHARIFI, F.; NARANDJI, G. e MEHRAVARAN, K. Dynamic simulation of plate heat exchangers. **International Communication in Heat and Mass Transfer**, v.22, n.2, p.213-225, 1995.

SHAW, I. S. e SIMÕES, M. G. **Controle e modelagem fuzzy**. São Paulo: Edgard Blücher Ltda., 1999. 165p.

STADELMAN, W. J. e WEINHEIM, E. H. **Egg and poultry-meat processing**. London: VCH, 1988. 211p.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical process control**: An introduction to theory and practice. Englewood Cliffs: Prentice-Hall Inc., 1984. 696p.

TELIS, V. R. N. **Estudo das alterações estruturais na gema de ovo durante o congelamento**. Campinas, 1996. 148p. Tese (Doutorado em Engenharia de Alimentos). Faculdade de Engenharia de Alimentos, UNICAMP.

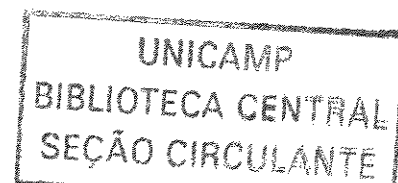
THOMAZ, C. E. P. **Reologia e hidrodinâmica do escoamento de ovo líquido**. São José do Rio Preto, 2002. 101p. Dissertação (Mestre em Engenharia e Ciência de Alimentos). Instituto de Biociências, Letras e Ciências Exatas, UNESP.

UBA. **Tamanho do mercado de ovos**. Disponível em: <www.aveseevos.com.br/tm-ovos.html>. Acesso em: 21 Jul. 2003 a.

UBA. **Ovos pufa**. Disponível em: <www.pufa.com.br/curio-imp.html>. Acesso em: 21 Jul. 2003 b.

WARWICK, K. **Implementation of self-tuning controllers**. London: Peter Peregrinus Ltd., 1988. 311p.

WINTER, A. R.; GRECO, P. A. e STEEWART, G. F. Pasteurization of liquid-egg products. **Food Research**, v.13, p.229-245, 1945.



X ANEXOS

X.1 Anexo I – Valores de K_c e τ obtidos para a gema e clara

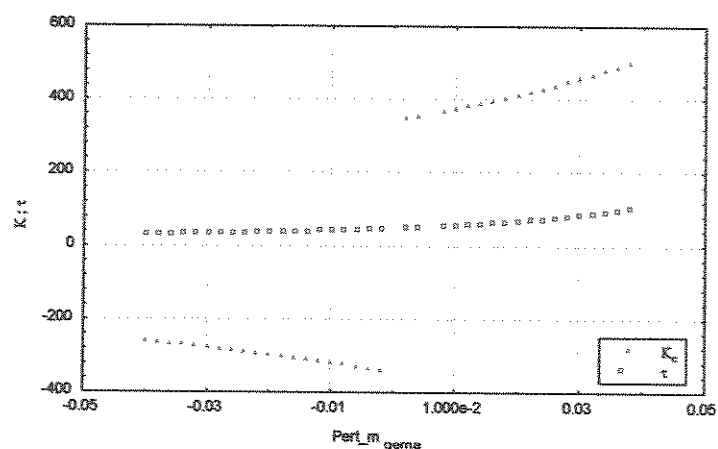


Figura 30 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão da gema.

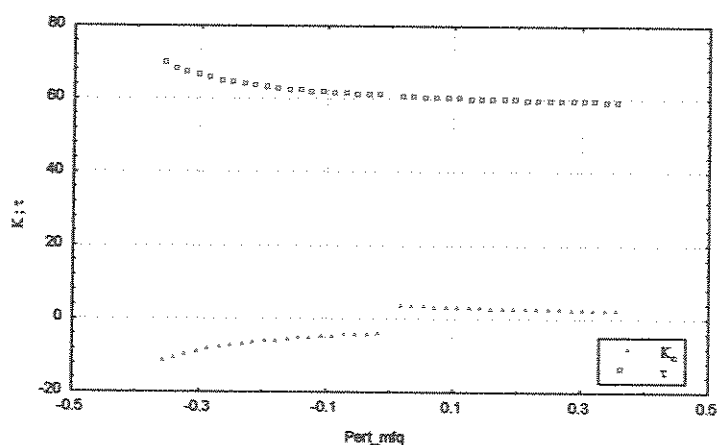


Figura 31 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão de fluido quente para o produto gema.

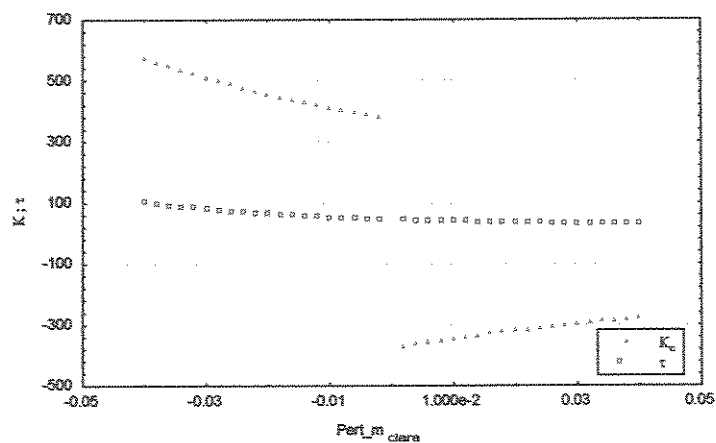


Figura 32 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão da clara.

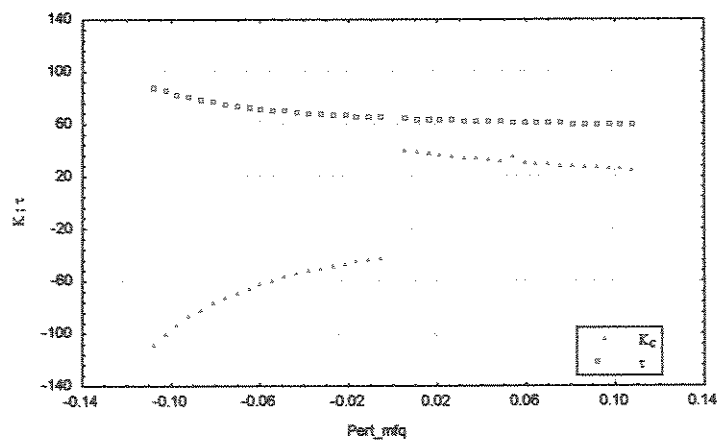


Figura 33 - Valores de K_c e τ referente as perturbações da vazão de fluido quente para o produto clara.

X.2 Anexo II – Valores de R^2 obtidos no ajuste dos modelos

Tabela 46 – Coeficientes e correlação R^2 dos ajustes do modelo de segunda ordem das curvas de reação obtidas a partir dos PFCCs com 25 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada e vazões do produto e fluido de aquecimento.

Ensaio	PFCC_ Ovo + ¹	PFCC_ Ovo - ²	PFCC_ Gema+	PFCC_ Gema-	PFCC_ Clara+	PFCC_ Clara-
1	0,997	0,997	0,996	0,996	0,997	0,999
2	0,997	0,996	0,997	0,996	0,997	0,997
3	0,997	0,998	0,996	0,997	0,997	0,999
4	0,997	0,997	0,997	0,996	0,997	0,998
5	0,996	0,996	0,996	0,995	0,996	0,999
6	0,996	0,994	0,996	0,994	0,997	0,996
7	0,996	0,997	0,996	0,996	0,997	0,999
8	0,997	0,996	0,996	0,996	0,997	0,997
9	0,996	0,998	0,996	0,997	0,997	0,999
10	0,997	0,997	0,996	0,997	0,997	0,998
11	0,995	0,998	0,994	0,998	0,995	0,999
12	0,995	0,997	0,995	0,997	0,996	0,998
13	0,996	0,998	0,996	0,997	0,997	0,999
14	0,997	0,997	0,996	0,996	0,997	0,998
15	0,996	0,998	0,996	0,998	0,996	0,999
16	0,996	0,997	0,996	0,997	0,997	0,998
17	0,996	0,999	0,996	0,997	0,997	0,997
18	0,997	0,996	0,996	0,996	0,997	0,999
19	0,997	0,996	0,996	0,996	0,997	0,998
20	0,996	0,998	0,995	0,997	0,996	0,998
21	0,996	0,997	0,996	0,997	0,997	0,998
22	0,996	0,997	0,996	0,996	0,997	0,998
23	0,997	0,996	0,996	0,995	0,997	0,998
24	0,996	0,998	0,996	0,997	0,996	0,998
25	0,997	0,997	0,996	0,997	0,997	0,998

Tabela 47 - Coeficientes e correlação R^2 dos ajustes do modelo de segunda ordem das curvas de reação obtidas a partir dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas temperaturas de entrada do produto e fluido de aquecimento.

Ensaio	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
1	0,992	0,994	0,993	0,994	0,991	0,994
2	0,995	0,981	0,995	0,980	0,996	0,980
3	0,981	0,995	0,982	0,996	0,980	0,996
4	0,994	0,992	0,994	0,991	0,993	0,991
5	0,975	0,996	0,976	0,996	0,975	0,996
6	0,996	0,975	0,995	0,975	0,996	0,975
7	0,995	0,990	0,995	0,989	0,996	0,988
8	0,990	0,995	0,990	0,996	0,988	0,996
9	0,994	0,994	0,994	0,993	0,993	0,993

¹ O índice "+" se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

Tabela 48 - Coeficientes e correlação R^2 dos ajustes do modelo de segunda ordem das curvas de reação obtidas a partir dos PFCCs com 9 ensaios para estudo do efeito das perturbações nas vazões de entrada do produto e fluido de aquecimento.

Ensaio	PFCC Ovo + ⁽¹⁾	PFCC Ovo - ⁽²⁾	PFCC Gema+	PFCC Gema-	PFCC Clara+	PFCC Clara-
1	0,996	0,999	0,996	0,998	0,996	0,990
2	0,997	0,998	0,997	0,997	0,997	0,998
3	0,997	0,999	0,997	0,998	0,997	0,998
4	0,998	0,997	0,997	0,997	0,998	0,997
5	0,996	0,999	0,996	0,998	0,996	0,997
6	0,997	0,997	0,997	0,997	0,998	0,996
7	0,997	0,998	0,997	0,998	0,997	0,999
8	0,998	0,998	0,997	0,998	0,998	0,998
9	0,997	0,998	0,997	0,998	0,998	0,998

¹ O índice "+" se refere ao planejamento realizado para tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice "-" se refere ao planejamento realizado para tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.

X.3 Anexo III – Estimativa dos Efeitos e Interações das Variáveis Independentes sobre o Parâmetro K^* .

A) PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuladas.

Tabela 49 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	2022,14	23273,7	0,087	0,932	-49835,0	53879,3
(1) Δm_{fq} (L)	-6194,59	9501,47	-0,652	0,529	-27365,2	14976,0
Δm_{fq} (Q)	237,879	13850,67	0,017	0,987	-30623,3	31099,1
(2) Δm_p (L)	2194,42	9501,47	0,231	0,822	-18976,2	23365,1
Δm_p (Q)	-4353,00	13850,7	-0,314	0,760	-35214,2	26508,2
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	-20271,6	9501,47	-2,13	0,059	-41442,2	899,007
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	22274,8	13850,7	1,61	0,139	-8586,36	53136,0
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-2911,51	9501,47	-0,306	0,766	-24082,1	18259,1
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-4005,86	13850,7	-0,289	0,778	-34867,0	26855,3
1L x 2L	-469,603	11636,9	-0,040	0,969	-26398,2	25459,0
1L x 3L	1113,44	11636,9	0,096	0,926	-24815,1	27042,0
1L x 4L	763,545	11636,9	0,066	0,949	-25165,0	26692,1
2L x 3L	-635,556	11636,7	-0,055	0,958	-26564,1	25293,0
2L x 4L	-299,190	11636,874	-0,026	0,980	-26227,8	25629,4
3L x 4L	895,827	11636,874	0,077	0,940	-25032,7	26824,4

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 50 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-2309,98	2714,92	-0,851	0,415	-8359,20	3739,24
(1) Δm_{fq} (L)	-2938,58	1108,36	-2,651	0,0243	-5408,17	-469,000
Δm_{fq} (Q)	-2002,54	1615,70	-1,24	0,244	-5602,55	1597,46
(2) Δm_p (L)	2891,15	1108,36	2,608	0,0261	421,561	5360,73
Δm_p (Q)	-578,111	1615,70	-0,358	0,728	-4178,12	3021,90
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	-4184,40	1108,36	-3,78	0,0036	-6653,98	-1714,80
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-1813,93	1615,70	-1,12	0,288	-5413,94	1786,07
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-3325,00	1108,36	-3,00	0,0133	-5794,59	-855,420
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-820,488	1615,70	-0,508	0,623	-4420,50	2779,52
1L x 2L	472,337	1357,46	0,348	0,735	-2552,27	3496,95
1L x 3L	-671,732	1357,46	-0,495	0,631	-3696,34	2352,88
1L x 4L	-640,751	1357,46	-0,472	0,647	-3665,36	2383,86
2L x 3L	562,945	1357,46	0,415	0,687	-2461,67	3587,56
2L x 4L	499,865	1357,46	0,368	0,720	-2524,75	3524,48
3L x 4L	-723,843	1357,46	-0,533	0,606	-3748,45	2300,77

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

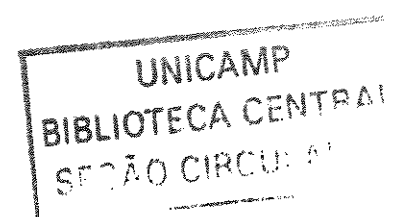


Tabela 51 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	1083,15	3358,31	0,323	0,754	-6399,63	8565,94
(1) Δm_{fq} (L)	-3850,23	1371,03	-2,81	0,019	-6905,06	-795,393
Δm_{fq} (Q)	1741,87	1998,60	0,872	0,404	-2711,28	6195,02
(2) Δm_p (L)	-383,894	1371,03	-0,280	0,785	-3438,73	2670,94
Δm_p (Q)	506,173	1998,60	0,253	0,805	-3946,98	4959,32
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	-3143,30	1371,03	-2,29	0,045	-6198,13	-88,4640
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	1056,60	1998,60	0,529	0,609	-3396,56	5509,74
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-22,5360	1371,03	-0,016	0,987	-3077,37	3032,30
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	706,180	1998,60	0,353	0,731	-3746,97	5159,33
1L x 2L	1827,93	1679,16	1,09	0,302	-1913,46	5569,32
1L x 3L	2649,99	1679,16	1,578	0,146	-1091,40	6391,39
1L x 4L	-1671,28	1679,16	-0,995	0,343	-5412,68	2070,11
2L x 3L	1940,64	1679,16	1,16	0,275	-1800,75	5682,04
2L x 4L	-2371,06	1679,16	-1,41	0,188	-6112,45	1370,34
3L x 4L	-1794,88	1679,16	-1,07	0,310	-5536,27	1946,52

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 52 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-1199,01	1500,66	-0,799	0,443	-4542,69	2144,67
(1) Δm_{fq} (L)*	-2103,85	612,641	-3,43	0,006	-3468,90	-738,795
Δm_{fq} (Q)	-1333,90	893,070	-1,49	0,166	-3323,78	655,986
(2) Δm_p (L)	1331,54	612,641	2,17	0,055	-33,5140	2696,59
Δm_p (Q)	-238,26	893,070	-0,267	0,795	-2228,14	1751,63
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-1997,01	612,641	-3,260	0,009	-3362,06	-631,964
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-862,530	893,070	-0,966	0,357	-2852,42	1127,36
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-1604,55	612,641	-2,62	0,026	-2969,60	-239,497
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-390,012	893,070	-0,437	0,672	-2379,90	1599,87
1L x 2L	246,801	750,329	0,329	0,749	-1425,04	1918,64
1L x 3L	-367,695	750,329	-0,490	0,635	-2039,53	1304,14
1L x 4L	-349,222	750,329	-0,465	0,652	-2021,06	1322,62
2L x 3L	327,506	750,329	0,436	0,672	-1344,33	1999,34
2L x 4L	311,270	750,329	0,415	0,687	-1360,57	1983,12
3L x 4L	-428,585	750,329	-0,571	0,580	-2100,42	1243,25

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 53 -: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	4589,745	11991,31	0,383	0,710	-22128,558	31308,049
(1) Δm_{fq} (L)*	-13398,440	4895,432	-2,737	0,021	-24306,142	-2490,738
Δm_{fq} (Q)	10996,256	7136,257	1,541	0,154	-4904,315	26896,828
(2) Δm_p (L)	4378,395	4895,432	0,894	0,392	-6529,306	15286,097
Δm_p (Q)	-173,049	7136,257	-0,024	0,981	-16073,620	15727,522
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	-9407,220	4895,432	-1,922	0,084	-20314,922	1500,482
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	2436,791	7136,257	0,341	0,740	-13463,780	18337,362
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-5652,688	4895,432	-1,155	0,275	-16560,390	5255,013
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	172,491	7136,257	0,024	0,981	-15728,080	16073,062
1L x 2L	92,281	5995,655	0,015	0,988	-13266,871	13451,432
1L x 3L	3689,334	5995,655	0,615	0,552	-9669,818	17048,486
1L x 4L	512,795	5995,655	0,086	0,934	-12846,357	13871,946
2L x 3L	-2904,597	5995,655	-0,484	0,639	-16263,749	10454,554
2L x 4L	233,631	5995,655	0,039	0,970	-13125,521	13592,783
3L x 4L	3437,925	5995,655	0,573	0,579	-9921,227	16797,076

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 54: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	-30777,050	13644,961	-2,256	0,048	-61179,917	-374,183
(1) Δm_{fq} (L)	-31521,757	19890,777	-1,585	0,144	-75841,170	12797,657
Δm_{fq} (Q)	6935,476	13644,961	0,508	0,622	-23467,391	37338,342
(2) Δm_p (L)	3715,891	19890,777	0,187	0,856	-40603,522	48035,305
Δm_p (Q)	-10402,004	13644,961	-0,762	0,463	-40804,871	20000,863
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	366,968	19890,777	0,018	0,986	-43952,446	44686,381
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-9425,588	13644,961	-0,691	0,505	-39828,455	20977,279
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	3270,109	19890,777	0,164	0,873	-41049,305	47589,522
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	1670,105	16711,595	0,100	0,922	-35565,651	38905,860
1L x 2L	-2189,350	16711,595	-0,131	0,898	-39425,105	35046,406
1L x 3L	496,247	16711,595	0,030	0,977	-36739,508	37732,003
1L x 4L	1094,933	16711,595	0,066	0,949	-36140,822	38330,689
2L x 3L	3338,252	16711,595	0,200	0,846	-33897,503	40574,008
2L x 4L	-3935,141	16711,595	-0,235	0,819	-41170,896	33300,615
3L x 4L*	-30777,050	13644,961	-2,256	0,048	-61179,917	-374,183

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

B) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos.

Tabela 55 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	0,356	0,131	2,726	0,072	-0,060	0,771
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-0,377	0,092	-4,079	0,027	-0,671	-0,083
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,234	0,154	1,524	0,225	-0,255	0,723
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-0,285	0,092	-3,085	0,054	-0,579	0,009
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,111	0,154	0,721	0,523	-0,378	0,600
1L x 2L	0,000	0,131	-0,001	0,999	-0,416	0,415

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 56 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-0,356	0,130	-2,733	0,072	-0,770	0,059
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-0,376	0,092	-4,075	0,027	-0,669	-0,082
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-0,233	0,153	-1,523	0,225	-0,721	0,254
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-0,286	0,092	-3,103	0,053	-0,580	0,007
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-0,111	0,153	-0,724	0,521	-0,599	0,377
1L x 2L	0,000	0,130	-0,001	0,999	-0,415	0,414

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 57 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	0,351	0,126	2,777	0,069	-0,051	0,754
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-0,362	0,090	-4,037	0,027	-0,647	-0,077
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,224	0,149	1,504	0,230	-0,250	0,697
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-0,288	0,090	-3,217	0,049	-0,573	-0,003
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)*	0,114	0,149	0,764	0,500	-0,360	0,587
1L x 2L	0,000	0,126	-0,002	0,999	-0,403	0,402

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 58 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-0,351	0,126	-2,785	0,069	-0,752	0,050
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-0,360	0,089	-4,029	0,027	-0,644	-0,076
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-0,223	0,148	-1,502	0,230	-0,695	0,249
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-0,289	0,089	-3,239	0,048	-0,573	-0,005
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-0,114	0,148	-0,769	0,498	-0,586	0,358
1L x 2L	0,000	0,126	-0,001	0,999	-0,401	0,401

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 59 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	0,362	0,141	2,572	0,082	-0,086	0,811
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-0,419	0,100	-4,195	0,025	-0,736	-0,101
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,262	0,166	1,579	0,212	-0,266	0,790
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-0,270	0,100	-2,701	0,074	-0,587	0,048
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,099	0,166	0,595	0,593	-0,429	0,627
1L x 2L	0,000	0,141	0,000	1,000	-0,449	0,448

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 60 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-0,363	0,141	-2,579	0,082	-0,810	0,085
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-0,418	0,100	-4,193	0,025	-0,734	-0,101
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-0,261	0,165	-1,579	0,212	-0,788	0,265
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-0,270	0,100	-2,714	0,073	-0,587	0,047
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-0,099	0,165	-0,598	0,592	-0,625	0,428
1L x 2L	0,000	0,141	-0,002	0,998	-0,448	0,447

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

C) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das vazões dos fluidos.

Tabela 61 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	5093,700	14377,158	0,354	0,747	-40660,833	50848,233
(1) Δm_{fq} (L)	-23291,451	10181,704	-2,288	0,106	-55694,179	9111,277
Δm_{fq} (Q)	19482,921	16918,277	1,152	0,333	-34358,588	73324,429
(2) Δm_p (L)	3502,708	10181,704	0,344	0,754	-28900,020	35905,436
Δm_p (Q)	-2459,147	16918,277	-0,145	0,894	-56300,656	51382,361
1L x 2L	-182,891	14377,670	-0,013	0,991	-45939,054	45573,272

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear;

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 62 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-6294,455	13704,641	-0,459	0,677	-49908,740	37319,830
(1) Δm_{fq} (L)	-17921,391	9705,438	-1,847	0,162	-48808,425	12965,643
Δm_{fq} (Q)	-18139,617	16126,895	-1,125	0,343	-69462,595	33183,361
(2) Δm_p (L)	7680,919	9705,438	0,791	0,487	-23206,115	38567,953
Δm_p (Q)	-300,464	16126,895	-0,019	0,986	-51623,442	51022,515
1L x 2L	-1544,815	13705,129	-0,113	0,917	-45160,654	42071,023

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear;

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 63 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	2803,287	3930,629	0,713	0,527	-9705,730	15312,304
(1) Δm_{fq} (L)	-8789,207	2783,617	-3,157	0,051	-17647,920	69,506
Δm_{fq} (Q)	6501,860	4625,356	1,406	0,254	-8218,088	21221,808
(2) Δm_p (L)	1163,455	2783,617	0,418	0,704	-7695,258	10022,168
Δm_p (Q)	-412,944	4625,356	-0,089	0,934	-15132,892	14307,004
1L x 2L	-0,764	3930,769	0,000	1,000	-12510,226	12508,699

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 64 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-3032,612	2072,389	-1,463	0,240	-9627,878	3562,654
(1) Δm_{fq} (L)	-1396,124	1467,637	-0,951	0,412	-6066,800	3274,553
Δm_{fq} (Q)	83,433	2438,677	0,034	0,975	-7677,527	7844,392
(2) Δm_p (L)	2573,949	1467,637	1,754	0,178	-2096,727	7244,625
Δm_p (Q)	-2514,400	2438,677	-1,031	0,378	-10275,40	5246,559
1L x 2L	-351,658	2072,463	-0,170	0,876	-6947,159	6243,843

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 65 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	13294,132	39669,421	0,335	0,760	-112951,67	139539,9
(1) Δm_{fq} (L)*	-59812,682	28093,336	-2,129	0,123	-149218,21	29592,85
Δm_{fq} (Q)	50689,310	46680,872	1,086	0,357	-97870,057	199248,7
(2) Δm_p (L)	13313,414	28093,336	0,474	0,668	-76092,118	102718,9
Δm_p (Q)	-4483,906	46680,872	-0,096	0,930	-153043,27	144075,5
1L x 2L	-957,254	39670,834	-0,024	0,982	-127207,55	125293,0

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 66 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta m_{fq_entrada}$ e $\Delta m_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.	-17617,370	35739,65	-0,493	0,656	-131356,9	96122,158
(1) Δm_{fq} (L)	-44979,595	25310,33	-1,777	0,174	-125528,36	35569,167
Δm_{fq} (Q)	-49394,232	42056,53	-1,174	0,325	-183236,88	84448,414
(2) Δm_p (L)	21908,694	25310,33	0,866	0,450	-58640,07	102457,46
Δm_p (Q)	-7455,766	42056,53	-0,177	0,871	-141298,41	126386,88
1L x 2L	-8387,197	35740,93	-0,235	0,830	-122130,78	105356,38

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

X.4 Anexo IV – Análise de Variância no Estudo da Influência das Variáveis Independentes sobre Parâmetro K^* .

A) PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuladas.

Tabela 67 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	273352694	3	911175645	18,94	3,07	6,17
Resíduos	101007240	21	4809869			
Falta de Ajuste	101007240	21	4809869			
Erro Puro	0	0	0			
Total	374359934	24				

$R^2=0,730$

Tabela 68: Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	148227513	1	148227513	14,97	4,28	3,50
Resíduos	227666939	23	9898562			
Falta de Ajuste	227666939	23	9898562			
Erro Puro	0,0	0	0			
Total	375894452	24				

$R^2=0,394$

Tabela 69 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{jq} , $\Delta T_{jq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{calo/F_{tab}}
Regressão	65932788	2	32966394	16,56	3,44	4,81
Resíduos	43795357	22	1990698			
Falta de Ajuste	43795357	22	1990698			
Erro Puro	0	0	0			
Total	109728146	24				

R²=0,601

B) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos.

Tabela 70: Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{jq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal/F_{tab}}
Regressão	0,426	1	0,426	35,05	5,59	6,27
Resíduos	0,085	7	0,012			
Falta de Ajuste	0,085	7	0,012			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	0,511	8				

R²=0,834

Tabela 71: Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro K' , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	$F_{calculado}$	$F_{tabelado}$	F_{cal}/F_{tab}
Regressão	0,425	1	0,425	35,22	5,59	6,298
Resíduos	0,084	7	0,012			
Falta de Ajuste	0,084	7	0,012			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	0,509	8				

$R^2=0,834$

X.5 Anexo V – Estimativa dos Efeitos e Interações das Variáveis Independentes sobre o Parâmetro τ^* .

A) PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis.

Tabela 72: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	63,837	0,106	602,816	3,883E-24	63,601	64,073
(1) Δm_{fq} (L)*	-1,159	0,043	-26,797	1,210E-10	-1,255	-1,062
Δm_{fq} (Q)	0,117	0,063	1,852	9,378E-02	-0,024	0,257
(2) Δm_p (L)	0,070	0,043	1,621	1,362E-01	-0,026	0,166
Δm_p (Q)*	0,560	0,063	8,878	4,676E-06	0,419	0,700
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-2,554	0,043	-59,080	4,688E-14	-2,651	-2,458
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)*	0,237	0,063	3,764	3,698E-03	0,097	0,378
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	5,746	0,043	132,907	1,427E-17	5,650	5,842
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)*	-0,436	0,063	-6,919	4,097E-05	-0,576	-0,296
1L x 2L*	-0,366	0,053	-6,908	4,152E-05	-0,484	-0,248
1L x 3L*	0,120	0,053	2,265	4,696E-02	0,002	0,238
1L x 4L*	-0,419	0,053	-7,905	1,307E-05	-0,537	-0,301
2L x 3L*	-0,618	0,053	-11,670	3,794E-07	-0,736	-0,500
2L x 4L*	0,528	0,053	9,969	1,636E-06	0,410	0,646
3L x 4L*	-0,363	0,053	-6,852	4,447E-05	-0,481	-0,245

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 73: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	60,651	0,482894	125,5999	2,51158E-17	59,57548	61,72739
(1) Δm_{fq} (L)*	-4,4514	0,197141	-22,57991	6,53447E-10	-4,890676	-4,012162
Δm_{fq} (Q)*	1,4233	0,287379	4,952646	0,000576271	0,782967	2,06361
(2) Δm_p (L)*	-5,8982	0,197141	-29,91879	4,06954E-11	-6,337467	-5,458954
Δm_p (Q)	0,4839	0,287379	1,68385	0,123116804	-0,156417	1,124225
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,0737	0,197141	5,446326	0,000282315	0,634436	1,512949
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,0211	0,287379	0,073363	0,942964062	-0,619238	0,661404
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-4,1530	0,197141	-21,06629	1,2908E-09	-4,592279	-3,713765
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-0,3896	0,287379	-1,355542	0,205067547	-1,029876	0,250766
1L x 2L	-0,2751	0,241447	-1,139374	0,281104038	-0,813076	0,262879
1L x 3L*	0,5404	0,241447	2,238222	0,049152235	0,002435	1,07839
1L x 4L*	-0,9767	0,241447	-4,04502	0,002342246	-1,514636	-0,438681
2L x 3L	-0,4281	0,241447	-1,772992	0,10663347	-0,966061	0,109894
2L x 4L	0,3734	0,241447	1,546348	0,153057105	-0,164616	0,911339
3L x 4L	-0,2025	0,241447	-0,838816	0,421171174	-0,740507	0,335448

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 74: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	65,824	0,118	559,298	0,000	65,562	66,086
(1) Δm_{fq} (L)*	-0,743	0,048	-15,462	0,000	-0,850	-0,636
Δm_{fq} (Q)	0,071	0,070	1,016	0,333	-0,085	0,227
(2) Δm_p (L)	0,047	0,048	0,980	0,350	-0,060	0,154
Δm_p (Q)*	0,635	0,070	9,069	0,000	0,479	0,791
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-3,373	0,048	-70,205	0,000	-3,480	-3,266
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)*	0,353	0,070	5,039	0,001	0,197	0,509
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	6,606	0,048	137,487	0,000	6,499	6,713
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)*	-0,535	0,070	-7,643	0,000	-0,691	-0,379
1L x 2L*	-0,244	0,059	-4,142	0,002	-0,375	-0,113
1L x 3L	0,111	0,059	1,883	0,089	-0,020	0,242
1L x 4L*	-0,284	0,059	-4,826	0,001	-0,415	-0,153
2L x 3L*	-0,810	0,059	-13,773	0,000	-0,942	-0,679
2L x 4L*	0,705	0,059	11,982	0,000	0,574	0,836
3L x 4L*	-0,439	0,059	-7,461	0,000	-0,570	-0,308

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 75: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	60,575	0,327	185,469	5,103E-19	59,848	61,303
(1) Δm_{fq} (L)*	-2,172	0,133	-16,288	1,581E-08	-2,469	-1,875
Δm_{fq} (Q)*	0,733	0,194	3,774	3,639E-03	0,300	1,167
(2) Δm_p (L)*	-5,986	0,133	-44,891	7,238E-13	-6,283	-5,689
Δm_p (Q)*	0,583	0,194	3,002	1,331E-02	0,150	1,017
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,958	0,133	14,687	4,282E-08	1,661	2,255
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,140	0,194	0,722	4,869E-01	-0,293	0,573
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-5,186	0,133	-38,894	3,014E-12	-5,483	-4,889
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)*	-0,503	0,194	-2,590	2,695E-02	-0,937	-0,070
1L x 2L	-0,244	0,163	-1,496	1,655E-01	-0,608	0,120
1L x 3L*	0,576	0,163	3,528	5,467E-03	0,212	0,940
1L x 4L*	-0,800	0,163	-4,901	6,218E-04	-1,164	-0,437
2L x 3L*	-0,633	0,163	-3,879	3,064E-03	-0,997	-0,270
2L x 4L*	0,568	0,163	3,480	5,924E-03	0,204	0,932
3L x 4L	-0,276	0,163	-1,691	1,216E-01	-0,640	0,088

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 76 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	65,994	0,127	518,246	1,761E-23	65,710	66,278
(1) Δm_{fq} (L)*	-1,899	0,052	-36,528	5,623E-12	-2,015	-1,783
Δm_{fq} (Q)	-0,141	0,076	-1,863	9,206E-02	-0,310	0,028
(2) Δm_p (L)*	0,318	0,052	6,125	1,119E-04	0,203	0,434
Δm_p (Q)*	0,221	0,076	2,915	1,544E-02	0,052	0,390
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-1,479	0,052	-28,445	6,707E-11	-1,595	-1,363
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)*	-0,178	0,076	-2,348	4,080E-02	-0,347	-0,009
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	4,969	0,052	95,578	3,849E-16	4,853	5,085
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)*	-0,418	0,076	-5,510	2,581E-04	-0,586	-0,249
1L x 2L*	-0,568	0,064	-8,915	4,508E-06	-0,709	-0,426
1L x 3L*	0,049	0,064	0,769	4,597E-01	-0,093	0,191
1L x 4L*	-0,572	0,064	-8,985	4,201E-06	-0,714	-0,430
2L x 3L*	-0,406	0,064	-6,375	8,089E-05	-0,548	-0,264
2L x 4L*	0,297	0,064	4,661	8,929E-04	0,155	0,439
3L x 4L*	-0,278	0,064	-4,366	1,407E-03	-0,420	-0,136

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 77 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	65,545	6,023	10,883	7,283E-07	52,125	78,965
(1) Δm_{fq} (L)	-2,083	2,459	-0,847	0,417	-7,562	3,395
Δm_{fq} (Q)	2,008	3,584	0,560	0,588	-5,978	9,995
(2) Δm_p (L)*	-6,538	2,459	-2,659	0,024	-12,016	-1,059
Δm_p (Q)	0,485	3,584	0,135	0,895	-7,502	8,471
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	0,206	2,459	0,084	0,935	-5,272	5,685
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-0,038	3,584	-0,011	0,992	-8,024	7,949
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	-3,315	2,459	-1,348	0,207	-8,793	2,164
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-0,298	3,584	-0,083	0,935	-8,284	7,689
1L x 2L	-0,320	3,011	-0,106	0,917	-7,030	6,390
1L x 3L	0,307	3,011	0,102	0,921	-6,403	7,017
1L x 4L	-1,078	3,011	-0,358	0,728	-7,788	5,632
2L x 3L	-0,267	3,011	-0,089	0,931	-6,977	6,443
2L x 4L	0,190	3,011	0,063	0,951	-6,520	6,900
3L x 4L	-0,159	3,011	-0,053	0,959	-6,869	6,551

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

B) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos.

Tabela 78: Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	69,603	1,095	63,590	8,569E-06	66,119	73,086
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-12,903	0,775	-16,646	4,720E-04	-15,370	-10,436
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	4,058	1,288	3,151	5,124E-02	-0,041	8,157
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	9,965	0,775	12,855	1,016E-03	7,498	12,432
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-2,471	1,288	-1,919	1,508E-01	-6,570	1,628
1L x 2L	-0,091	1,095	-0,083	9,392E-01	-3,574	3,393

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 79 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	69,602	1,094	63,598	0,000	66,119	73,085
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	12,819	0,775	16,540	0,000	10,352	15,286
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	4,058	1,288	3,151	0,051	-0,041	8,156
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-9,896	0,775	-12,768	0,001	-12,362	-7,429
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-2,476	1,288	-1,923	0,150	-6,575	1,622
1L x 2L	-0,089	1,094	-0,081	0,940	-3,572	3,394

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 80 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	69,985	1,274	54,955	1,327E-05	65,932	74,038
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-14,643	0,902	-16,236	5,083E-04	-17,513	-11,773
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	4,742	1,499	3,164	5,071E-02	-0,028	9,511
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	11,190	0,902	12,408	1,128E-03	8,320	14,060
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-2,691	1,499	-1,796	1,704E-01	-7,460	2,078
1L x 2L	-0,304	1,274	-0,239	8,266E-01	-4,357	3,749

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 81 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	69,951	1,268	55,148	1,313E-05	65,914	73,987
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	14,584	0,898	16,235	0,001	11,725	17,442
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)*	4,759	1,493	3,188	0,050	0,009	9,509
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-11,085	0,898	-12,340	0,001	-13,943	-8,226
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-2,695	1,493	-1,805	0,169	-7,445	2,056
1L x 2L	-0,302	1,268	-0,238	0,827	-4,339	3,734

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 82 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	74,795	0,830	90,124	3,011E-06	72,154	77,436
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	-10,249	0,588	-17,438	4,110E-04	-12,119	-8,378
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	2,944	0,977	3,015	5,699E-02	-0,164	6,052
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	8,139	0,588	13,848	8,151E-04	6,269	10,009
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-2,180	0,977	-2,232	1,118E-01	-5,288	0,928
1L x 2L	0,339	0,830	0,409	7,101E-01	-2,302	2,981

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 83 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	74,833	0,827	90,484	2,976E-06	72,201	77,465
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	10,142	0,586	17,316	4,197E-04	8,278	12,006
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	2,934	0,973	3,014	5,701E-02	-0,164	6,031
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	-8,100	0,586	-13,830	8,183E-04	-9,964	-6,236
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	-2,204	0,973	-2,265	1,084E-01	-5,301	0,893
1L x 2L	0,341	0,827	0,413	7,074E-01	-2,291	2,974

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

C) PFCC com 9 ensaios – Avaliação da influência das vazões dos fluidos

Tabela 84 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	57,059	0,400	142,634	7,598E-07	55,786	58,332
(1) Δm_{fq} (L)*	1,591	0,283	5,615	1,117E-02	0,689	2,492
Δm_{fq} (Q)	-0,868	0,471	-1,845	1,623E-01	-2,367	0,630
(2) Δm_p (L)*	-2,427	0,283	-8,567	3,342E-03	-3,329	-1,526
Δm_p (Q)	1,375	0,471	2,921	6,145E-02	-0,123	2,873
1L x 2L	0,399	0,400	0,997	3,923E-01	-0,874	1,672

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear;

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 85 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	53,398	0,705	75,712	5,078E-06	51,154	55,643
(1) Δm_{fq} (L)*	-11,055	0,499	-22,133	2,019E-04	-12,644	-9,465
Δm_{fq} (Q)	1,918	0,830	2,311	1,040E-01	-0,723	4,559
(2) Δm_p (L)*	-7,690	0,499	-15,396	5,953E-04	-9,279	-6,100
Δm_p (Q)	1,382	0,830	1,665	1,944E-01	-1,259	4,023
1L x 2L	1,045	0,705	1,482	2,350E-01	-1,199	3,290

Parâmetros estatisticamente significativos;

(L) Parâmetro Linear e (Q);

Parâmetro Quadrático.

Tabela 86 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	58,299	0,377	154,467	0,000	57,098	59,501
(1) Δm_{fq} (L)*	1,073	0,267	4,014	0,028	0,222	1,923
Δm_{fq} (Q)	-0,432	0,444	-0,973	0,402	-1,846	0,981
(2) Δm_p (L)*	-3,394	0,267	-12,697	0,001	-4,244	-2,543
Δm_p (Q)	1,224	0,444	2,757	0,070	-0,189	2,638
1L x 2L	0,471	0,377	1,247	0,301	-0,731	1,672

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 87 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	52,181	0,445	117,138	1,372E-06	50,764	53,599
(1) Δm_{fq} (L)*	-5,588	0,315	-17,713	3,923E-04	-6,592	-4,584
Δm_{fq} (Q)	0,781	0,524	1,489	2,332E-01	-0,888	2,449
(2) Δm_p (L)*	-6,951	0,315	-22,035	2,046E-04	-7,955	-5,947
Δm_p (Q)	1,427	0,524	2,723	7,239E-02	-0,241	3,095
1L x 2L	1,090	0,445	2,446	9,202E-02	-0,328	2,507

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 88 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança +95%
Média.*	58,948	0,625	94,372	2,623E-06	56,960	60,936
(1) Δm_{fq} (L)*	2,317	0,442	5,237	1,355E-02	0,909	3,725
Δm_{fq} (Q)	-1,791	0,735	-2,436	9,282E-02	-4,130	0,549
(2) Δm_p (L)*	-1,170	0,442	-2,645	7,732E-02	-2,578	0,238
Δm_p (Q)	1,602	0,735	2,180	1,174E-01	-0,737	3,941
1L x 2L*	0,029	0,625	0,046	9,661E-01	-1,959	2,017

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 89 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	58,906	1,007	58,479	1,102E-05	55,700	62,112
(1) Δm_{fq} (L)*	-18,202	0,713	-25,516	1,320E-04	-20,472	-15,932
Δm_{fq} (Q)	2,058	1,185	1,736	1,810E-01	-1,714	5,830
(2) Δm_p (L)*	-9,296	0,713	-13,031	9,759E-04	-11,566	-7,026
Δm_p (Q)	1,576	1,185	1,329	2,758E-01	-2,197	5,348
1L x 2L	0,823	1,007	0,817	4,736E-01	-2,383	4,029

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

X.6 Anexo VI – Análise de Variância no Estudo da Influência das Variáveis Independentes sobre o Parâmetro τ^* .

A) PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis.

Tabela 90 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fp} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	252,3	11	22,94	166,63	2,63	63,25
Resíduos	1,789	13	0,1376			
Falta de Ajuste	1,789	13	0,1376			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	254,1	24				

R²=0,999

Tabela 91 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fp} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	455,1	6	75,85	190,94	2,66	71,78
Resíduos	7,150	18	0,3972			
Falta de Ajuste	7,150	18	0,3972			
Erro Puro	0	0	0			
Total	462,2	24				

R²=0,985

Tabela 92 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fp} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	335,5	10	33,55	46,61	2,60	17,91
Resíduos	10,08	14	0,7199			
Falta de Ajuste	10,08	14	0,7199			
Erro Puro	0	0	0			
Total	345,6	24				

$R^2=0,999$

Tabela 93 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fp} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	439,3	10	43,93	142,33	2,60	54,70
Resíduos	4,322	14	0,309			
Falta de Ajuste	4,322	14	0,309			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	443,7	24				

$R^2=0,996$

Tabela 94 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fp} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	188,4	11	17,13	254,63	2,63	96,65
Resíduos	0,875	13	0,067			
Falta de Ajuste	0,875	13	0,067			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	189,3	24				

R²=0,999

B) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos.

Tabela 95 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	529,98	1	529,98	80,15	5,59	14,33
Resíduos	46,287	7	6,612			
Falta de Ajuste	46,287	7	6,612			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	576,27	8				

R²=0,920

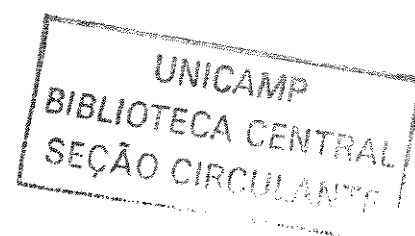


Tabela 96 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	522,94	1	522,94	78,99	5,59	14,13
Resíduos	46,340	7	6,620			
Falta de Ajuste	46,340	7	6,620			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	569,28	8				

R²=0,919

Tabela 97 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	677,24	1	677,24	78,39	5,59	14,02
Resíduos	60,472	7	8,639			
Falta de Ajuste	60,472	7	8,639			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	737,72	8				

R²=0,918

Tabela 98 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	719,69	2	359,8	212,46	4,76	44,66
Resíduos	10,162	6	1,694			
Falta de Ajuste	10,162	6	1,694			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	729,85	8				

R²=0,986

Tabela 99 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da clara de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	341,54	1	341,5	84,62	5,59	15,13
Resíduos	28,253	7	4,036			
Falta de Ajuste	28,253	7	4,036			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	369,80	8				

R²=0,924

Tabela 100 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{pe_entrada}$ sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal/F_{tab}}
Regressão	335,94	1	335,94	82,89	5,59	14,82
Resíduos	28,371	7	4,053			
Falta de Ajuste	28,371	7	4,053			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	364,31	8				

R²=0,922

C) PFCC com 9 ensaios – Avaliação da influência das vazões dos fluidos

Tabela 101 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída do ovo integral.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal/F_{tab}}
Regressão	16,79	1	16,79	20,73	5,59	3,71
Resíduos	5,669	7	0,810			
Falta de Ajuste	5,669	7	0,810			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	22,46	8				

R²=0,748

Tabela 102 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída do ovo integral.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	361,60	1	361,60	479,95	5,59	85,84
Resíduos	5,274	7	0,753			
Falta de Ajuste	5,274	7	0,753			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	366,87	8				

R²=0,986

Tabela 103 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência positiva da temperatura de saída da gema de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	25,26	1	25,26	50,53	5,59	9,04
Resíduos	3,499	7	0,500			
Falta de Ajuste	3,499	7	0,500			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	28,76	8				

R²=0,878

Tabela 104 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da gema de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	158,62	1	158,62	339,29	5,59	60,68
Resíduos	3,273	7	0,468			
Falta de Ajuste	3,273	7	0,468			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	161,89	8				

R²=0,980

Tabela 105 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre o parâmetro τ^* , PFCC para tendência negativa da temperatura de saída da clara de ovo.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	832,97	1	832,97	848,93	5,59	151,83
Resíduos	6,868	7	0,981			
Falta de Ajuste	6,868	7	0,981			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	839,84	8				

R²=0,992

X.7 Anexo VII – Estimativa dos Efeitos e Interações das Variáveis Independentes sobre a Temperatura de Saída do Produto no TCP ($T_{p_saída}$).

A) PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis.

Tabela 106 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	64,747	0,009	7069,707	0,000E+00	64,726	64,767
(1) Δm_{fq} (L)*	0,638	0,004	170,706	1,169E-18	0,630	0,647
Δm_{fq} (Q)*	-0,071	0,005	-13,008	1,364E-07	-0,083	-0,059
(2) Δm_p (L)*	-1,518	0,004	-405,981	2,023E-22	-1,526	-1,510
Δm_p (Q)*	0,027	0,005	4,950	5,785E-04	0,015	0,039
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	0,934	0,004	249,861	2,593E-20	0,926	0,943
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,000	0,005	0,060	9,530E-01	-0,012	0,012
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	0,709	0,004	189,700	4,073E-19	0,701	0,718
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,001	0,005	0,161	8,751E-01	-0,011	0,013
1L x 2L	0,009	0,005	1,927	8,282E-02	-0,001	0,019
1L x 3L	0,005	0,005	1,015	3,338E-01	-0,006	0,015
1L x 4L	-0,008	0,005	-1,649	1,302E-01	-0,018	0,003
2L x 3L*	-0,013	0,005	-2,888	1,616E-02	-0,023	-0,003
2L x 4L*	0,018	0,005	3,893	2,997E-03	0,008	0,028
3L x 4L	0,000	0,005	-0,055	9,575E-01	-0,010	0,010

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 107 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	54,339	0,224	243,001	3,425E-20	53,841	54,837
(1) Δm_{fq} (L)*	2,972	0,091	32,554	1,763E-11	2,768	3,175
Δm_{fq} (Q)*	-0,758	0,133	-5,697	1,991E-04	-1,055	-0,462
(2) Δm_p (L)*	-1,359	0,091	-14,884	3,768E-08	-1,562	-1,155
Δm_p (Q)	0,047	0,133	0,350	7,335E-01	-0,250	0,343
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	0,830	0,091	9,088	3,792E-06	0,626	1,033
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,024	0,133	0,179	8,612E-01	-0,273	0,320
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	0,863	0,091	9,452	2,657E-06	0,660	1,066
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,024	0,133	0,183	8,585E-01	-0,272	0,321
1L x 2L	0,019	0,112	0,173	8,662E-01	-0,230	0,268
1L x 3L	0,021	0,112	0,190	8,532E-01	-0,228	0,270
1L x 4L	-0,034	0,112	-0,301	7,696E-01	-0,283	0,215
2L x 3L	-0,012	0,112	-0,104	9,192E-01	-0,261	0,237
2L x 4L	0,016	0,112	0,143	8,894E-01	-0,233	0,265
3L x 4L	0,000	0,112	-0,004	9,972E-01	-0,250	0,249

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 108 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	65,37	0,613	106,708	0,000	64,004	66,734
(1) Δm_{fq} (L)	0,347	0,250	1,387	0,195	-0,210	0,904
Δm_{fq} (Q)	0,088	0,365	0,241	0,814	-0,724	0,900
(2) Δm_p (L)*	-1,470	0,250	-5,877	0,000	-2,027	-0,912
Δm_p (Q)	0,151	0,365	0,413	0,688	-0,662	0,963
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	0,437	0,250	1,748	0,111	-0,120	0,994
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-0,625	0,365	-1,714	0,117	-1,437	0,187
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	0,687	0,250	2,747	0,021	0,130	1,244
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,126	0,365	0,345	0,737	-0,687	0,938
1L x 2L	0,005	0,306	0,016	0,987	-0,677	0,688
1L x 3L	0,002	0,306	0,008	0,994	-0,680	0,685
1L x 4L	-0,004	0,306	-0,013	0,990	-0,687	0,678
2L x 3L	-0,013	0,306	-0,042	0,967	-0,695	0,670
2L x 4L	0,017	0,306	0,056	0,956	-0,665	0,700
3L x 4L	0,000	0,306	-0,001	1,000	-0,683	0,682

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 109 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	56,415	0,111	507,110	2,188E-23	56,167	56,663
(1) Δm_{fq} (L)*	1,589	0,045	34,987	8,627E-12	1,488	1,690
Δm_{fq} (Q)*	-0,390	0,066	-5,897	1,517E-04	-0,538	-0,243
(2) Δm_p (L)*	-1,301	0,045	-28,640	6,269E-11	-1,402	-1,200
Δm_p (Q)	0,033	0,066	0,491	6,340E-01	-0,115	0,180
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	0,857	0,045	18,874	3,779E-09	0,756	0,958
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,011	0,066	0,173	8,663E-01	-0,136	0,159
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	0,802	0,045	17,661	7,213E-09	0,701	0,903
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,012	0,066	0,183	8,588E-01	-0,135	0,160
1L x 2L	0,013	0,056	0,229	8,233E-01	-0,111	0,137
1L x 3L	0,010	0,056	0,181	8,602E-01	-0,114	0,134
1L x 4L	-0,017	0,056	-0,305	7,665E-01	-0,141	0,107
2L x 3L	-0,012	0,056	-0,212	8,363E-01	-0,136	0,112
2L x 4L	0,016	0,056	0,285	7,812E-01	-0,108	0,140
3L x 4L	0,000	0,056	0,008	9,941E-01	-0,124	0,124

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 110 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	61,929	0,144	430,91	1,115E-22	61,609	62,250
(1) Δm_{fq} (L)*	1,245	0,059	21,220	1,202E-09	1,114	1,376
Δm_{fq} (Q)	0,056	0,086	0,657	5,262E-01	-0,134	0,247
(2) Δm_p (L)*	-1,546	0,059	-26,354	1,426E-10	-1,677	-1,416
Δm_p (Q)*	0,217	0,086	2,541	2,931E-02	0,027	0,408
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	0,948	0,059	16,165	1,701E-08	0,818	1,079
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)*	0,188	0,086	2,199	5,252E-02	-0,002	0,379
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	0,724	0,059	12,343	2,240E-07	0,593	0,855
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,039	0,086	0,452	6,607E-01	-0,152	0,229
1L x 2L	0,089	0,072	1,232	2,460E-01	-0,072	0,249
1L x 3L	0,084	0,072	1,171	2,688E-01	-0,076	0,244
1L x 4L	-0,089	0,072	-1,244	2,418E-01	-0,250	0,071
2L x 3L	0,061	0,072	0,850	4,152E-01	-0,099	0,221
2L x 4L	-0,056	0,072	-0,780	4,534E-01	-0,216	0,104
3L x 4L	-0,075	0,072	-1,048	3,191E-01	-0,235	0,085

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 111 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(10)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	49,490	3,626	13,647	0,000	41,410	57,570
(1) Δm_{fq} (L)	1,280	1,480	0,864	0,408	-2,019	4,579
Δm_{fq} (Q)	-1,094	2,158	-0,507	0,623	-5,903	3,715
(2) Δm_p (L)	-1,413	1,480	-0,954	0,363	-4,711	1,886
Δm_p (Q)	0,052	2,158	0,024	0,981	-4,756	4,861
(3) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)	0,753	1,480	0,508	0,622	-2,546	4,051
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,027	2,158	0,012	0,990	-4,782	4,835
(4) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)	0,988	1,480	0,667	0,520	-2,311	4,287
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,027	2,158	0,012	0,990	-4,782	4,836
1L x 2L	0,009	1,813	0,005	0,996	-4,031	4,050
1L x 3L	0,038	1,813	0,021	0,983	-4,002	4,079
1L x 4L	-0,056	1,813	-0,031	0,976	-4,096	3,984
2L x 3L	-0,013	1,813	-0,007	0,994	-4,053	4,027
2L x 4L	0,016	1,813	0,009	0,993	-4,024	4,056
3L x 4L	0,000	1,813	0,000	1,000	-4,040	4,040

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

B) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos.

Tabela 112 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	62,67	0,011	5902,76	1,072E-11	62,63	62,70
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,670	0,008	222,150	2,011E-07	1,646	1,694
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,000	0,012	-0,025	9,814E-01	-0,040	0,039
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	1,090	0,008	144,972	7,237E-07	1,066	1,114
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,001	0,012	0,071	9,476E-01	-0,039	0,041
1L x 2L	-0,001	0,011	-0,071	9,481E-01	-0,035	0,033

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 113 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	57,386	0,011	5402,023	1,399E-11	57,352	57,420
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,676	0,008	222,798	1,994E-07	1,652	1,700
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,000	0,013	-0,025	9,814E-01	-0,040	0,039
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	1,086	0,008	144,306	7,337E-07	1,062	1,110
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,001	0,013	0,071	9,476E-01	-0,039	0,041
1L x 2L	-0,001	0,011	-0,071	9,482E-01	-0,035	0,033

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 114 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	63,727	0,011	6011,964	1,015E-11	63,693	63,760
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,688	0,008	224,928	1,938E-07	1,665	1,712
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-0,001	0,012	-0,041	9,701E-01	-0,040	0,039
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	1,044	0,008	139,037	8,203E-07	1,020	1,068
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,001	0,012	0,084	9,382E-01	-0,039	0,041
1L x 2L	-0,001	0,011	-0,060	9,558E-01	-0,034	0,033

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 115 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	58,510	0,011	5404,595	1,397E-11	58,476	58,544
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,695	0,008	221,071	2,041E-07	1,671	1,719
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	-0,001	0,013	-0,069	9,494E-01	-0,041	0,040
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	1,037	0,008	135,287	8,905E-07	1,013	1,062
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,001	0,013	0,089	9,346E-01	-0,039	0,042
1L x 2L	-0,001	0,011	-0,046	9,661E-01	-0,035	0,034

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 116 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	59,314	0,010	5717,107	1,180E-11	59,281	59,347
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,577	0,007	214,648	2,230E-07	1,554	1,600
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,000	0,012	0,000	9,999E-01	-0,039	0,039
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	1,211	0,007	164,781	4,928E-07	1,187	1,234
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,001	0,012	0,082	9,396E-01	-0,038	0,040
1L x 2L	-0,001	0,010	-0,096	9,293E-01	-0,034	0,032

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 117 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	53,936	0,011	5081,483	1,681E-11	53,902	53,970
(1) $\Delta T_{fq_entrada}$ (L)*	1,583	0,008	210,557	2,362E-07	1,559	1,607
$\Delta T_{fq_entrada}$ (Q)	0,000	0,012	-0,005	9,962E-01	-0,040	0,040
(2) $\Delta T_{p_entrada}$ (L)*	1,208	0,008	160,740	5,309E-07	1,184	1,232
$\Delta T_{p_entrada}$ (Q)	0,001	0,012	0,063	9,535E-01	-0,039	0,041
1L x 2L	-0,001	0,011	-0,104	9,240E-01	-0,035	0,033

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

C) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das vazões dos fluidos.

Tabela 118 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	T(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	63,001	0,012	5253,784	1,521E-11	62,963	63,039
(1) Δm_{fq} (L)*	0,925	0,008	108,893	1,707E-06	0,898	0,952
Δm_{fq} (Q)	-0,149	0,014	-10,548	1,820E-03	-0,194	-0,104
(2) Δm_p (L)*	-2,440	0,008	-287,312	9,298E-08	-2,467	-2,413
Δm_p (Q)	0,044	0,014	3,129	5,211E-02	-0,001	0,089
1L x 2L	0,021	0,012	1,726	1,828E-01	-0,017	0,059

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 119 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	56,335	0,224	251,25	1,390E-07	55,622	57,049
(1) Δm_{fq} (L)*	4,141	0,159	26,076	1,237E-04	3,635	4,646
Δm_{fq} (Q)*	-1,356	0,264	-5,138	1,428E-02	-2,195	-0,516
(2) Δm_p (L)*	-2,101	0,159	-13,234	9,323E-04	-2,607	-1,596
Δm_p (Q)	0,120	0,264	0,455	6,801E-01	-0,720	0,960
1L x 2L	0,041	0,224	0,181	8,677E-01	-0,673	0,754

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 120 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	63,597	0,008	7626,41	4,972E-12	63,571	63,624
(1) Δm_{fq} (L)*	0,464	0,006	78,530	4,551E-06	0,445	0,483
Δm_{fq} (Q)	-0,068	0,010	-6,918	6,193E-03	-0,099	-0,037
(2) Δm_p (L)*	-2,364	0,006	-400,225	3,440E-08	-2,382	-2,345
Δm_p (Q)	0,042	0,010	4,241	2,400E-02	0,010	0,073
1L x 2L	0,011	0,008	1,301	2,842E-01	-0,016	0,037

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 121 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	58,390	0,062	935,165	2,697E-09	58,192	58,589
(1) Δm_{fq} (L)*	1,760	0,044	39,812	3,487E-05	1,620	1,901
Δm_{fq} (Q)*	-0,469	0,073	-6,381	7,792E-03	-0,703	-0,235
(2) Δm_p (L)*	-2,011	0,044	-45,477	2,341E-05	-2,152	-1,870
Δm_p (Q)	0,081	0,073	1,103	3,507E-01	-0,153	0,315
1L x 2L	0,024	0,062	0,380	7,290E-01	-0,175	0,222

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 122 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	60,452	0,018	3285,586	6,218E-11	60,393	60,510
(1) Δm_{fq} (L)*	1,735	0,013	133,165	9,337E-07	1,694	1,777
Δm_{fq} (Q)	-0,272	0,022	-12,581	1,083E-03	-0,341	-0,203
(2) Δm_p (L)*	-2,568	0,013	-197,097	2,880E-07	-2,610	-2,527
Δm_p (Q)	0,050	0,022	2,331	1,020E-01	-0,018	0,119
1L x 2L	0,032	0,018	1,728	1,824E-01	-0,027	0,090

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear.

(Q) Parâmetro Quadrático.

Tabela 123 - Estimativa dos efeitos e interações das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Variável	Efeito	Desvio padrão	t(3)	p	Limite de confiança -95%	Limite de confiança 95%
Média.*	51,493	0,296	174,222	4,170E-07	50,553	52,434
(1) Δm_{fq} (L)*	6,961	0,209	33,255	5,977E-05	6,295	7,627
Δm_{fq} (Q)*	-2,094	0,348	-6,020	9,187E-03	-3,201	-0,987
(2) Δm_p (L)*	-2,183	0,209	-10,428	1,882E-03	-2,849	-1,517
Δm_p (Q)	0,137	0,348	0,392	7,209E-01	-0,970	1,243
1L x 2L	0,017	0,296	0,059	9,565E-01	-0,923	0,958

* Parâmetros estatisticamente significativos.

(L) Parâmetro Linear;

(Q) Parâmetro Quadrático.

X.8 Anexo VIII - Análise de Variância no Estudo da Influência das Variáveis Independentes sobre a Temperatura de Saída do Produto no TCP (T_{p_saida}).

A) PFCC com 25 ensaios – avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis.

Tabela 124 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	24,559	7	3,508	5420,37	2,61	2073,35
Resíduos	0,011	17	0,001			
Falta de Ajuste	0,011	17	0,001			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	24,570	24				

R²=0,999

Tabela 125 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	76,51	4	19,128	741,67	2,87	258,77
Resíduos	0,516	20	0,026			
Falta de Ajuste	0,516	20	0,026			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	77,03	24				

R²=0,993

Tabela 126 - Análise de variância no estudo dos efeitos variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal/F_{tab}}
Regressão	15,79	1	15,79	40,37	4,28	9,43
Resíduos	9,00	23	0,39			
Falta de Ajuste	9,00	23	0,39			
Erro Puro	0,00	0	0,00			
Total	24,79	24				

$R^2=0,637$

Tabela 127 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal/F_{tab}}
Regressão	34,600	4	8,650	1319,39	2,87	460,35
Resíduos	0,131	20	0,007			
Falta de Ajuste	0,131	20	0,007			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	34,731	24				

$R^2=0,996$

Tabela 128 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_p , Δm_{fq} , $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	32,309	4	8,077	331,02	2,87	115,50
Resíduos	0,488	20	0,024			
Falta de Ajuste	0,488	20	0,024			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	32,797	24				

R²=0,985

B) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos.

Tabela 129 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	7,933	1	7,933	163189,80	5,59	29185,54
Resíduos	3,403E-04	7	4,861E-05			
Falta de Ajuste	3,403E-04	7	4,861E-05			
Erro Puro	0,000	0	0			
Total	7,933	8				

R²=0,999

Tabela 130 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	7,952	1	7,952	163412,10	5,59	29225,30
Resíduos	3,407E-04	7	4,866E-05			
Falta de Ajuste	3,407E-04	7	4,866E-05			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	7,953	8				

$R^2=0,999$

Tabela 131 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	7,857	1,000	7,857	161776,90	5,59	28932,86
Resíduos	0,000	7,000	4,857E-05			
Falta de Ajuste	0,000	7,000	4,857E-05			
Erro Puro	0,000	0,000	0,000			
Total	7,857	8,000				

$R^2=0,999$

Tabela 132 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	7,874	1	7,874	154863,00	5,59	27696,35
Resíduos	0,000	7	5,084E-05			
Falta de Ajuste	0,000	7	5,084E-05			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	7,874	8				

R²=0,999

Tabela 133 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis $\Delta T_{fq_entrada}$ e $\Delta T_{p_entrada}$ sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	7,882	1	7,882	169694,40	5,59	30348,85
Resíduos	3,252E-04	7	4,645E-05			
Falta de Ajuste	3,252E-04	7	4,645E-05			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	7,883	8				

R²=0,999

C) PFCC com 9 ensaios – avaliação da influência das vazões dos fluidos .

Tabela 134 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	13,614	2	6,807	18009,60	5,41	3329,28
Resíduos	0,002	6	0,000			
Falta de Ajuste	0,002	6	0,000			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	13,616	8				

R²=0,999

Tabela 135 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída do ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	45,472	1	45,472	1954,07	5,41	361,23
Resíduos	0,163	7	0,023			
Falta de Ajuste	0,163	7	0,023			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	45,635	8				

R²=0,996

Tabela 136 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	11,573	3	3,858	2489,47	5,41	460,21
Resíduos	0,008	5	0,002			
Falta de Ajuste	0,008	5	0,002			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	11,581	8				

R²=0,999

Tabela 137 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da gema, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	14,570	2	7,285	2571,09	5,14	499,89
Resíduos	0,017	6	0,003			
Falta de Ajuste	0,017	6	0,003			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	14,587	8				

R²=0,999

Tabela 138 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência positiva da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	19,267	2	9,634	14948,08	5,41	2763,33
Resíduos	0,004	6	0,001			
Falta de Ajuste	0,004	6	0,001			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	19,271	8				

R²=0,999

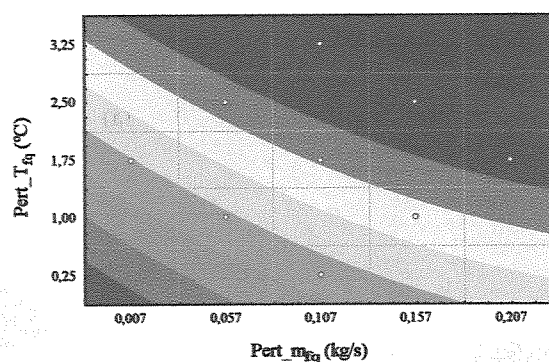
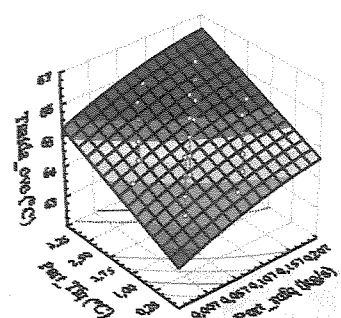
Tabela 139 - Análise de variância no estudo dos efeitos das variáveis Δm_{fq} e Δm_p sobre a temperatura de saída da clara de ovo, PFCC para tendência negativa da temperatura de saída.

Fonte de Variação	Soma Quadrática	Grau de Liberdade	Soma Quadrática Média	F _{calculado}	F _{tabelado}	F _{cal} /F _{tab}
Regressão	111,861	2	55,931	1216,53	5,41	224,89
Resíduos	0,276	6	0,046			
Falta de Ajuste	0,276	6	0,046			
Erro Puro	0,000	0	0,000			
Total	112,137	8				

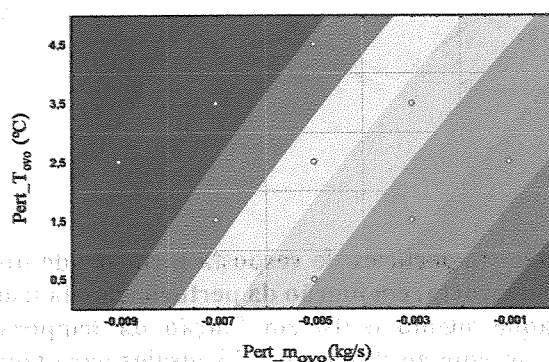
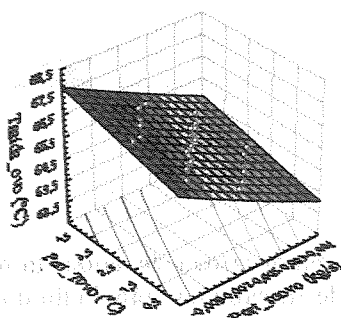
R²=0,998

X.9 Anexo IX – Superfícies de Resposta e Curvas de Nível da Temperatura de Saída do Produto

A) PFCC com 25 ensaios- avaliação da influência de todas as variáveis manipuláveis.



(a)



(b)

Figura 34 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída do ovo integral (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.

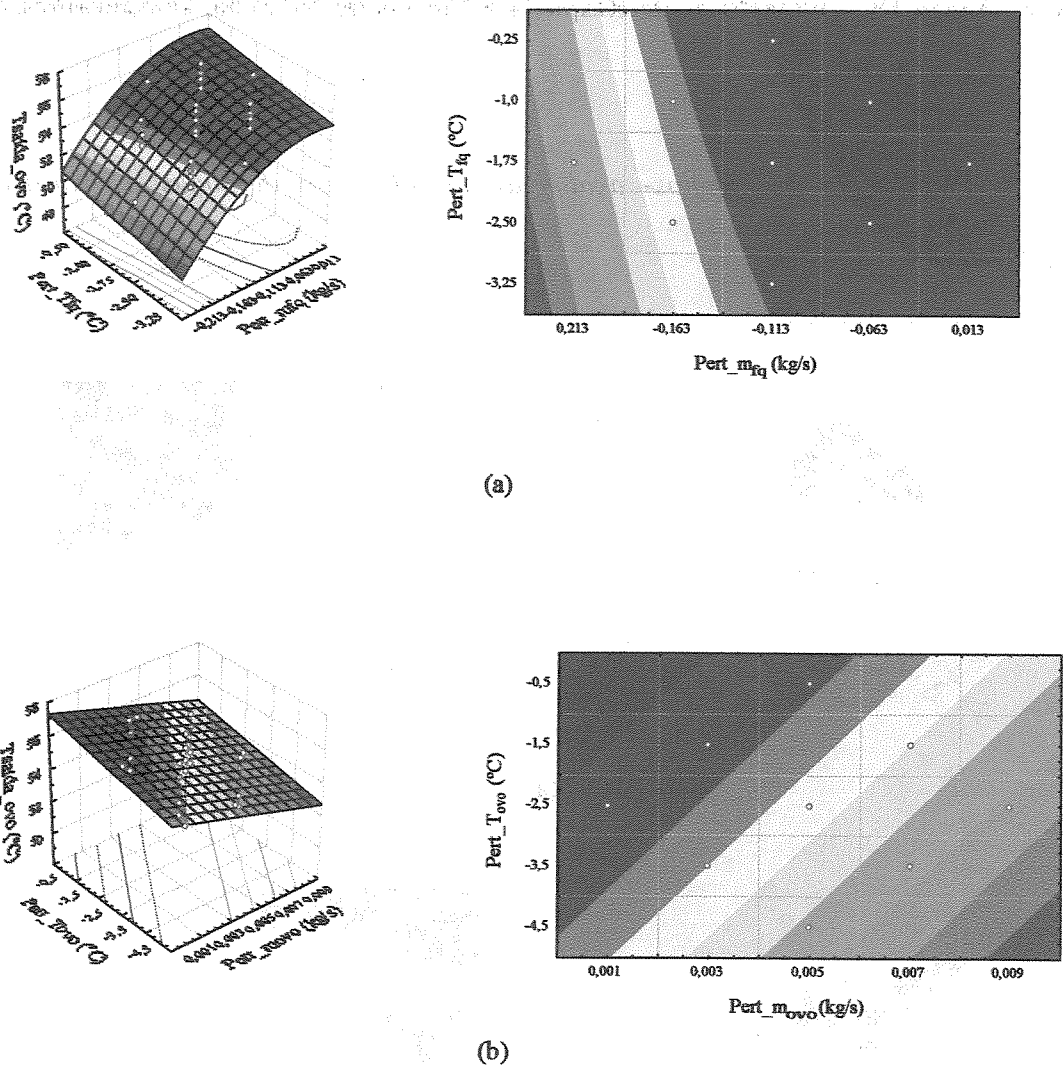
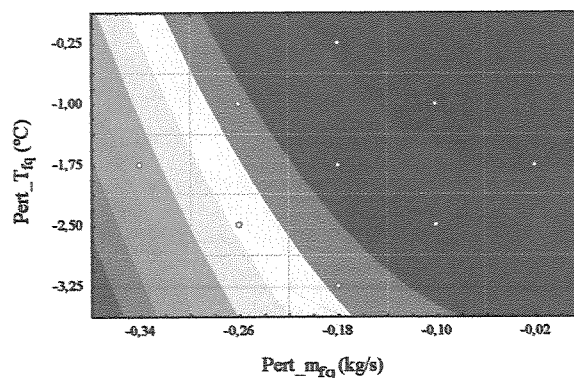
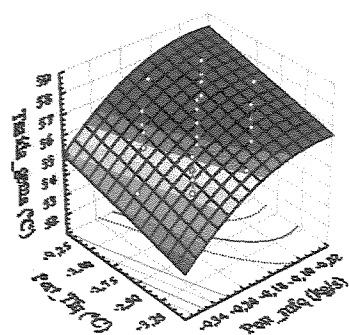
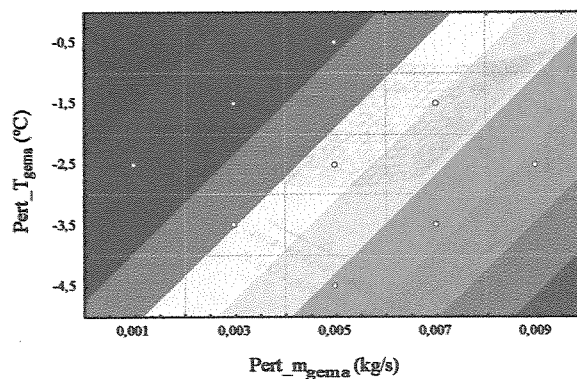
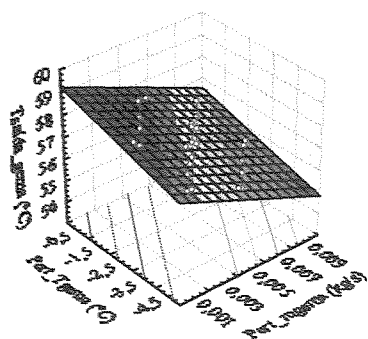


Figura 35 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída do ovo integral (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.

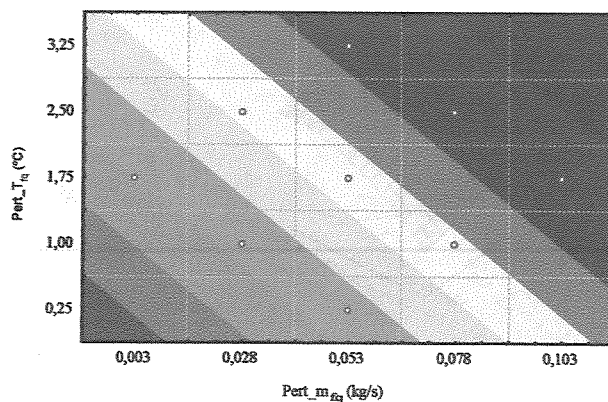
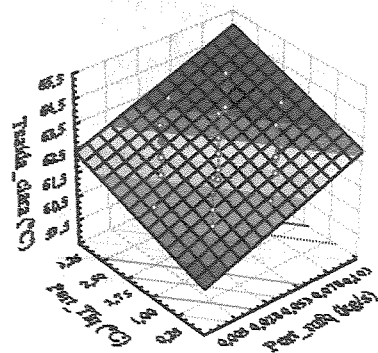


(a)

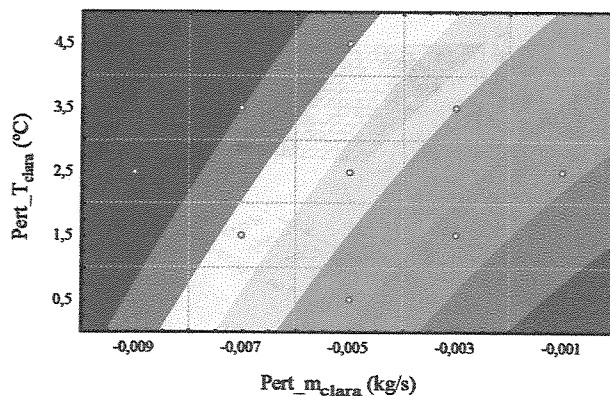
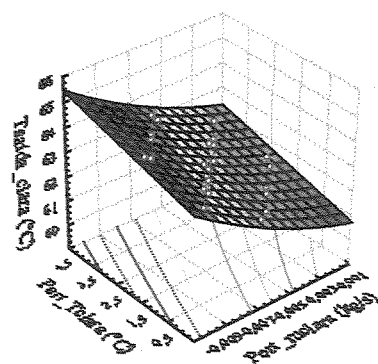


(b)

Figura 36 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída da gema de ovo (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da gema.



(a)



(b)

Figura 37 – Superfícies de resposta e curvas de nível para a temperatura de saída da clara de ovo (a) em função da perturbação da temperatura de entrada e vazão do fluido de aquecimento e (b) em função da temperatura de entrada e vazão do produto, referente ao PFCC com 25 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da clara.

B) PFCC com 9 ensaios- avaliação da influência das temperaturas de entrada dos fluidos.

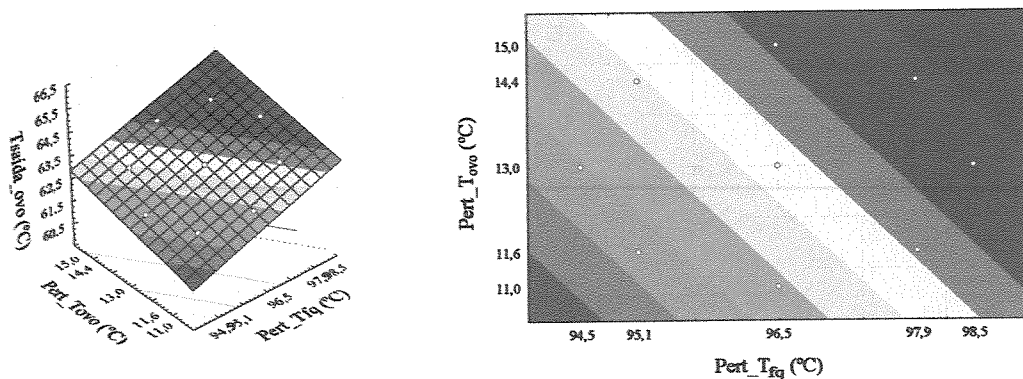


Figura 38 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.

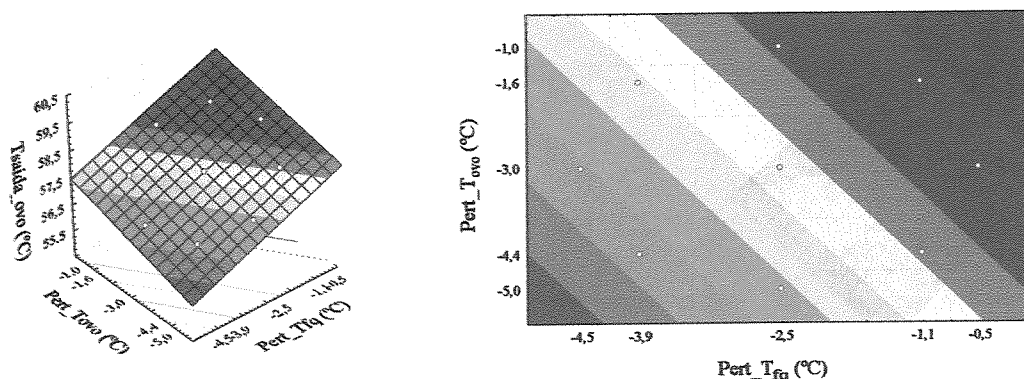


Figura 39 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.

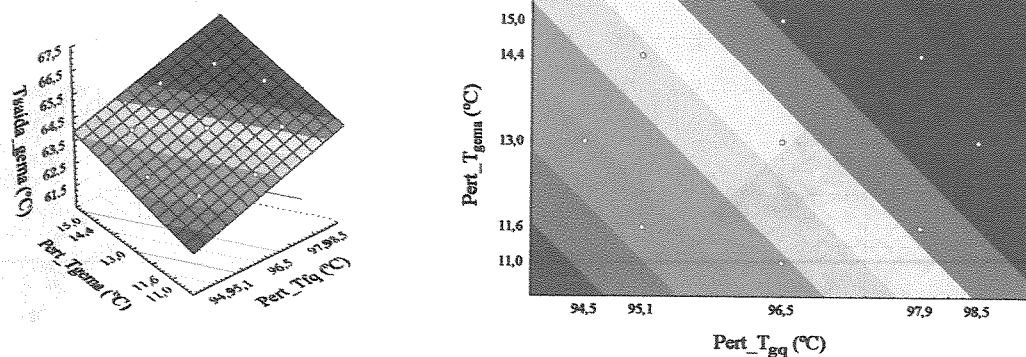


Figura 40 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

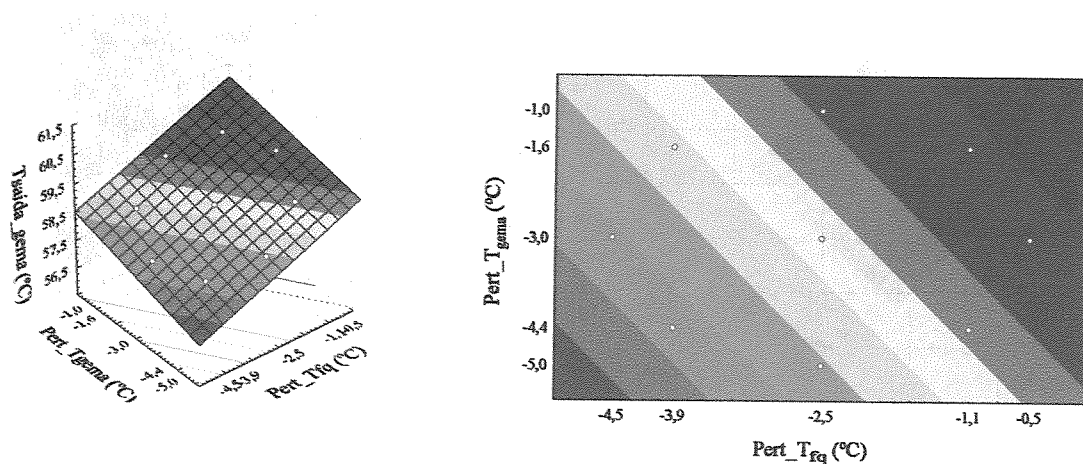


Figura 41 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da gema.

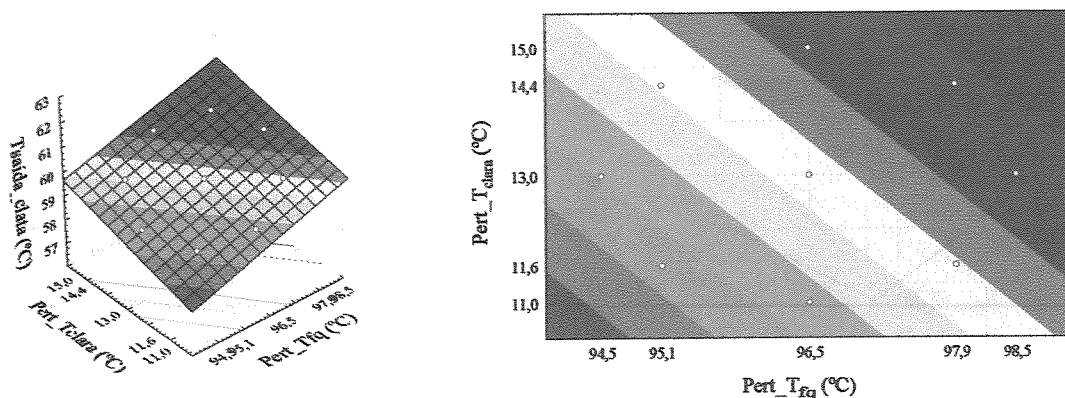


Figura 42 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da clara.

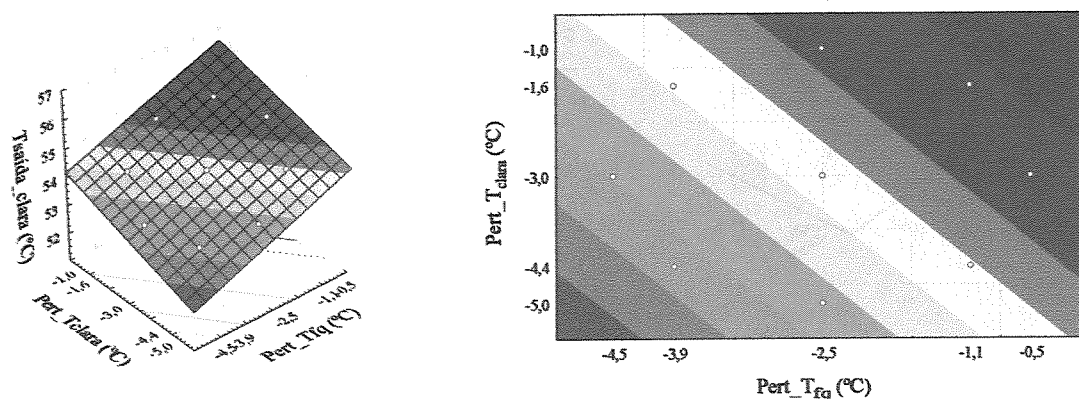


Figura 43 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das temperaturas de entrada do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da clara.

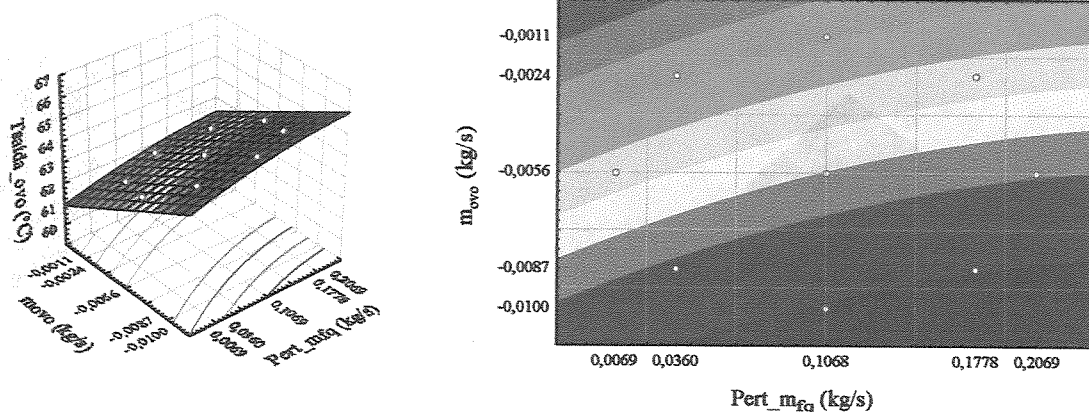


Figura 44 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída do ovo.

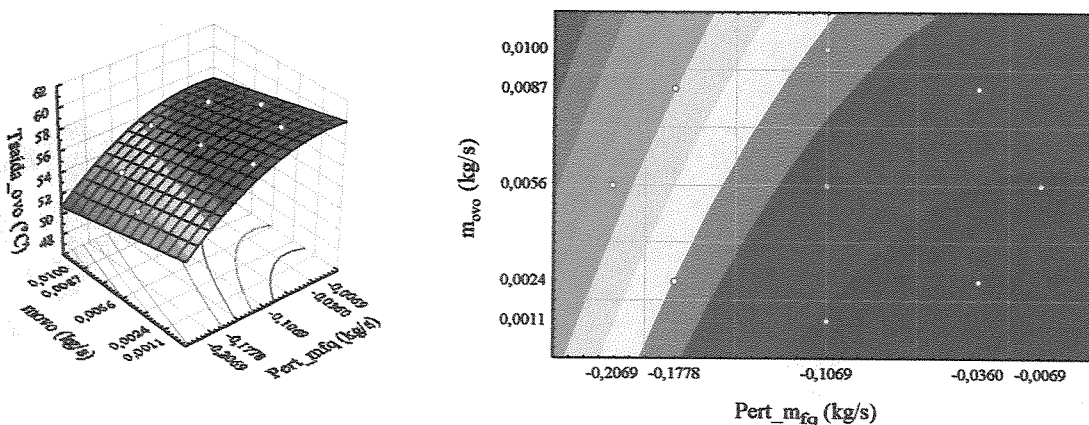


Figura 45 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída do ovo integral em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída do ovo.

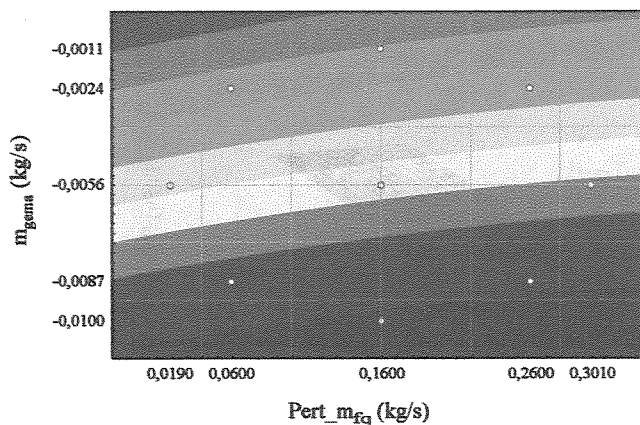
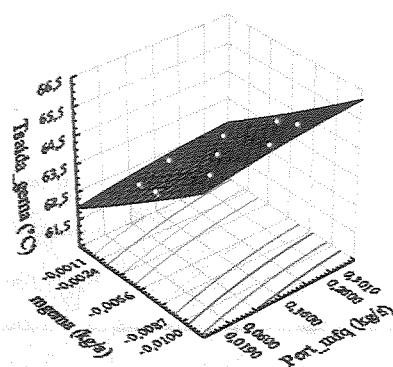


Figura 46 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

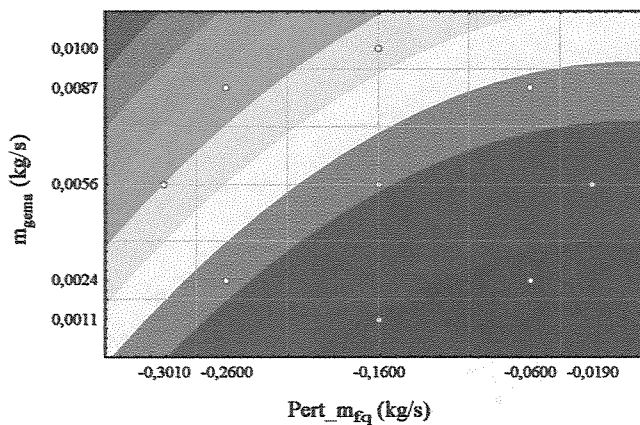
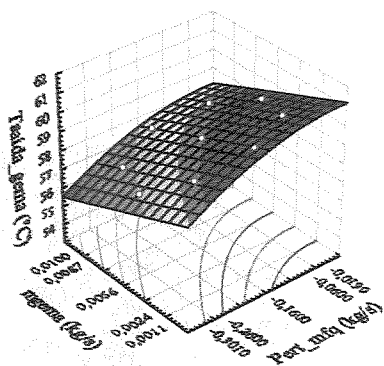


Figura 47 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da gema de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da gema.

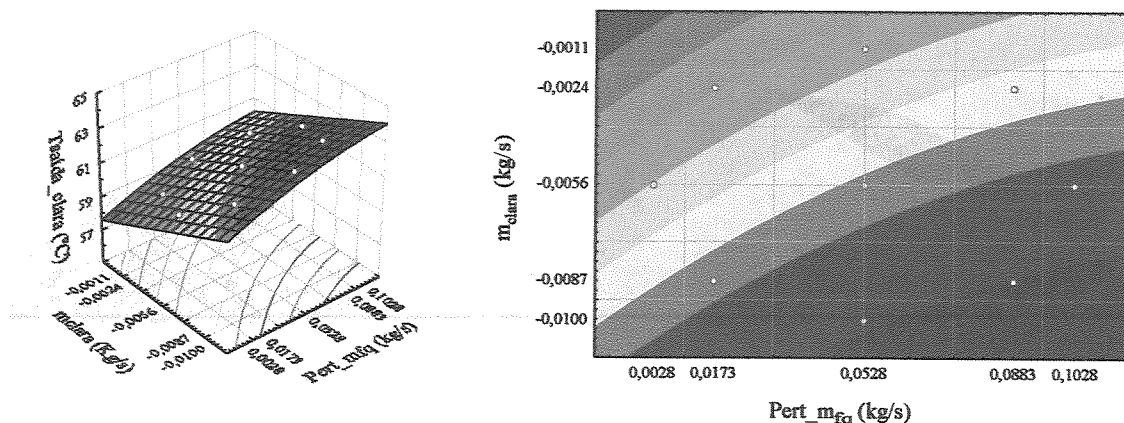


Figura 48 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência positiva da temperatura de saída da clara.

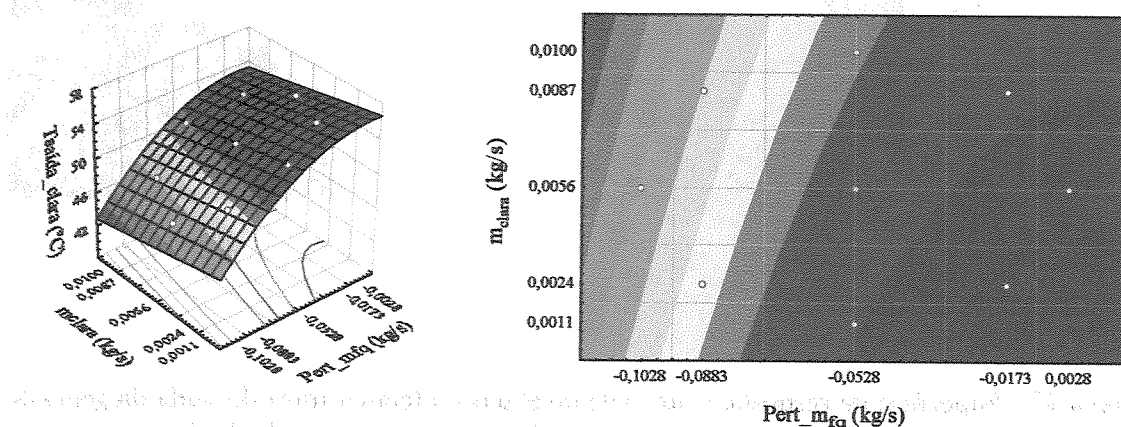


Figura 49 – Superfície de resposta e curva de nível para a temperatura de saída da clara de ovo em função das perturbações das vazões do produto e do fluido de aquecimento, referente ao PFCC com 9 ensaios para tendência negativa da temperatura de saída da clara.

X.10 Anexo X – Perturbações aplicadas nas variáveis vazão e temperatura de entrada do produto e fluido de aquecimento

Tabela 140 - Valores das perturbações aplicadas nas variáveis temperatura de entrada do produto e fluido quente e vazão do produto e fluido quente.

	$I_A = \Delta m_{fq} \text{ (kg/s)}$	$I_B = \Delta m_p \text{ (kg/s)}$	$I_A = \Delta T_{fq} \text{ (}^\circ\text{C)}$	$I_B = \Delta T_p \text{ (}^\circ\text{C)}$
Ovo + ¹	+0,1069	-0,0100	+2,5	+3,0
Ovo - ²	-0,1069	+0,0100	-2,5	-3,0
Gema + ¹	+0,1600	-0,0100	+2,5	+5,0
Gema - ²	-0,1600	+0,0100	-2,5	-5,0
Clara + ¹	+0,0528	-0,0100	+2,5	+3,0
Clara - ²	-0,0528	+0,0100	-2,5	-3,0

¹ O índice “+” se refere à tendência positiva da temperatura de saída do produto no TCP. ² O índice “-” se refere à tendência negativa da temperatura de saída do produto no TCP.