UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS

DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

FACULDADE DE ENGENHARIA DE ALIMENTOS

ANÁLISE DO PROCESSO DE EXTRUSÃO NA INDÚSTRIA DE 'PET-FOOD' PARA A APLICAÇÃO DE TÉCNICAS DE CONTROLE AVANÇADO

Alexandre Consul Mendes

Químico Industrial e

Engenheiro de Alimentos

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.

ientador

PARECER

Este exemplar corresponde à redação final da tese defendida por **Alexandre Consul Mendes** aprovada pela Comissão Julgadora em 26 de fevereiro de 2003.

Campinas, 26 de fevereiro de 2003.

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Junior
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, Fevereiro / 2003

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

UNICAMP

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

M522a

Mendes, Alexandre Consul
Análise do processo de extrusão na indústria de 'Pet-Food' para a aplicação de técnicas de controle avançado / Alexandre Consul Mendes. – Campinas, SP: [s.n.], 2003.

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

1.Controle. 2.*Extrusão. 4.Planejamento experimental. 5.Rações. I.Silveira Junior, Vivaldo. II.Universidade Estadual de Campinas.Faculdade de Engenharia de Alimentos. III.Título.

UNIDADE BC
Nº CHAMADA T/UNICAMP
M522a
V EX
TOMBO BC/ 53562
PROC. 124/03
C D
PREÇO R$ 11,00
DATA 02/05/03
Nº CPD

CM00182278-9

BIB ID 289237

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Ana Maria Frattini Fileti

Faculdade de Engenharia Química – UNICAMP

Prof. Dr. Celso Costa Lopes

Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP

Prof. Dr. Vivaldo Silveira Jr.

Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP

Prof. Dr. Yoon Kil Chang

Faculdade de Engenharia de Alimentos – UNICAMP

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE

AGRADECIMENTOS

Para a conclusão deste trabalho enalteco a inconfudível, relevante, confiável e produtiva ajuda oriunda do Prof Doutor Vivaldo Silveira Junior e da Mestre Marlei Roling Scariot.

Aqui também ratifico a predição que o meu tutor industrial Engenheiro Químico René Reck fez a respeito dos benefícios oriundos do mestrado para a atuação industrial e produção científica do profissional técnico.

René, agradeço profundamente a oportunidade que me deste e espero que continues onstentando essa visão inovadora e consciente do futuro. Do que depender das minhas ações, serei sempre um efeito catalítico para melhorar o nível de especialização de nossos profissionais, através do incentivo à perene atualização científica, exumando a ignorância e a mediocridade técnica do cenário industrial.

Na mesma esfera de importância agradeço aos demais membros da banca examinadora Prof. Dr. Ana Maria Frattini Fileti , Prof. Dr. Celso Costa Lopes e Prof. Dr. Yoon Kin Chang pela fundamental contribuição à melhoria e apresentação deste trabalho científico.

Finalmente agradeço a cada um dos contribuintes Brasileiros que tornam possível a manutenção da Universidade Pública como a UNICAMP, seleiro de qualidade educacional superior e responsável pela igual oportunidade ao ingresso no mundo acadêmico a todos os membros da população brasileira, não necessariamente baseado no seu poder aquisitivo.

Ao senhor meu DEUS ratifico agora mais do que nunca a certeza de que além de existir, ELE se tornou presente como fonte motivadora nas diversas etapas da produção deste trabalho científico.

ÍNDICE

COMENTÁRIOS DO AUTOR ..... *xxiv*

RESUMO ..... *xxv*

ABSTRACT ..... *xxvii*

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS *1*

I) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA *3*

I.1) CONCEITOS BÁSICOS 3
I.1.1) Considerações Gerais 3
I.1.2) Modelagens 5
I.1.3) Controle PID 6
I.1.4) Controle Adaptativo 7
I.1.5) Controle Robusto 7
I.1.6) Controle Preditivo 8
I.1.7) Controle Ótimo 8
I.1.8) Controle Inteligente 9
I.1.9) Tempo Ótimo Para Amostragem 9
I.2) SISTEMAS DINÂMICOS 10
I.2.1) Definição de Sistema Dinâmico 10
I.2.1.1) Função de Transferência 11
I.2.1.2) Tempo Morto 12
I.2.2) Resposta de um Sistema Linear Invariante 13
I.2.3) Sistemas Lineares 14
I.2.3.1) Sistemas de Primeira Ordem 14
I.2.3.1.1) Perturbação Degrau Para Sistemas Lineares de Primeira Ordem 14
I.2.3.2) Sistemas de Segunda Ordem 15
I.2.3.2.1) Perturbação Degrau Para Sistemas Lineares de Segunda Ordem 17
I.2.3.2.1.1) Sistema Super-Amortecido 17
I.2.3.2.1.2) Sistema Sub-Amortecido 18
I.2.3.2.1.3) Sistema Com Amortecimento Crítico 18
I.2.4) Sistemas de Ordem Superior 19
I.2.4.1) Vários Sistemas Lineares em Série 20
I.2.4.2) Limite Especial para Sistemas de Primeira Ordem em Série 21
I.2.4.3) Sistemas de Ordem Superior com Zeros 22
I.2.4.3.1) Resposta Degrau Unitário para Sistemas de Ordem 2 e 1 22
I.2.4.4) Sistemas Lineares com Resposta Inversa 24
I.2.5) Sistemas Não-lineares 26
I.2.5.1) Principais Não-Linearidades 28
I.2.5.1.1) Atrito 28
I.2.5.1.2) Valor Absoluto 29
I.2.5.1.3) Saturação 29
I.2.5.1.4) Zona Morta 29
I.2.5.1.5) Histerese 29
I.2.5.1.6) Controle de Duas – Três Posições 30
I.3) PARÂMETROS DO CONTROLADOR PID PARA SISTEMAS LINEARES 30
I.3.1) Características da Resposta Degrau 31
I.3.2) Estratégias de Controle 33
I.3.2.1) O Controlador *PID* 35
I.3.2.2) O controlador 'Model Free Adaptive' – *MFA* 38

I.3.3) Natureza do Conjunto de Variáveis para Aplicação do Controle 39
I.3.3.1) Sistemas *SISO* 40
I.3.3.2) Sistemas *MIMO* 40
I.4) EXTRUSÃO PARA 'PET FOOD' 41
I.4.1) Extrusor de Eixo (Helicóide) Simples 43
I.4.1.1) Características Dimensionais 43
I.4.1.2) Balanço Geral de Energia 45
I.4.1.3) Variáveis Manipuláveis 48
I.4.1.3.1) Pressão e Tensão 48
I.4.1.3.2) Avaliação da Temperatura e Trabalho de Eixo 52
I.4.1.3.3) Avaliação do Tempo de Residência (RTD) 53
I.4.1.3.4) Distribuição Granulométrica 56
II) MATERIAIS E MÉTODOS *56*

II.1) MATERIAIS 56
II.1.1) Equipamentos 56
II.1.2) Instrumentação 57
II.1.4) Composição das Receitas Avaliadas 61
II.2) METODOLOGIA 62
II.2.1) Teste Piloto 62
II.2.2) Considerações Estatísticas 64
II.2.2.1) Amostragem Laboratorial 67
II.2.3) Teste Industrial 71
II.2.3.1) Configuração do Algorítimo 72
II.2.3.2) Testes Experimentais 73
III) RESULTADOS E DISCUSSÕES *77*

III.1) TESTE PILOTO 77
III.1.1) Cálculos Empregados 79
III.1.1.1) Análise dos Principais Efeitos 81
III.1.2) Variáveis de Análise 82
III.1.2.1) Relação Temperatura e Pressão de Saída Versus Umidade e Densidade do Produto Extrusado 84
III.1.2.2) Normalização das Variáveis de Processo 88
III.1.3) Efeitos Individuais 96
III.1.3.1) Influência da Vazão de Vapor 96
III.1.3.2) Influência da Vazão de Umidade 98
III.1.3.3) Influência da Vazão de Farinha 99
III.1.3.4) Influência da Proporção Vapor / Umidade 100
III.1.3.5) Influência da Rotação do Helicóide 101
III.1.3.6) Variações nas Características Químicas da Matéria – Prima 102
III.1.4) Efeitos Múltiplos 105
III.1.4.1) Vazão de Vapor e de Umidade 105
III.1.4.2) Vazões de Vapor e Proporção Vapor / Umidade 109
III.1.4.3) Vazões de Vapor e Farinha 112
III.1.4.4) Vazão de Farinha e Umidade 115
III.1.4.5) Efeitos da Rotação do Eixo (Helicóide) do Extrusor (rpm) 118
III.1.4.6) Efeitos para a Camisa do Extrusor 125
III.1.5) Análise de Energias Específicas Envolvidas no Processo de Extrusão 127
III.1.5.1) Definição de Energia Mecânica Específica (*SME*) 132
III.1.5.2) Relações das Variáveis Manipulativas com a Energia Mecânica Específica (*SME*) 134
III.1.5.3) Relações das Variáveis Manipulativas com a Energia Térmica Específica (*STE*) 136
III.1.6) Modelo Multivariável para a Temperatura e a Pressão de Saída 137
III.1.6.1) Principais Influências para a Temperatura e a Pressão de Saída 139
III.1.7) Análise do Comportamento da Temperatura e Pressão nas Zonas do Extrusor 142
III.1.7.1) Temperatura ao Longo do Extrusor 142

III.1.7.2) Pressão ao Longo do Extrusor 144
III.1.8) Importância do Estudo do Processo de Extrusão para o Projeto do Controlador 145
III.1.9) Análise da Curva Resposta 146
III.1.9.1) Perturbações Individuais 147
III.1.9.1.1) Curva Resposta para a Receita *SC* 147
III.1.9.1.2) Curva Resposta para a Receita *PP* 150
III.1.9.1.3) Curva Resposta para a Receita *Wos* 152
III.1.9.1.4) Parâmetros PID Segundo o Método de Ziegler-Nichols 154
III.1.9.2) Perturbações Simultâneas 157
III.1.10) Importância da Análise da Curva Resposta para o Projeto do Controlador 160
III.2) TESTE INDUSTRIAL 162
III.2.1) Estudo do Processo 163
III.2.1.1) Proposição dos Ensaios 163
III.2.1.2) Resultados 164
III.2.1.3) Análises 165
III.2.2) Projeto do Controlador 170
III.2.2.1) Bases para a Definição do Algorítmo de Controle 170
III.2.2.2) Controladro *MIMO 2 X 2* 173
III.2.2.3) Sintonia do Controlador 177
III.2.2.4) Resultados Preliminares do Controle Adaptativo Neural 180
III.2.2.4.1) Fase I 180
III.2.2.4.2) Fase II 181
III.2.2.4.3) Fase III 182
IV) CONCLUSÃO *186*
V) TENDÊNCIAS FUTURAS *190*
VI) REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA *192*
VII) ANEXO I *197*
VIII) ANEXO II *201*
IX) ANEXO III *210*
X) ANEXO IV *219*
XI) ANEXO V *232*
XII) ANEXO VI *260*
XIII) ANEXO VII *283*
XIV) ANEXO VIII *303*
XV) ANEXO IX *308*
XVI) ANEXO X *336*

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Bloco Funcional de um Sistema Invariante no Tempo. 12
Figura 2: Resposta Adimensional de um Sistema de Segunda Ordem sem Zeros para uma Perturbação Degrau Unitário (Stephanopoulos, 1984). 19
Figura 3:Resposta Degrau Normalizada para um Sistema Estritamente Próprio Estável (Coelho, 1995). 33
Figura 4: Diferentes formas de controle P,D e I. 36
Figura 5:Curva Sigmoidal da Resposta de Processo. 36
Figura 6:Eixo do Extrusor Modelo PX-200. 45
Figura 7: Perfil de Pressão no Extrusor Rosca Simples (Mercier; Linko e Harper, 1989). 48
Figura 8: Esquema Proposto para Tempo de Residência (Yeh e Jaw, 1998). 54
Figura 9: Representação Esquemática da Instrumentação para o Conjunto Pré-Condicionador e Extrusor. 58
Figura 10: Conjunto Pré-Condicionador MLD4DDC e Extrusor X-85 utilizados no Teste Piloto. 59
Figura 11: Representação da Solução Ótima para a Vazão de Alimentação de Farinha Segundo as Curvas de Contorno. 67
Figura 12: Desenho Esquemático para a Coleta de Amostras para o Teste Piloto. 68
Figura 13: Região Operacional de (a) VM_{2I}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{UI}; (b) VM_{2I}, VM_{2U} e VM_{UI}; (c) VM_{2I}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U}; (d) VM_{UI}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U} para a Receita SC. 89
Figura 14: Região Operacional de (a) VM_{2I}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{UI}; (b) VM_{2I}, VM_{2U} e VM_{UI}; (c) VM_{2I}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U}; (d) VM_{UI}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U} para a Receita PP. 91
Figura 15: Região Operacional de (a) VM_{2I}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{UI}; (b) VM_{2I}, VM_{2U} e VM_{UI}; (c) VM_{2I}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U}; (d) VM_{UI}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U} para a Receita Wos. 92
Figura 16: Região Operacional de (a) VM_{2I}, VM_{4R} e VM_{UI}; (b) VM_{2I}, VM_{4R} e $VM_{1(2U)}$; (c) VM_{UI}, VM_{4R} e $VM_{1(2U)}$ para a Receita SC. 94
Figura 17: Região Operacional de (a) VM_{2I}, VM_{4R} e VM_{2U}; (b) VM_{UI}, VM_{4R} e VM_{2U}; (c) $VM_{1(2U)}$, VM_{4R} e VM_{2U} para a Receita SC. 95
Figura 18: Influência da Vazão de Vapor e Umidade para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 107
Figura 19: Influência da Vazão de Vapor e Umidade para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 108
Figura 20: Influência da Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 110
Figura 21: Influência da Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 111
Figura 22: Influência da Vazão de Vapor e Farinha para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 113
Figura 23: Influência da Vazão de Vapor e Farinha para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 114
Figura 24: Influência da Vazão de Umidade e Farinha para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 116
Figura 25: Influência da Vazão de Umidade e Farinha para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 117
Figura 26: Influência da Vazão de Vapor em e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 119
Figura 27: Influência da Vazão de Vapor e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 120
Figura 28: Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 121
Figura 29: Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 122
Figura 30: Influência da Vazão de Farinha e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 123
Figura 31: Influência da Vazão de Farinha e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 124
Figura 32: Curva de Reação Predita de Temperatura de Saída para o Ensaio R1(SC)D22. 158
Figura 33: Curva de Reação Predita de Pressão de Saída para o Ensaio R1(SC)D23. 159

Figura 34: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a Adição de Vapor em kg/h para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial. 165
Figura 35: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a Adição de Farinha em ton/h para a Variável Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial. 167
Figura 36: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a redução de Vapor e Água em kg/h para a Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial. 168
Figura 37: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a adição Vapor e Água em kg/h para a Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial. 169
Figura 38: Esquema para o Controlador MFA utilizado para o Teste Industrial. 173
Figura 39: Tendência do Processo em Malha Aberta para a Redução de Vapor e Água em kg/h para a Temperatura (^{0}C) e Pressão de Saída (psi) no Teste Industrial. 174
Figura 40: Esquema Interno do Controlador Model Free Adaptative (MFA) 175
Figura 41: Aplicação do Controle MIMO 2x2 para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída Fase I.. 180
Figura 42: Aplicação do Controle MIMO 2x2 para Temperatura (^{0}C)e Pressão (psi) de Saída Fase II.. 182
Figura 43: Aplicação do Controle MIMO 2x2 para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída Fase III. 183
Figura 44: Tela para as Perturbações Simultâneas Empregada no Teste Piloto. 197
Figura 45: Medidor Volumétrico de Densidade In-line utilizado no Teste Piloto. 198
Figura 46: Detalhe do Sistema Volumétrico de Alimentação de Farinha empregado no Teste Piloto..... 199
Figura 47: Detalhe do Pré-Condicionador Wenger MDL4DDC utilizado no Teste Piloto. 200
Figura 48: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido na Receita SC. 211
Figura 49: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido na Receita SC. 212
Figura 50: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão de Saída (psi) do Extrusor para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido na Receita PP. 213
Figura 51: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido na Receita PP. 214
Figura 52: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido na Receita Wos. 215
Figura 53: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido na Receita Wos. 216
Figura 54: Influência da Vazão de Vapor para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 220
Figura 55: Variação Transiente de Temperatura (^{0}C) de Saída para a Vazão de Vapor em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 221
Figura 56: Variação Transiente de Pressão (psi) de Saída para a Vazão de Vapor em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 222
Figura 57: Influência da Vazão de Umidade para a Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.. 223
Figura 58: Variação Transiente de Temperatura (^{0}C) de Saída para a Vazão de Água em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 224
Figura 59: Variação Transiente de Pressão (psi) de Saída para a Vazão de Água em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 225
Figura 60: Influência da Vazão de Farinha para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 226
Figura 61: Variação Transiente de Temperatura (^{0}C) de Saída para a Vazão de Farinha em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 227
Figura 62: Variação Transiente de Pressão (psi) de Saída para a Vazão de Farinha em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 228
Figura 63: Influência da Proporção Vapor / Umidade para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 229
Figura 64: Influência da Rotação do Helicóide em rpm para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 230
Figura 65: Variação da Matéria – Prima em (%) de Umidade, Proteína, Lipídio, Carboidratos e Cinzas para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 231

Figura 66: Relação entre a Vazão de Farinha em kg/h e Rotação do Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 233
Figura 67: Relação entre a Vazão de Farinha em kg/h e Torque em kW.s para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 234
Figura 68: Relação entre o Torque em kW.s e a Rotação do Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 235
Figura 69: Relação da Vazão de Farinha em kg/h e Rotação do Helicóide em rpm e o Torque kW.s na Energia Mecânica Específica (SME) para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 236
Figura 70: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Densidade em kg/hL do Produto Extrusado Úmido para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 237
Figura 71: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 239
Figura 72: Relação entre SME e STE em kJ/kg para a (a,b) Densidade em kg/hL do Produto Extrusado Úmido – Receita SC. 243
Figura 73: Relação entre SME e STE em kJ/kg para a (a,b) Densidade em kg/hL e (c,d) Umidade em % do Produto Extrusado Úmido – Receita PP. 244
Figura 74: Relação entre SME e STE em kJ/kg para a (a,b) Densidade em kg/hL e (c,d) Umidade em % do Produto Extrusado Úmido – Receita Wos. 245
Figura 75: Variação da SME e STE em kJ/kg para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 246
Figura 76: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura (^{0}C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 247
Figura 77: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 248
Figura 78: Relação entre a Vazão de Água e Farinha em kg/h para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 249
Figura 79: Relação entre a Vazão de Vapor e Farinha em kg/h para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 250
Figura 80: Relação entre a Vazão de Vapor e Água em kg/h para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 251
Figura 81: Relação entre a Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 252
Figura 82: Relação entre a Vazão de Vapor em kg/h e Rotação de Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 253
Figura 83: Relação entre a Vazão de Água em kg/h e Rotação de Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 254
Figura 84: Relação entre a Vazão de Farinha em kg/h e Rotação de Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 255
Figura 85: Relação entre a Vazão de Água e Farinha em kg/h para a Energia Térmica Específica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 256
Figura 86: Relação entre a Vazão de Vapor e Farinha em kg/h para a Energia Térmica Específica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 257
Figura 87: Relação entre a Vazão de Vapor e Água em kg/h para a Energia Térmica Específica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 258
Figura 88: Relação entre a Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Energia Térmica Específica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos. 259
Figura 89: Diagrama de Pareto das Variáveis Manipulativas para a (a) Temperatura (^{0}C) e (b) Pressão (psi) de Saída na receita SC. 261
Figura 90: Diagrama de Pareto das Variáveis Manipulativas para a (a) Temperatura (^{0}C) e (b) Pressão (psi) de Saída na Receita PP. 262
Figura 91: Diagrama de Pareto das Variáveis Manipulativas para a (a) Temperatura (^{0}C) e (b) Pressão (psi) de Saída na receita Wos. 263
Figura 92: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Vazão de Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Vapor e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita SC. 264
Figura 93: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita SC. 265

Figura 94: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Vapor em e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita SC. 266
Figura 95: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Proporção Vapor / Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Proporção Vapor / Umidade para a Pressão (psi) de Saída na Receita SC. 267
Figura 96: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide e (c e d) Influência da Rotação do Helicóide e Proporção vapor / Umidade para a Pressão (psi) de Saída na Receita SC. 268
Figura 97: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Vapor e Farinha para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP. 269
Figura 98: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Rotação do Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Vapor e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP. 270
Figura 99: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Farinha e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP. 271
Figura 100: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Proporção Vapor / Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Farinha e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP. 272
*Figura 101: (a e b) Influência da Vazão de Farinha e Proporção Vapor / Umidade e (c e d) Influência da Rotação do Helicóide e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP.*273
Figura 102: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Proteína e (c e d) Influência da Vazão de Lipídio e Umidade para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP. 274
Figura 103: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Farinha e (c e d) Influência da Vazão de Lipídio e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP. 275
Figura 104: (a e b) Influência da Vazão de Proteína e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Proteína e Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP. 276
Figura 105: (a e b) Influência da Vazão de Proteína e Rotação de Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP. 277
Figura 106: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Rotação de Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Farinha e Rotação de Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP. 278
Figura 107: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Farinha para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita Wos. 279
Figura 108: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Lipídio e Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita Wos. 280
Figura 109: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Rotação de Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Rotação de Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita Wos. 281
Figura 110: (a e b) Influência da Vazão Umidade e Farinha e (c e d) Influência da Rotação de Helicóide e Vazão de Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita Wos. 282
Figura 111: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 205 kg/h , (b) 245 kg/h e (c) 125 kg/h para a Receita SC. 284
Figura 112: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita PP. 285
Figura 113: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita Wos. 286
Figura 114: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 22,5 kg/h , (b) 37,5 kg/h e (c) 52,5 kg/h para a Receita SC. 287
Figura 115: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita PP. 288
Figura 116: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita Wos. 289
Figura 117: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 34 kg/h , (b) 46 kg/h e (c) 58 kg/h para a Receita SC. 290
Figura 118: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita PP. 291
Figura 119: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita Wos. 292
Figura 120: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 205 kg/h , (b) 245 kg/h e (c) 125 kg/h para a Receita SC. 293
Figura 121: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita PP. 294

Figura 122: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita Wos. 295
Figura 123: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 22,5 kg/h , (b) 37,5 kg/h e (c) 52,5 kg/h para a Receita SC. 296
Figura 124: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita PP. 297
Figura 125: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita Wos. 298
Figura 126: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 34 kg/h , (b) 46 kg/h e (c) 58 kg/h para a Receita SC. 299
Figura 127: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita PP. 300
Figura 128: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita Wos. 301
Figura 129: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 125 kg/h na Receita SC. 309
Figura 130: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 205 kg/h na Receita SC. 309
Figura 131: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 245 kg/h na Receita SC. 310
Figura 132:(a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 125 kg/h na Receita SC. 310
Figura 133: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 205 kg/h na Receita SC. 311
Figura 134: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 245 kg/h na Receita SC. 311
Figura 135: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 37,5 kg/h na Receita SC. 312
Figura 136: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 52,5 kg/h na Receita SC. 312
Figura 137: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 22,5 kg/h na Receita SC. 313
Figura 138: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 37,5 kg/h na Receita SC. 313
Figura 139: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 52,5 kg/h na Receita SC. 314
Figura 140: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 22,5 kg/h na Receita SC. 314
Figura 141: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 34 kg/h na Receita SC. 315
Figura 142: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 46 kg/h na Receita SC. 315
Figura 143: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 58 kg/h na Receita SC. 316
Figura 144: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 34 kg/h na Receita SC. 316
Figura 145: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 46 kg/h na Receita SC. 317
Figura 146: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 58 kg/h na Receita SC. 317
Figura 147: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita PP. 318
Figura 148: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita PP. 318
Figura 149: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h na Receita PP. 319

Figura 150: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita PP. 319
Figura 151: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita PP. 320
Figura 152: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h na Receita PP. 320
Figura 153: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita PP. 321
Figura 154: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita PP. 321
Figura 155: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita PP. 322
Figura 156: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita PP. 322
Figura 157: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita PP. 323
Figura 158: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita PP. 323
Figura 159: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita PP. 324
Figura 160: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita PP. 324
Figura 161: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita PP. 325
Figura 162: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita PP. 325
Figura 163: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita PP. 326
Figura 164: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita PP. 326
Figura 165: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h na Receita Wos. 327
Figura 166: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita Wos. 327
Figura 167: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita Wos. 328
Figura 168: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h nà Receita Wos. 328
Figura 169: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita Wos. 329
Figura 170: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita Wos. 329
Figura 171: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita Wos. 330
Figura 172: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita Wos. 330
Figura 173: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita Wos 331
Figura 174: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita Wos. 331
Figura 175: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita Wos. 332
Figura 176: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita Wos. 332
Figura 177: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita Wos. 333

Figura 178: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita Wos. *333*
Figura 179: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita Wos. *334*
Figura 180: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita Wos. *334*
Figura 181: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita Wos. *335*
Figura 182: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita Wos. *335*
Figura 183: Tela para o Bloco Funcional de Controle MIMO de Temperatura no Teste Industrial..... *336*
Figura 184: Tela para o Bloco Funcional de Controle MIMO de Pressão no Teste Industrial. *337*
Figura 185: Exemplo do Sistema Feedforward Empregado junto ao Controle ModelFree Adaptive (MFA).338

ÍNDICE DE QUADROS

Quadro 1: Métodos de Sintonia para Controladores PID (Stephanopoulos, 1984) 37
Quadro 2: Emprego de Extrusores para Diferentes Aplicações (Mercier; Linko e Harper, 1989). 47
Quadro 3: Instrumentação para os Testes Piloto e Industrial 56
Quadro 4: Receitas Empregadas para os Testes Piloto e Industrial. 61
Quadro 5: Conjunto de Variáveis Empregadas para o Teste Piloto. 64
Quadro 6: Níveis para as Receitas usadas no Ensaio de Perturbações Simultâneas no Teste Piloto. 65
Quadro 7: Esquema das Análises Físico – Químicas Realizadas para o Teste Piloto. 70
Quadro 8: Esquema das Variáveis para o Teste Industrial. 71
Quadro 9: Valores Estacionários para a Qualidade do Produto Extrusado Úmido no Teste Piloto. 78
Quadro 10: Variação das Receitas Utilizadas para o Teste Piloto. 82
Quadro 11: Resumo dos Principais Efeitos Isolados para as Variáveis Manipulativas. 104
Quadro 12: Resumo dos Principais Efeitos Qualitativos para Pertubações Múltiplas. 126
Quadro 13: Efeitos Relacionados para a SME. 134
Quadro 14: Efeitos Relacionados para a STE. 136
Quadro 15: Efeitos Significativos para a Temperatura e Pressão nas Receitas SC, PP e Wos. 138
Quadro 16: Comparação dos Efeitos Isolados e Múltiplos para a Temperatura e Pressão de Saída. 140
Quadro 17: Parâmetros PID segundo Ziegler Nichols para a Temperatura de Saída. 154
Quadro 18: Parâmetros PID segundo Ziegler Nichols para a Pressão de Saída 156
Quadro 19: Resumo das Variáveis para a Curva Sigmoidal Experimental do Teste Piloto 161
Quadro 20: Perturbações SISO para o Teste Industrial. 164
Quadro 21: Variáveis Manipulativas e de Processo para a Receita SC. 201
Quadro 22: Análises Físico–Químicas para a Receita SC. 202
Quadro 23: Variáveis Manipulativas e de Processo para a Receita PP. 203
Quadro 24: Análises Físico–Químicas para a Receita PP. 204
Quadro 25: Variáveis Manipulativas e de Processo para a Receita Wos. 205
Quadro 26: Análises Físico–Químicas para a Receita Wos. 206
Quadro 27: Resumo das Variáveis Normalizadas para a Receita SC. 207
Quadro 28: Resumo das Variáveis Normalizadas para a Receita PP. 208
Quadro 29: Resumo das Variáveis Normalizadas para a Receita Wos. 209
Quadro 30: Análise de Variância para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido – Receita SC. 217
Quadro 31: Análise de Variância para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido – Receita PP. 217
Quadro 32: Análise de Variância para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido – Receita Wos. 217
Quadro 33: Análise de Variância para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido – Receita SC. 218
Quadro 34: Análise de Variância para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido – Receita PP. 218
Quadro 35: Análise de Variância para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido – Receita Wos. 218
Quadro 36: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Densidade em kg/hL do Produto Extrusado Úmido - Receita SC. 238
Quadro 37: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Densidade kg/hL do Produto Extrusado Úmido - Receita PP. 238
Quadro 38: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Densidade kg/hL do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos. 238
Quadro 39: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido - Receita SC. 240
Quadro 40: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido - Receita PP. 240
Quadro 41: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos. 240
Quadro 42: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura em ^{0}C do Produto Extrusado Úmido - Receita SC. 241
Quadro 43: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura em ^{0}C do Produto Extrusado Úmido - Receita PP. 241
Quadro 44: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura em ^{0}C do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos. 241

Quadro 45: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Pressão em psi do Produto Extrusado Úmido - Receita SC. 242
Quadro 46: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Pressão em psi do Produto Extrusado Úmido - Receita PP. 242
Quadro 47: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Pressão em psi do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos. 242
Quadro 48: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Farinha em kg/h na Receita SC. 303
Quadro 49: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Vapor em kg/h na Receita SC. 303
Quadro 50: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Água em kg/h na Receita SC. 304
Quadro 51: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Farinha em kg/h na Receita PP. 304
Quadro 52: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Vapor em kg/h na Receita PP. 305
Quadro 53: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Água em kg/h na Receita PP. 305
Quadro 54: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Farinha em kg/h na Receita Wos. 306
Quadro 55: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Vapor em kg/h na Receita Wos. 306
Quadro 56: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Água em kg/h na Receita Wos. 307

NOMENCLATURA

Símbolo	Descrição	Unidades
Cp	Constante estatística de processo	-
CpK	Constante estatística de processo	-
K_E	Ganho proporcional de um sistema	-
T_i	Tempo integrativo	s
T_d	Tempo derivativo	s
$U(t)$	Função genérica de entrada em um sistema de controle	-
$y(t)$	Função genérica de saída em um sistema de controle	-
k	Constante de proporcionalidade para a relação entre $y(t)$ e $u(t)$	-
$v(t)$ e $q(t)$	Funções variáveis genéricas	-
a_n, d_m, a_0, b_0, w	Coeficientes de funções polinomiais genéricas	-
p	Derivada temporal do termo variável de uma função genérica	-
$G(p)$	Função de transferência de um processo genérico	-
A_1, A_2	Termos representativos para frações parciais	-
$s = \sigma + \omega j$	Coeficientes da variável complexa s	-
T	Valor de tempo t específico	-
$G(s)$	Função de Transferência no domínio Laplaciano	-
$U(s) = £[u(t)]$	Transformada de Laplace	-
τ	Tempo morto genérico de um processo	s
s	Pólo de um polinômio característico	1/s
Zn	Zeros de um polinômio característico	-
$Y_L(s)$	Resposta livre de um sistema qualquer	-
$Y_F(s)$	Resposta forçada de um sistema qualquer	-
ω_n	Período de oscilação de um sistema	-

ζ	Fator de amortecimento de um sistema	-
β_n	Constante para um istema linear	-
Kp	Ganho do sistema (2)	-
Q_1 , Q_0	Constantes para a representação do polinômio característico	-
ξ	Zero para funções de sistemas de ordem superior	-
α	Área de relutância associada a análise de sistemas lineares	
J	Termo que representa o fator de relutância inerente em sistemas de ordem supeior	-
tm	Tempo de inversão para processos com resposta inversa	-
η	Valor específico de um zero ξ	-
μ	Relação entre um tempo específico de um pólo s e um zero ξ	-
$\delta(t)$	Solução desconhecida de um processo não-linear	-
R_0	Amplitude de uma perturbação degrau	-
t_d, t_m	Tempo de atraso na curva de análise de controladores	s
t_r	Tempo de subida na curva de análise de controladores	s
t_P	Instante de pico na curva de análise de controladores	-
M_P	Sobre sinal máximo na curva de análise de controladores	-
M_0	Ultrapassagem máxima	-
Lp	Tempo de retrocesso	s
t_S	Tempo de acomodação para análise de controladores	s
N_s	Número de oscilações até o tempo de acomodação	-
Y_{max}	Amplitude um oscilação senoidal	-
P	Controle Proporcional	-
I	Controle Integrativo	-
D	Controle Derivativo	-
$e(t)$	Comportamento de erro do processo em função do tempo	-

σ_d	Tempo derivativo	s
σ_i	Tempo integral	s
α	Tempo morto aparente	s
Pu	Parâmetro para avaliação de controladores *ZIEGLER-NICHOLS*	-
K_{cu}	Parâmetro para avaliação de controladores *ZIEGLER-NICHOLS*	-
Kc	Ganho do sistema (3)	-
Ym	Valor da curva de resposta no estado estacionário	-
S	Inclinação da curva resposta de um sistema para controle	-
μV	Dissipação Viscosa	kJ/kg
Q	Transferência térmica no extrusor pela camisa de refrigeração	kJ/kg
m_S	Vazão de vapor no pré-condicionador	kg/h
λ	Calor latente de vaporização	kJ/kg. ^{o}C
m	Vazão de alimento no extrusor	kg/h
τ_{ZY}	Tensor no extrusor na direção *Y* ao longo do escoamento	Pa.m/s
τ_{XY}	Tensor no extrusor na direção *Y* transversal ao escoamento	Pa.m/s
μ	Viscosidade da massa no extrusor	Pa.s
E	Energia total no extrusor	kJ/kg
P	Pressão da massa no extrusor	kPa
V	Velocidade na massa no extrusor	m/s
U_z	Velocidade relativa em z à parede do extrusor	m/s
U_x	Velocidade relativa em x à parede do extrusor	m/s
D	Diâmetro do parafuso	m
N	Velocidade de rotação do parafuso	rpm
H	Distância eixo parede do extrusor em coordenada retangular	m
W	Largura do canal do extrusor	m
F_d	Correção para escoamento *drag flow* (geometria placa plana)	-

FP	Correção para pressão no extrusor (geometria placa plana)	-
a	Raio de controle no extrusor	m
Z	Comprimento do extrusor	m
P_d	Pressão na área de corte do extrusor	kPa
k_C	Resistência na área de corte do extrusor	kPa
θ	Inclinação dos elos do eixo do extrusor	radianos
Rd	Raio de corte do extrusor	m
L	Comprimento do corte (na matriz do extrusor)	m
∇P	Queda de pressão na área de corte do extrusor	kPa
e	Correção em radianos para a área de corte	-
T	Temperatura na área de corte do extrusor	°C
He	Entrada de calor para equação de temperatura	kJ/kg
C	Saída de calor por camisa de refrigeração no extrusor	kJ/kg
W_k	Trabalho de eixo no extrusor	kW/kg
t	Tempo	s
$a_{T1}(k)$, $a_{T2}(k)$, $a_{T3}(k)$, $b_C(k)$, $b_{He}(k)$, $\delta_1(k)$, $\delta_2(k)$, $\delta_3(k)$, $\sigma(k)$	Coeficientes para predição da temperatura na zona de corte do extrusor	-
d_C, d_{He} e d_{Wk}	Tempos mortos associados com C, He e W_k	s
ω	Interferência na equação da temperatura	-
k	Número inteiro na equação de temperatura	-
b_M, a_{kw1}, a_{wk2}, C_k	Coeficientes para predição da pressão na zona de corte do extrusor	-
M	Umidade da massa extrusada	%
d_M	Tempo morto associado à umidade	s
$e(k)$	Interferência na equação de trabalho do eixo	-
b	Fração de vazão do *CSTR* para o volume morto	-

C_d	Concentração do marcador no volume morto	kg/m^3
C_{in}	Concentração inicial no *PFR* de marcador	kg/m^3
C_0	Concentração de saída no *CSTR* do marcador	kg/m^3
d	Fração do volume morto no *CSTR*	m^3
P_F	Fração do *PFR*	-
P_{Ft}	Tempo de escoamento do marcador no *PFR*	s
Vl	Volume total do extrusor	m^3
q	Taxa volumétrica de matéria-prima	m^3/h
SME	Energia Mecânica Específica	kJ/kg
STE	Energia Térmica Específica	kJ / kg
α	Pontos axiais de um planejamento estatístico	-
VM1	Vazão de farinha	kg/h
VM2	Vazão de vapor	kg/h
VM3	Vazão de água	kg/h
VM4	Rotação do helicóide	rpm
C_H	Constante para avaliação dos parâmetros da curva sigmoidal	-
VP1	Temperatura de Saída do Extrusor	°C
VP2	Pressão de Saída do Extrusor	psi
VP3	Densidade do produto Úmido	hL/kg
VP4	Torque medido no extrusor	kW.s
VP5	Termo que representa *SME*	kJ/kg
VP6	Termo que representa *STE*	kJ / kg
VP7	Temperatura Zona 2 do extrusor	°C
VP8	Temperatura Zona 3 & 4 do extrusor	°C
VP9	Temperatura Zona 5 do extrusor	°C

$VP10$	Temperatura Zona 6 do extrusor	°C
$VP11$	Pressão Zona 5 do extrusor	psi
$VP12$	Pressão Zona 6 do extrusor	psi
M_T	Torque relacionado ao helicóide	kW.s
FR	Farinha de alimentação	kg/h
SS	Rotação do helicóide	rpm
T_q	Percentual de torque para o extrusor	%
P_{er}	Potência do extrusor	Hp
ω_{er}	Rotação do helicóide	rpm
M_{Fw}, M_{Ff}, M_{Fp}, M_{Fa}, M_{Fc}, M_S, M_W	Vazões mássicas de umidade, lipídio, proteína, cinzas, carboidratos, vapor e água adicionados ao pré-condicionador respectivamente.	kg/h
M_{LS}, M_D	Perda de vapor e descarga de farinha do pré-condicionador	kg/h
Q_{Fw}, Q_{Ff}, Q_{Fp}, Q_{Fa}, Q_{Fc}, $\Delta H_S, \Delta H_W, Q_{mix}$	Energia térmica associada a umidade, lipídios, protéina, cinzas, carboidratos, a entalpia do vapor, a entalpia da água e a transferência de energia pela mistura mecânica respectivamente	kJ
$\Delta H_{LS}, \overline{Q_D}, Q_E, \Delta H_R$	Consumo de energia pela entalpia de vapor perdido, entalpia ponderada para a vazão de descarga do pré – condicionador, energia térmica transferida para o ambiente e entalpia consumida na reação química respectivamente	kJ
VM_{21}	Variação da vazão de vapor com relação a vazão de farinha a base seca	
VM_{U1}	Variação da vazão de umidade com relação a vazão de farinha a base seca	
VM_{2U}	Variação da vazão de vapor com relação a vazão de umidade	
$VM_{1(2U)}$	Variação da vazão de farinha a base seca com relação a soma da variação de vapor e água	
VM_{4R}	rotação do helicóide	rpm
VM_{1L}	Vazão de alimentação de farinha somada a adição de lipídio	kg/h
UM_F	Vazão de umidade da farinha de alimentação	kg/h

VM_{4EST}	Valor de rotação do helicóide no estado estacionário	kg/h
μ_a	Viscodidade aparente	Pa.s
$\gamma, X, M, \Delta E$	Parâmetros de análise para viscosidade aparente	-
A, a_2, a_3 e H	Constantes associadas ao cálculo de viscosidade aparente	-
SS, df, MS, f, p	Valores associados para o cálculo da tabela *ANOVA*	-
P_S	Pressão de saída	psi
D_c	Valor de condutividade na saída do extrusor	kJ/kg
μ	Viscosidade aparente para o cálculo de pressão de saída	Pa.s
γ, μ, n	Tensor de cisalhamento, viscosidade e coeficiente para fluidos pseudoplásticos respectivamente, empregados no cálculo de viscosidade aparente	-
SC, PP, Wos	Receitas utilizadas para a obtenção dos dados experimentias	-
φ e ψ	Filtros empregados no controlador *MFA*	
R^2	Correlação para avaliação do ajuste da curva resposta experimental	
N	Número de clclos de controle na operação *MFA*	
E	Função erro específica para cada linha da malha neural *MFA*.	
Σ	Função somatório de erros dos ciclos N na rede neural do controlador *MFA*	
W_{ij}	Fator de peso ou de proporcionalidade na rede neural do controlador *MFA*	
$e(t), o(t), v(t)$	Função erro em relação ao 'set – point', sinal interno de saída e sinal de controle respectivamente para o controlador *MFA*	

COMENTÁRIOS DO AUTOR

Este trabalho científico emana da necessidade eminente que a maioria das indústrias de rações para animais de estimação a nível mundial têm para melhorar o padrão de qualidade de seus produtos. Simultaneamente adequando-se aos níveis tecnológicos mais avançados, que em primeira análise abrangem a seleção mais adequada e precisa das matérias-primas, o estreitamento das faixas dos padrões históricos de qualidade para os extrusados secos é uma prerrogativa necessária para proporcionar uma margem de retorno mais lucrativa no competitivo mercado mundial.

Inserindo-se a essa progressiva realidade, onde somente produções otimizadas terão espaço no futuro próximo, faz-se indispensável o monitoramento de variáveis de processo e variáveis de manipulação através do emprego de instrumentação avançada, bem como a implementação de estratégias de controle adequadas para processos mais complexos sob o ponto de vista de controle de processo. Através do uso do método científico elementar para a análise do fenômeno físico-químico, sob a ótica dos conceitos elementares de engenharia, alicerçado nas bases do controle moderno e conduzido segundo o rigorismo estatístico, identificar-se-á as bases para o controle deste processo.

A operação unitária analisada durante este trabalho é a extrusão, processo que compõe a principal etapa produtiva dentro da cadeia de rações animais secas.

RESUMO

O trabalho a seguir apresenta as principais ferramentas necessárias para o controle do processo de extrusão baseado na densidade e umidade do produto extrusado úmido. Para facilitar a compreensão da aplicação do controle avançado, revisa-se alguns conceitos básicos da teoria clássica de controle. Devido à complexidade deste processo, orientado pela transformação bio-polimérica da matéria-prima farino-lipídico-protéica a certa umidade ao longo da extrusora, são retomados alguns conceitos de estatística, a fim de compor um modelo experimental para as principais variáveis independentes e de processo na extrusão. Estudou-se a relação estatística significativa entre as variáveis independentes: vazão de farinha, vazão de vapor, vazão de água e rotação de helicóide do extrusor e as variáveis de processo: densidade e umidade do produto extrusado úmido, temperatura de saída e pressão de saída da extrusora. Para o completo entendimentos destas relações, são correlacionados as variações dos teores de umidade, lipídios, proteínas e carboidratos da farinha a ser extrusada. Ainda como importante parâmetro industrial é realizado o balanço de energia para o processo em questão através da energia mecânica específica ('SME') e energia térmica específica ('STE').

Devido à aplicação industrial deste trabalho, o controle da densidade e umidade do produto extrusado úmido é na verdade baseado no controle da relação empírica entre a temperatura e pressão na saída da extrusora. Dessa forma, o custo de instalação e precisão, enfatizando a necessidade de repetibilidade na medida de temperatura e pressão de saída, se tornam muito mais viáveis quando os mesmos são comparados com a medida de densidade e umidade para o produto extrusado na saída da extrusora. Equipamentos para a medida precisa de densidade para produtos sólidos-úmidos aplicam princípio nuclear e para a medida de umidade são empregados instrumentos com sofisticados espectros de infravermelho associados a sistemas óticos internos.

A fim de estudar-se a viabilidade deste modelo, foi realizado um planejamento composto central (4 variáveis independentes), com pontos axiais e a inclusão de alguns pontos aleatórios de interesse prático, a fim de obter-se um modelo mais robusto. Para tanto foram avaliadas três receitas típicas na indústria de rações animais, a fim de representar-se a maioria dos produtos comerciais recomendados para cachorros e gatos.

Através do conhecimento profundo das variáveis de processo, utilizou-se alguns experimentos para o entendimento do processo quanto à natureza da resposta, como a linearidade e a variação da resposta com o tempo. Estes experimentos informaram sobre o comportamento das curvas de reação para as variáveis independentes isoladamente. Atendendo a necessidade para a aplicação de estratégias de controle não lineares e/ou neurais o processo demonstrou-se com resposta em um único sentido com a perturbação, não linear e variante com o tempo. Este estudo foi comprovado pela aplicação da teoria de controle para processos lineares com perturbações lineares isoladas.

Finalmente, é utilizado o conhecimento adquirido no estudo do processo de extrusão e da avaliação da curva resposta experimental das perturbações isoladas para o projeto de um algorítimo de controle baseado na estratégia de controle *MIMO 2 x 2*. Este controle foi testado através do controlador neuro-adaptativo 'Model Free Adaptive' (*MFA*), demonstrando resultados preliminares satisfatórios para o controle simultâneo da temperatura e pressão de saída de um extrusor de eixo simples, empregando como variáveis manipulativas a proporção de vapor / água e a vazão de farinha de alimentação respectivamente para as variáveis de processo citadas.

ABSTRACT

The present study informs about the main features of extrusion control processes, based on product-wet density and moisture. To comprehend the study, some background of the classic control theory is provided. The process complexity, provided by formation of a bio–polymer from carbohydrate-lipid-protein raw materials, requires analysis using statistical concepts to build an experimental model for the principal extrusion process variables. Significant statistical relationships were evaluated between the following independent variables: meal feed rate, steam feed rate, water feed rate and extruder screw speed; and dependent variables: wet product density and moisture, extruder die temperature and die pressure. The process energy and mass balance were described using the Specific Mechanical Energy ('SME') and Specific Thermal Energy ('STE') concepts.

To facilitate the industrial application of this study, the wet density and moisture control is evaluated by an experimental empirical relationship between die temperature and die pressure. Die temperature and die pressure measurements are more feasible when compared with wet product density and moisture measurements due to ease of installation and measurement precision. Suitable equipment for the wet–solid product density measurements apply the nuclear principle, where safety is a concern; and moisture measurements use sophisticated devices with any combination of infrared and optical systems.

In order to evaluate the model application, a box experimental design was used with four independent variables, star points and some random points resulting from extrusion operation experience. Three typical dry recipes used in the pet food industry were tested, representing the majority of retail products for dogs and cats.

Applying the knowledge of extrusion process variables, several experiments were run to understand the process responses, such as linearity and control parameters. These experiments showed the influence of isolated independent variables to the dependent variables. The process was characterized by presenting a one way, non-linearity and time varying response, suitable for non-linear and neural controllers. Classic control theory was applied to evaluate each perturbation.

The knowledge gained from an extrusion process and experimental response curve analysis from isolated perturbation was applied to build a control algorithm based on

MIMO 2 X 2 control strategy. This model was tested by the neural-adaptive ' Model Free Adaptive' (*MFA*) controller. Initial satisfactory results were observed from the simultaneous control of die temperature and die pressure on a single screw extruder, using as manipulative variables the ratio of steam / water and the meal feed rate respectively.

INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A automação e controle na indústria alimentícia têm recebido enorme atenção nos últimos anos. O projeto de controladores necessita ser cada vez mais eficiente e objetivo, dedicado a variáveis controláveis normalmente definidas pela exigência do consumidor. Para o caso específico das rações animais é necessário atender as expectativas do cliente – qualquer dono de animal de estimação – e do consumidor – o animal de estimação, baseado na percepção do cliente e satisfação do consumidor.

Um longo período de avaliação e estudos estatísticos, tem demonstrado que o controle da densidade e umidade do produto extrusado, além de convergir para as exigências do cliente e do consumidor contribui sensivelmente para a melhoria da produtividade e qualidade na esfera industrial.

A escolha do controle de temperatura e pressão de saída do extrusor, a fim de descrever a densidade e umidade para o produto final, é baseada no fato que, embora, a umidade do produto extrusado possa ser medida com equipamento relativamente simples, a medida precisa de densidade para produtos úmidos é ainda um desafio, seja por equipamentos com significativo tempo de atraso para obtenção da resposta, ou por uso de tecnologia nuclear, muito onerosa e responsável um "frenesi" para a sua instalação e operação, pela falta de conhecimento da maioria dos técnicos na indústria de rações para animais.

Entretanto, o processo de extrusão é limitado pelas constantes variações da matéria-prima, complexidade dos fenômenos físico-químicos durante a operação unitária, que identificam a baixa homogeneidade do produto extrusado e a variação das condições de processo. Este comportamento complexo é inadequado para a aplicação da teoria de controle clássica, baseada em sistemas instantâneos de 'feedback', 'feedforward' e modelos preditivos.

Dessa forma, o desenvolvimento de controladores comerciais para o processo de extrusão necessita ser alimentado com as principais relações para este processo multivariável. A necessidade em estudar o sistema é exemplificada na avaliação das curvas de reação de perturbações individuais e simultâneas, definindo-se a natureza do sistema sob

a ótica de controle. Após esse passo, o estudo das relações multivariáveis define a construção da lógica de controle e a melhor estratégia a ser aplicada.

Finalmente, a aplicação preliminar de um controle neural adaptativo não pode ser entendida como modismo, mas sim como uma alternativa plausível que emana da ineficácia dos controles convencionais aplicados a extrusores e da inexistência de controladores inteligentes aplicados no cenário mundial.

Os objetivos deste trabalho são definidos abaixo:

- ✓ Verificar a relação estatística entre temperatura e pressão de saída do extrusor com a densidade e a umidade do produto extrusado úmido;
- ✓ Avaliar as variáveis independentes mais usadas no campo industrial e determinar a sua influência sobre a temperatura e pressão de saída do extrusor;
- ✓ Avaliar o comportamento do processo de extrusão quanto a perturbações individuais e simultâneas;
- ✓ Avaliar a não linearidade, bem como a natureza da curva resposta para o processo de extrusão;
- ✓ Avaliar preliminarmente a aplicação do controle *MFA* baseado em elemento neural - adaptativo para a temperatura e pressão de saída em um extrusor comercial relacionadas com a densidade do produto final.

I) REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este tópico revisa os conceitos básicos necessários para o pleno entendimento das respectivas utilizações, quanto à teoria de controles, contemplando as diferentes caracterizações dos sistemas e os tipos de controladores, para então serem aplicados no processo específico; e o processo de extrusão para 'pet food' propriamente dito.

I.1) CONCEITOS BÁSICOS

I.1.1) Considerações Gerais

A fim de resolver as duas principais partes do estudo experimental para a operação unitária de extrusão foram empregados dois softwares específicos: *STATISTICA* e *MATLAB*.

O programa Statística é apenas um programa aplicativo dedicado ao planejamento e analise estatística para um conjunto de dados específicos. O programa opera em plataforma *PC / WINDOWS* , apresentando conversão direta para planilhas *EXCEL*. O programa *MATLAB* é normalmente aplicado para a resolução de problemas em engenharia baseado em calculo numérico matricial. Apresenta como significado *MATrix LABoratory*, especialmente desenvolvido para resolver sistemas representados por matrizes matemáticas. Este programa opera também em plataforma *PC / WINDOWS*, apresentando comunicação direta com o *CLP* (Controlador Lógico Programável), quando instalado um canal de conversão especial. Neste caso, além de um programa de simulação, o *MATLAB* pode ser utilizado como um sistema digital de controle distribuído (*SDCD*). Esta vantagem abre um canal próprio, no qual através de programação na linguagem do *MATLAB*, similar a programação '*C*', pode-se desenvolver blocos específicos de programação para aplicação no campo industrial.

Através do uso de programas especificamente escritos em *MATLAB* para a análise dos parâmetros de um controlador segundo Ziegler Nichols, desenvolve-se estratégias de

controle *SISO* ('Single Input Single Output'), *SIMO* ('Single Input Multiple Output'), *MISO* ('Multiple Input Single Output') e *MIMO* ('Multiple Input Multiple Output').

Entretanto, para sistemas cujo comportamento é não-linear, as informações conjugadas do planejamento experimental com os resultados da análise adimensional dos parâmetros de controle linear, edificam a base dos parâmetros e premissas para os limites das variáveis na análise por redes neurais. O objetivo final da instalação do controlador não-linear associa-se aos principais itens do controle de processo tais como:

1) Determinar as condições ótimas para o processo;

2) Evitar condições instáveis;

3) Atender os parâmetros de qualidade, continuamente, durante a produção, segundo indicadores estatísticos *Cp* e *CpK* ;

4) Fornecer informação (dados de processo) em tempo real, organizadas em gráficos e tabelas estatísticas de processo.

O controle de processo pode ser definido como o melhor conjunto de técnicas necessárias para diminuir o erro 'off set' entre o valor desejado 'set point' e o valor de resposta 'out put' depois de ter sofrido a operação unitária. O mesmo é conduzido através da manipulação das variáveis que indicam influência para os valores das variáveis respostas, até que seja definido o melhor conjunto de valores, variando com o tempo (processos não-lineares).

Visto a absoluta importância do sistema de medida (instrumentação) preciso (repetitivo) e exato (correto), deve-se fazer a escolha certa do equipamento utilizado para a instrumentação e garantir que o mesmo passe por um processo sistemático de calibração. Para os sistemas industriais, os sistemas de medida são representados por um conjunto do elemento sensor de medida e transmissor, a fim de enviar e receber o sinal de controle para/do controlador. O controle de processo pode ser dividido genericamente em:

- Medição;
- Modelagem;
- Simulação
- Análise;
- Projeto;

- Instalação;
- Validação.

Os processos podem ser classificados quanto à estratégia geral de controle como 'feedback', no qual a variável é medida depois de ter sofrido o processo, não necessariamente sendo conhecida antes das perturbações afetarem o processo. Por outro lado, o controle baseado em 'feedforward' necessita do conhecimento da relação entre as variáveis de processo e o efeito das perturbações ao processo, adequado por modelos preditivos. O modelo preditivo, entretanto, para processos baseados em lógica adaptativa contribui com antecipação da tendência de controle, evitando mudanças bruscas no valor a ser controlado, mas por outro lado também pode atribuir excessivo atraso na ação de controle.

I.1.2) Modelagens

Modelagem é basicamente qualquer conjunto de operações que possam ser estudadas, preditas e otimizadas, como por exemplo à extrusão. Então, se questiona porque o uso de um modelo ao contrário do uso somente de ensaios experimentais. Muitas vezes a instalação e desenvolvimento de muitos ensaios experimentais, além da disponibilidade de peças auxiliares inviabilizaria os ensaios. Insere-se neste exemplo para uma completa análise da extrusão baseada somente nos dados experimentais seria necessário um conjunto infinito de ensaios.

Dessa forma, o modelo matemático e/ou físico fornece extrapolações para as observações experimentais e possibilita a comparação do processo sob diferentes condições sem a necessidade física de repetir os experimentos. Uma desvantagem dos modelos é o peso das equações matemáticas, normalmente diferenciais de ordem superior resolvidas por integração numérica, além da necessidade usualmente linear associada ao comportamento da operação unitária. Este procedimento atribui dos fatores: complexidade e perda de velocidade na ação de controle.

1.1.3) Controle PID

O controle conhecido como Proporcional-Integrativo-Derivativo (*PID*) é largamente aplicado em controles de processos industriais, basicamente devido a sua simplicidade e a utilização de modelos relativamente simples na sua lógica interna. O *PID* é efetivamente rodado no controlador lógico programável (*CLP*) em via de regra. Processo este, que seguramente compõe mais de 90 % dos controladores empregados na indústria de rações para animais de estimação ao nível mundial. Observa-se que controladores *PID* podem seguramente ser instalados em sistemas digitais de controle distribuído (*SDCD*). Entretanto, lista-se abaixo algumas características dos controladores *PID* impeditivas para o controle de processos mais complexos:

- O controlador *PID* opera em sistemas basicamente lineares e tempo invariante;
- Os principais parâmetros de controle: ganho, K_E, tempo integrativo, T_i e tempo derivativo, T_d devem ser baseados em um processo dinâmico. Mas, se a dinâmica do processo varia, por exemplo, durante a modificação de variáveis independentes, como por exemplo vazão de farinha, o *PID* necessita uma nova sintonia. Mais especificamente, é necessário achar um novo conjunto de parâmetros para o controlador. Alguns sistemas de controle trabalham com técnicas de re-sintonia para *PID* (Mulvaney & Hsieh, 1988);
- O controlador por repetidas vezes é colocado em módulo manual pelos operadores, devido à dificuldade do mesmo em manter o processo operando normalmente. Este procedimento implica diretamente em perdas de qualidade do produto, produtividade e desperdício energético, com menos segurança operacional.

Para minimizar este problema, alguns controladores *PID* comerciais encontrados no mercado, embora com parâmetros auto-ajustáveis, continuam apresentando problemas de sintonia. Isto ocorre devido à dificuldade em elaborar diferentes modelos capazes de interpretar a dinâmica do processo em tempo real. Para controladores baseados em regras de auto-sintonia é um desafio encontrar e manter um bom modelo do processo 'on line' para re-sintonia de controladores *PID* . Dessa forma os *PID's*, baseados em regras de auto-sintonia, apresentam confusão entre os ajustes necessários e as reais mudanças no processo. Então, estes controladores passam a ser operados como controladores convencionais, apresentando os problemas já discutidos.

I.1.4) Controle Adaptativo

O controle adaptativo é um tipo de controle baseado em sinal 'feedback', suficientemente inteligente para ajustar seus parâmetros quando em operação, a fim de minimizar a banda de erro; sendo usualmente aplicado em sistemas com pequeno tempo morto ou processos com dinâmica muita bem definida sob o ponto de vista matemático. Embora o princípio dos controladores de auto-ajuste ou adaptativos seja bem fundamentado, sua aplicação industrial é muito pequena pela complexidade ou resistência dos operadores.

A dinâmica do processo para controles adaptativos é importante para o tempo de treinamento necessário, a relação entre excitação e resposta para o processo estacionário, a estrutura do processo e o modelo de convergência, bem como estabilidade real do sistema em aplicações industriais. Novamente, este método apresenta problemas em processos não-lineares, com estrutura variante, ou significativo tempo morto (CYBOCON User Manual, 1998).

I.1.5) Controle Robusto

Robustez é definida como o mínimo possível de ação de controle para ser usada no ambiente prático, escolhendo-se os parâmetros de controle, sem mudanças posteriores, com performance garantida. Estes controladores assumem o conhecimento da dinâmica de processo e suas variações, sendo aplicados a processos com amplas faixas de incerteza, associados a baixos intervalos de estabilidade. Entretanto, a fim de determinar a melhor configuração uma única vez, é necessário um alto grau de capacitação e a partir do ponto que alguma modificação ao processo é introduzida, como por exemplo variações na formulação, o controlador tem que ser re-projetado (CYBOCON User Manual, 1998).

I.1.6) Controle Preditivo

Este tipo de controle está baseado em um modelo preditivo, otimização temporal com correção por 'feedback', no qual o valor futuro de saída é predito baseado na história dinâmica do processo, assim como o valor futuro do valor de entrada.

O algorítimo empregado para o controle otimizado busca o ponto ótimo, ao qual apresenta como grande diferença aos controles convencionais o ajuste realizado pela janela temporal, resultando em avaliações parciais em intervalos de tempo definidos. As avaliações são conduzidas sob a ótica 'feedback', comparando o erro entre o valor da variável de controle e o modelo em tempo real.

Este sistema é bastante eficaz para muitos processos, mas requer um alto grau de precisão e conhecimento da dinâmica de processo; sendo portanto menos usado industrialmente do que mereceria (CYBOCON User Manual, 1998). Segundo Timothy e Mulvaney (1995), o controle preditivo é indicado para ser usado em processos com significativo tempo morto, como por exemplo temperatura de extrusão.

Controles preditivos têm sido aplicados em escala laboratorial para o controle de umidade (Levine at al., 1986) e temperatura do extrusado com o complexo programa *ARMAX*, desenvolvido por Tan e Hofer (1993).

I.1.7) Controle Ótimo

Este controle é empregado quando a equação do estado estacionário é conhecida, bem como as condições iniciais, permitindo a otimização do processo através do correto conjunto de valores dos parâmetros da equação. Basicamente o controle ótimo emprega distintos algorítmos como Newton, ou Poliedros Quadráticos para determinar o cálculo das variações. Entretanto este controle não apresenta resultados adequados para típicas variáveis de processo no campo industrial: vazão, pressão, temperatura e nível (CYBOCON User Manual, 1998).

I.1.8) Controle Inteligente

Atualmente o grupo conhecido como controle inteligente abrange diferentes algorítmos e técnicas adequadas para a tentativa e ou solução de sistemas mais complexos. Dentre os principais controladores estão o controle baseado em aprendizado, adaptativo livre, *fuzzy* e controles baseados em redes neurais.

O controlador baseado em aprendizado é fundamentado na lógica *PID*, mas com constante aprendizado da dinâmica do processo, o que otimiza o processo com uma constante reavaliação da função de transferência. Embora tenha conceituação simples, para a função de transferência ser reavaliada deve ser passível de resolução e muitas vezes isso não é possível.

O controle adaptativo livre trabalha com conceitos similares ao baseado em aprendizado, mas opera com um elemento neural, o que elimina a necessidade de conhecimento analítico do processo em questão. Este controle será abordado de maneira mais específica no decorrer deste trabalho.

O controle *fuzzy* constitui-se também em um conjunto de técnicas que dispensam o conhecimento analítico do processo e possibilita a inclusão de parâmetros de qualidade na estrutura do controlador. Este tipo de controle tem crescido bastante em algumas áreas experimentais baseado no conceito de incerteza para processos de difícil análise.

Os controladores baseados em redes neurais podem incluir os controladores citados anteriormente e apresentam a vantagem de associar a 'tomada de decisões para o controlador' baseado no conjunto de dados de processos e limites estabelecidos perante a natureza do processo.

I.1.9) Tempo Ótimo Para Amostragem

Através da escolha adequada do sistema de controle para a dinâmica de processo, determina-se o tempo mínimo necessário para a ação de controle; denominado tempo de amostragem. Embora o processo de extrusão seja reconhecidamente não-linear, o estudo da teoria clássica de controle é necessário para o entendimento da natureza das alterações das variáveis de processo de acordo com as variáveis independentes. Dessa forma, o estudo da

teoria de controle aplicado a processos lineares de tempos independentes, informará sobre a relação entre o tempo mínimo de amostragem com o tempo morto e o tempo de subida de um típico processo de extrusão, associando como reposta o tempo de residência do processo de extrusão.

I.2) SISTEMAS DINÂMICOS

I.2.1) Definição de Sistema Dinâmico

O sistema dinâmico do processo definido como a relação entre dados de entrada e saída é normalmente representado por:

$$y(t) = f(u(t),t) \tag{I.2.1.1}$$

A equação (I.2.1.1) é a expressão geral para qualquer sistema dinâmico, na qual o conjunto de dados de entrada *u(t)* irá produzir, por excitação a um sistema, o conjunto de resultados *y(t)* no intervalo temporal.

O sistema dinâmico é dividido em linear e não-linear. O sistema linear apresenta duas categorias: tempo-independentes e tempo-dependentes. Para o sistema linear tempo-independente os parâmetros são constantes durante o processo. Abaixo são listadas as propriedades gerais dos sistemas lineares:

1) Uma variável pode ser escrita como a combinação linear de outras

$$y(t) = 10x(t) - 2u(t) + w(t) \tag{I.2.1.2}$$

Por exemplo, a equação (I.2.1.2) apresenta a combinação linear entre os parâmetros de entrada.

2) Através da equação (I.2.1.3), observa-se que qualquer função multiplicada por uma dada constante k resultando em uma outra função.

$$y(t) = \mathrm{k}u(t) \tag{I.2.1.3}$$

3) Nos sistemas lineares tempo-dependentes, os parâmetros são variáveis, ou seja, os coeficientes da equação são variáveis. Neste caso eles são multiplicados por funções temporais, como demonstrado na equação (I.2.1.4) (Coelho, 1995).

$$y(t) = (te^{-t})x(t) \tag{I.2.1.4}$$

4) Qualquer variável pode ser escrita pela integral ou derivada de outra em relação ao tempo, como mostrado na equação (I.2.1.5).

$$q(t) = \int_{t_0}^{t} i(\tau)d\tau + q(t_0) \tag{I.2.1.5.a}$$

$$v(t) = \frac{dx}{dt} \tag{I.2.1.5.b}$$

O comportamento de qualquer sistema é dado pela sua correspondente equação diferencial, usando o tempo como variável independente. Dessa forma, a equação diferencial é simplesmente a representação das variáveis dependentes e das excitações, em conjunto com no mínimo uma de suas derivadas.

Um dos grandes desafios da engenharia é a construção do modelo, no qual as variáveis são analisadas e deve-se construir um número suficiente de equações a fim de solucionar o sistema. O equacionamento do sistema depende do entendimento físico da relação entre ação e resposta. O próximo passo necessita equacionar o grupo de variáveis que realmente promove mudanças para uma dada variável de processo de interesse. Como por exemplo na revisão bibliográfica de extrusão, a temperatura de saída pode ser obtida em função das equações diferenciais da temperatura, trabalho de eixo e tempo de residência; resolvida através de um complexo algorítimo denominado ARMAX. Certamente, a resolução desse sistema é muito mais complexa do que os conceitos desenvolvidos nessa revisão conceitual.

I.2.1.1) Função de Transferência

A Função de Transferência é uma representação para o sistema com apenas uma única variável invariante no tempo, ou seja apenas uma única excitação (uma entrada), associada a variável de interesse (variável de saída). A variável de entrada é conhecida por

independente e a variável de resposta como de processo. Estes sistemas são conhecidos por 'Single Input Single Output' (*SISO*).

A função de transferência é o quociente entre os dados de saída e de entrada para um dado processo, como mostrado na equação (I.2.1.1.1):

$$G(p) = \frac{y(t)}{u(t)} = \frac{out - let}{in - let} = \frac{b_w p^w + b_{w-1} p^{w-1} + ... + b_1 p^1 + b_0}{a_n p^n + a_{n-1} p^{n-1} + ... + a_1 p^1 + a_0} \qquad \text{(I.2.1.1.1)}$$

onde $p = \frac{d(\text{var}\,iável)}{dt}$. A equação acima é obtida colocando os termos em *y(t)* –entrada- e *u(t)* –saída- em evidência dos polinômios do numerador e denominador respectivamente.

A função de transferência *[G(p)]* combina todas as operações de derivação e integração envolvidas na dinâmica do sistema. Esta definição possibilita o entendimento do valor de resposta como sendo o produto da função de transferência com a saída, conforme verificado na Figura 1:

$$y(t) = G(p)u(t) \qquad \text{(I.2.1.1.2)}$$

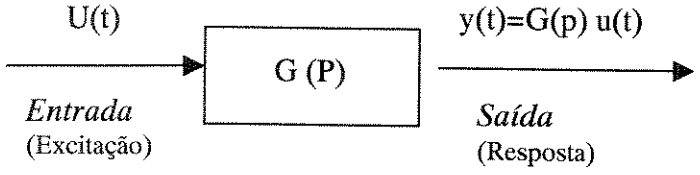


Figura 1: Bloco Funcional de um Sistema Invariante no Tempo.

onde o bloco acima é comumente usado em modelagem de sistemas de controle, mas não pode ser usado como uma operação algébrica normal.

Quando a função de transferência é racional em *p* (relação de dois polinômios) é possível determinar-se à estabilidade, velocidade de resposta, oscilações, amplitude e freqüência para o sistema ou processo.

I.2.1.2) Tempo Morto

Tempo morto é um conceito bastante simples, mas usualmente confundido com o tempo necessário para que um processo alcance o estado estacionário, que é dependente da

dinâmica do processo e conhecido como capacidade (Multivaney E Hsieh, 1988). O tempo morto é o tempo de atraso que uma excitação demora em um processo, até que se verifiquem as primeiras mudanças no processo, por exemplo, na extrusão o tempo morto é, principalmente, função do tempo de residência no pré-condicionador.

Assumindo que o sistema tenha entrada *u(t)* e saída *y(t)* com tempo morto τ, a equação é dada pela equação (I.2.1.2.1):

$$y(t) = u(t - \tau) \tag{I.2.1.2.1}$$

e $u(t) = 0$ para qualquer $t > 0$ pode ser escrito pela equação (I.2.1.2.2):

$$y(t) = u(t - \tau)y(t)u_{-1}(t - \tau) \tag{I.2.1.2.2}$$

Aplicando a propriedade de translação da Transformada de Laplace:

$$Y(s) = e^{-\tau s}U(s) \tag{I.2.1.2.3}$$

O tempo morto impossibilita o emprego direto da teoria de funções racionais e as propriedades das Transformadas de Laplace racionais. Dessa forma, a presença de tempo morto é indesejável para a sintonia de controladores.

Finalmente com a modelagem, associando-se os valores de tempo morto, a curva de reação do processo responde à capacidade até que chegue a um valor estacionário.

Quanto aos processos industrias todos os equipamentos auxiliares (válvulas, sensores, transmissores) têm comportamento não linear devido à presença de tempo morto. Dessa forma na análise da extrusão como um todo, o que será chamado de tempo morto para o processo de extrusão é na verdade a soma de todos os tempos mortos associados a cada equipamento que operacionalmente torna possível a conversão da excitação em um valor de resposta.

I.2.2) Resposta de um Sistema Linear Invariante

Para um sistema linear invariante no tempo, a resposta total é a soma de duas parcelas: a resposta livre $Y_L(s)$ e a resposta forçada $Y_F(s)$ conforme equação (I.2.2.1). A resposta livre é a parcela da resposta causada pelas condições iniciais, e a resposta forçada é a parcela causada pela entrada aplicada ao sistema, segundo equação (I.2.2.2).

$$Y(s) = Y_L(s) + Y_F(s) \tag{I.2.2.1}$$

$$Y_F(s) = G(s)U(s) \tag{I.2.2.2}$$

onde $U(s) = \mathcal{L}[u(t)]$ é a Transformada de Laplace da entrada do sistema, $G(s)$ a função de transferência no domínio da freqüência complexa $s = \sigma + j\omega$. Em outras palavras, a função de transferência é desenvolvida no domínio da Transformada de Laplace (Coelho, 1995).

I.2.3) Sistemas Lineares

I.2.3.1) Sistemas de Primeira Ordem

Os sistemas de Primeira Ordem são sistemas cujo comportamento dinâmico é modelado por uma equação diferencial de primeira ordem (I.2.3.1.1) (Ogunnaike e Ray, 1994):

$$a_1 \frac{dy}{dt} + a_0 y = bu(t) \tag{I.2.3.1.1}$$

A equação acima pode ser comumente reescrita na equação (I.2.3.1.2):

$$T \frac{dy}{dt} + y(t) = K_E u(t) \tag{I.2.3.1.2}$$

I.2.3.1.1) Perturbação Degrau Para Sistemas Lineares de Primeira Ordem

Para uma perturbação degrau de amplitude a $u(t) = au\text{-}1(t)$, com Transformada de Laplace $U(s) = \frac{a}{s}$ a resposta forçada pode ser determinada através de frações parciais, segundo desenvolvimento na equação (I.2.3.1.1.1) e a transformada inversa de Laplace na equação (I.2.3.1.1.2). A resposta total é definida pela equação (I.2.3.1.1.3).

$$Y_F(s) = \frac{K_E a}{s(T_s + 1)} = \frac{A_1}{s} + \frac{A_2}{s + 1/T} = \frac{K_E a}{s} - \frac{K_E a}{s + 1/T} \tag{I.2.3.1.1.1}$$

$$y_F(t) = K_E a\left(1 - e^{-t/T}\right); \qquad \text{para t >= 0} \tag{I.2.3.1.1.2}$$

$$y(t) = y(0)e^{-t/T} - K_E a e^{-t/T} + K_E a \; ; \quad \text{para t >= 0} \qquad \text{(I.2.3.1.1.3)}$$

Observa-se que em regime permanente constante, ou seja a tempo infinito, a resposta na equação (I.2.3.1.1.3) tende ao valor constante $K_E a$. Dessa forma define-se K_E como ganho do regime permanente constante ou simplesmente ganho estático. Este valor é dado pelo simples quociente entre o valor final da saída ($Y(\infty)$) pelo degrau aplicado 'a', que em última análise corresponde ao valor da entrada aplicado ao infinito $u(\infty)$.

A equação também informa a presença de um pólo em $s = -1/T$, o que atribui a resposta livre e forçada a exponencial $e^{\frac{-t}{T}}$. A parcela da resposta que depende desta exponencial é chamada de resposta natural, que para este caso constitui-se na resposta transitória da resposta a tempo infinito (Coelho, 1995).

Considerando-se o valor de $t = T$, tem-se as equações (I.2.3.1.1.4) e (I.2.3.1.1.5) abaixo:

$$y_L(T) = y(0)e^{-1} = 0{,}368y(0) \qquad \text{(I.2.3.1.1.4)}$$

$$y_F = (T) = K_E a(1-e^{-1}) = 0{,}632y(\infty) \qquad \text{(I.2.3.1.1.5)}$$

Pela análise das equações (I.2.3.1.1.4) e (I.2.3.1.1.5), no instante t=T, o valor da resposta livre representa 36.8% do valor da amplitude inicial e a resposta forçada 63.2% do valor final – estacionário. Observa-se que este é, aproximadamente, o valor do tempo constante 63%, definido no tempo ótimo de amostragem, baseando-se em um modelo de primeira ordem estritamente próprio.

I.2.3.2) Sistemas de Segunda Ordem

Os sistemas de Segunda Ordem são sistemas cujo comportamento dinâmico é modelado por uma equação diferencial de segunda ordem, equação (I.2.3.2.1) (Ogunnaike e Ray, 1994):

$$a_2 \frac{d^2y}{dt^2} + a_1 \frac{dy}{dt} a_0 y = bu(t) \qquad \text{(I.2.3.2.1)}$$

A equação diferencial para sistemas que não tenham derivadores puros é representada pela equação (I.2.3.2.2) (Coelho, 1995):

$$\frac{d^2y}{dt^2} + 2\varsigma\omega_n \frac{dy}{dt} + \omega_n{}^2 y = \beta_2 \frac{d^2u}{dt^2} + \beta_1 \frac{du}{dt} + \beta_0 u \qquad \text{(I.2.3.2.2)}$$

onde:

ω_n = período natural de oscilação do sistema;

ζ = fator amortecimento;

Kp = estado estacionário ou estático, ou simplesmente ganho do sistema.

A parcela da resposta total que depende apenas dos pólos da Função de Transferência, denominado polinômio característico é a resposta natural, representada pela equação (I.2.3.2.3):

$$Y_n(s) = \frac{Q_1 s + Q_0}{(s^2 + 2\varsigma\omega_n s + \omega_n{}^2)} \qquad \text{(I.2.3.2.3)}$$

Resolvendo através da transformada inversa de Laplace, chega-se a função temporal para a resposta natural na equação (I.2.3.2.4).

$$y_n(t) = A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t}\text{; para t >0} \qquad \text{(I.2.3.2.4)}$$

Caso $\zeta = 0$ as raízes da equação característica (I.2.3.2.3) são $\pm j\omega n$. Assim o sistema tem solução representada da equação (I.2.3.2.5).

$$y_n(t) = A_1 e^{j\omega_n t} + A_1^* e^{-j\omega_n t} = 2|A_1|\cos[\omega_n t + \arg(A_1)] \qquad \text{(I.2.3.2.5)}$$

Esta solução é conhecida freqüência ω_n natural não-amortecida.

Para valores $\zeta > 0$, os dois pólos do sistema têm parte real negativa, garantindo o valor final da resposta natural nulo, sendo conhecido como relação de amortecimento.

Para valores $\zeta < 0$ os dois pólos do sistema têm parte real positiva, atribuindo um efeito crescente para a freqüência de oscilação ω_n , que em termos exponenciais pode ser desmembrada em dois grupos $-1 < \zeta < 0$ e $\zeta < -1$, entretanto atribuindo o mesmo efeito oscilatório crescente e indesejável para a estabilidade de um sistema.

I.2.3.2.1) Perturbação Degrau Para Sistemas Lineares de Segunda Ordem

Sistemas lineares de segunda ordem sem derivadas da entrada apresentam $\beta_2 = \beta_1 = 0$ e considera-se $\beta_0 = K_E \omega_n^2$, sendo K_E o ganho estático do sistema. A Função de Transferência apresenta a forma dada pela equação (2.4.2.1.1) (Coelho, 1995):

$$\frac{Y(s)}{U(s)} = G(s) = \frac{K_E \omega_n^2}{s^2 + 2\varsigma\omega_n s + \omega_n^2} = \frac{K_E}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\varsigma}{\omega_n} s + 1} \qquad \text{(I.2.3.2.1.1)}$$

A solução temporal geral deste sistema é dada pela equação (I.2.3.2.1.2):

$$y(t) = K_E a + A_1 e^{s_1 t} + A_2 e^{s_2 t} \text{; para } \zeta \neq 1 \qquad \text{(I.2.3.2.1.2)}$$

A análise da equação (I.2.3.2.1.2) é mais bem entendida, dividindo-se os sistemas em três grupos (Stephanopoulos, 1984):

- Sistema Super-Amortecido – quando $\zeta > 1$;
- Sistema Sub-Amortecido – quando $0 < \zeta < 1$;
- Sistema Com Amortecimento Crítico – quando $\zeta = 1$.

I.2.3.2.1.1) Sistema Super-Amortecido

Para estes sistemas, os pólos são reais e negativos: $s_1 = -1/T_1$ e $s_2 = -1/T_2$.

A solução no domínio temporal é dada pela equação (I.2.3.2.1.1.1):

$$y(t) = K_E a \left(1 - \frac{T_1}{T_1 - T_2} e^{-t/T_1} + \frac{T_2}{T_1 - T_2} e^{-t/T_2} \right) \qquad \text{(I.2.3.2.1.1.1)}$$

Novamente, como já foi desenvolvido no caso da resolução de sistemas lineares de primeira ordem, $y(0) = 0$ e $y(\infty) = K_E a$, o qual é o ganho estático do sistema, que é alcançado no regime permanente constante.

Analisando a disposição dos valores de s para $\zeta > 1$ e $T_1 > T_2$ observa-se que à medida que ζ aumenta de valor, a relação T_1 / T_2 aumenta muito, o que determina que a constante de tempo T_2 tenderá a zero muito mais rapidamente do que a constante de tempo

T_1 . Assim a constante de tempo T_1 identifica o pólo $s_1 = -1/T_1$ como dominante do sistema, uma vez que ele dura mais tempo e tem a maior amplitude. Caso o pólo $s_2 = -1/T_2$ seja ou fique tão pequeno que possa ser desconsiderado, o sistema passa a ser considerado de primeira ordem, cujo único pólo é o pólo dominante.

I.2.3.2.1.2) Sistema Sub-Amortecido

Para estes sistemas os pólos passam a ser complexos conjugados, apresentando resposta natural oscilatória amortecida, com parte real para a taxa de decaimento exponencial e parte imaginária responsável pela freqüência de oscilação. A equação no domínio temporal é dada pela equação (I.2.3.2.1.2.1):

$$y(t) = K_E A\left[1 - \frac{e^{-\varsigma\omega_n t}}{\sqrt{1-\varsigma^2}} sen(\omega_d t + \eta)\right] \qquad \text{(I.2.3.2.1.2.1)}$$

A expressão (I.2.3.2.1.2.1) serve de base para o estudo de vários sistemas que apresentam oscilações amortecidas em sua resposta final na qual tem-se:

$$\cos\eta = \varsigma$$
$$sen\,\eta = \sqrt{1-\varsigma^2}$$

onde η é o ângulo em coordenadas polares para o qual é posicionado o conjunto de pólos complexos conjugados.

Novamente, quando $y(0) = 0$ e $y(\infty) = K_E a$, na equação (I.2.3.2.1.2.1), o sistema terá como resposta o ganho estático.

I.2.3.2.1.3) Sistema Com Amortecimento Crítico

Entende-se como amortecimento crítico o caso limite entre os sistemas com super-amortecimento e sub-amortecimento. A solução no domínio temporal é dada pela equação (I.2.3.2.1.3.1) (Coelho, 1995).

$$y(t) = K_E a\left[1 - e^{-\omega_n t} - \omega_n t e^{-\omega_n t}\right] = K_E a\left[1 - e^{-\omega_n t}(1 + \omega_n t)\right] \qquad \text{(I.2.3.2.1.3.1)}$$

Ao final do estudo dos três casos para sistemas lineares de segunda ordem para perturbação degrau sem zeros, pode-se observar graficamente o comportamento das curvas padrões para diferentes valores dos fatores de amortecimento ζ, na Figura 2.

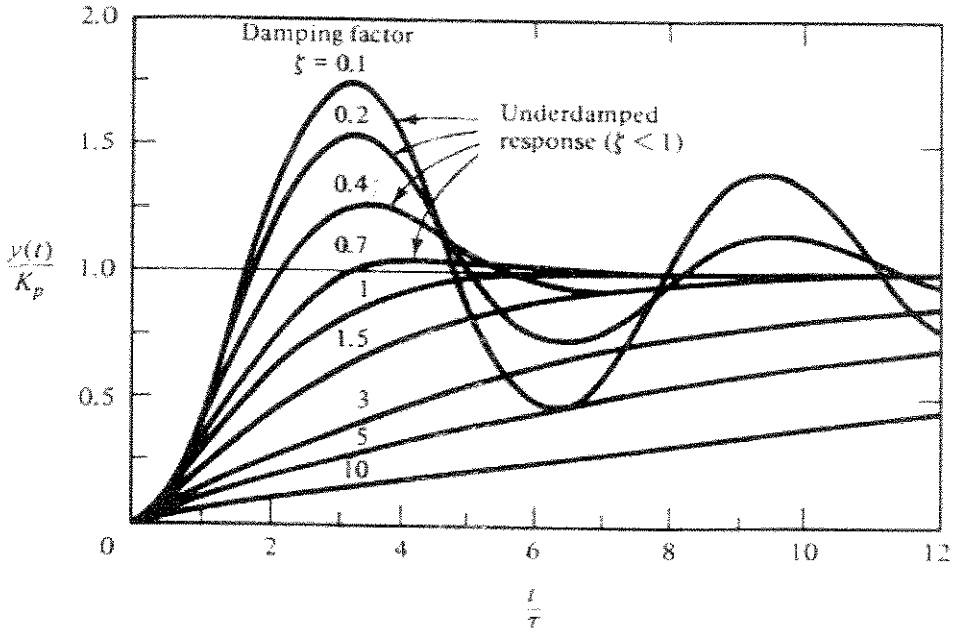


Figura 2: Resposta Adimensional de um Sistema de Segunda Ordem sem Zeros para uma Perturbação Degrau Unitário (Stephanopoulos, 1984).

I.2.4) Sistemas de Ordem Superior

Sistemas lineares de ordem superior têm como resposta à soma da solução para sistemas de primeira ordem com sistemas de segunda ordem (Ogata, 2002). Os sistemas de ordem superior usualmente estão divididos em (Stephanopoulos, 1984):

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

I.2.4.1) Vários Sistemas Lineares em Série

Quando vários sistemas lineares de primeira ordem são conectados de forma que a iésima saída (i) do sistema é a entrada iésima ($i+1$) do sistema, sendo $u(t)$ a entrada do sistema.

A resolução desses sistemas para a perturbação degrau é simplesmente a aplicação da entrada $u(s)=1/s$ – Transformada de Laplace para degrau unitário (1).

A equação característica para este sistema é representada pela equação (I.2.4.1.1):

$$y_N(t) = K_E\left(1+\sum_{i=1}^{N}\frac{A_i}{T_i}e^{-t/T_i}\right) \qquad \text{(I.2.4.1.1)}$$

Algumas características são extremamente importantes para estes sistemas, conforme descrito abaixo:

- A adição de consecutivos sistemas de primeira ordem provoca o amortecimento gradual da curva característica para sistemas de primeira ordem;

- Para $N > 1$ a derivada da função no tempo inicial igual a zero é igual a zero, evitando a existência de resposta inversa;

- Definindo o fator de relutância de um sistema como a diferença J_N dada pela integral mostrada nas equações (I.2.4.1.2.a e I.2.4.1.2.b). A equação é interpretada pela área que indica a diferença entre um sistema degrau puro para $T = 0$ tem-se $Y^* = K_E$ e o sistema definido a $y(t)$, para um dado $t = T_i$.

$$J_N = \int_0^{\infty}\left[y^* - y(t)\right]dt \qquad \text{(I.2.4.1.2.a)}$$

$$J_N = K_E\left(\sum_{i=1}^{N}T_i\right) \qquad \text{(I.2.4.1.2.b)}$$

I.2.4.2) Limite Especial para Sistemas de Primeira Ordem em Série

Para os sistemas lineares em série discutidos na seção (I.2.4.1) deve-se considerar especificamente um caso especial para um conjunto em série de sistemas lineares:

- Todos os ganhos estacionários com o valor 1;
- Todas as constantes de tempo são iguais;
- As constantes de tempo são definidas por α / N.

Obviamente de acordo com o último item, a cada aumento no número N de sistemas de primeira ordem, a constante de tempo diminui.

Seguindo o raciocínio estabelecido para um número grande N, quando N é levado ao infinito, cada contribuição da constante de tempo assume valor nulo, atribuindo para cada sistema o comportamento como um processo com ganho puro.

A uma dada perturbação degrau o sistema irá responder instantaneamente até o infinito para todos os sistemas lineares envolvidos no processo. Ao final do sistema, o valor de saída final é obtido do último estágio linear da série avaliada. Além disso a relutância inerente para este processo será dada pela equação (I.2.4.2.1):

$$\lim_{N\to\infty} J_N = \lim_{N\to\infty}\left(\sum_{i=1}^{N} T_i\right) = \infty \qquad \text{(I.2.4.2.1)}$$

A expressão acima é a forma algébrica da propriedade do sistema ao infinito apresentar $Ti = \alpha / N = \alpha$. Portanto a área conforme definida pela relutância associada ao sistema na equação (I.2.4.1.2) será α, uma vez que a resposta instantânea do sistema é dada por $y^* = 1$. Finalmente observando que este também é o valor da resposta do último componente do sistema, a resposta para o sistema é obtida com um atraso α, que é uma forma qualitativa de definir o tempo morto, estudado na seção (I.2.1.2).

I.2.4.3) Sistemas de Ordem Superior com Zeros

Embora a idéia de resolução de um sistema como um somatório de várias funções lineares seja um bom método, o sistema de ordem superior *N*, assim como qualquer outro de primeira ou segunda ordem, pode apresentar pólos que são reais ou complexos como segue:

- Pólos reais distintos ou múltiplos;
- Alguns pólos são complexos conjugados complexos.

Pelas duas possibilidades acima se chega a conclusão que os sistemas de ordem superior podem ser analisados como um somatório de sistemas de primeira ordem quando apresentarem somente pólos na forma de raízes reais ou uma combinação de sistemas lineares em série e sistemas de segunda ordem quando apresentarem pólos como raízes complexas conjugadas. Observa-se que a inclusão de sistemas com pólos complexos conjugados atribui a característica de sub-amortecimento para o sistema.

I.2.4.3.1) Resposta Degrau Unitário para Sistemas de Ordem 2 e 1

Para um sistema de ordem superior com uma (1) raiz e dois (2) pólos a solução no domínio temporal para a perturbação degrau unitário é dada pela equação (I.2.4.3.1.1)

$$Y(t) = k_E\left[1-\left(\frac{T_1-\xi_1}{T_1-T_2}\right)e^{-t/T_1}-\left(\frac{T_2-\xi_1}{T_2-T_1}\right)e^{-t/T_2}\right] \qquad \text{(I.2.4.3.1.1)}$$

O estudo mais detalhado da equação (I.2.4.3.1.1) mostra que para valores positivos de ξ_1, tem-se:

- $\xi_1 > T_2$;

Para estes sistemas, onde a constante de tempo para as raízes é maior que a constante de tempo, para os pólos à resposta do sistema ultrapassa o valor de K_E estudado para sistemas de segunda ordem sem zeros com um tempo constante ξ_1 suficientemente grande.

- $\xi_1 = T_1$ *ou* T_2;

Neste caso, um dos pólos é cancelado e o valor da resposta é idêntica a um sistema de primeira ordem com constante de tempo igual a constante ξ_1.

- $T_1 < \xi_1 < T_2$;

Para este caso, a resposta apresenta pequena variação, quando comparado com sistemas de primeira ordem, principalmente para pequenos valores de ξ_1 em comparação com T_1 e T_2, sem ultrapassar o valor de K_E.

Assim, de uma forma geral pode-se caracterizar a resposta degrau unitário com zeros para sistemas lineares de ordem superior $q = 1$ e $p = 2$, em quatro (4) tópicos principais:

1) O sistema apresenta resposta mais imediata, atribuída ao aumento de velocidade de resposta introduzido pela constante ξ_1;

2) Pode –se acelerar a resposta até o ponto onde o 'overshoot' ocorre quando o valor da ξ_1 é maior que as duas constantes de defasagem T_1 e T_2;

3) Para estes sistemas o valor da derivada na origem é diferente de zero. A inclinação é positiva quando K_E e ξ_1 têm o mesmo sinal e negativa quando eles têm sinais opostos. Obviamente esta informação introduz o conceito para sistemas lineares com resposta inversa.

4) O fator de relutância inerente pode ser expresso na equação (I.2.4.3.1.2):

$$J_{(2,1)} = \int_0^{\infty} [y^* - y(t)]dt = K_E(T_1 + T_2 - \xi_1) \qquad \text{(I.2.4.3.1.2)}$$

A expressão (2.5.3.1.5) mostra que os sistemas com zeros são menos relutantes que os correspondentes sistemas de primeira e segunda ordem, porque em geral a presença do da constante de tempo ξ_1 acelera a resposta e portanto diminui a inércia do mesmo. Mas, para valores muito grandes de ξ_1 a área referente ao 'overshoot' pode ultrapassar a área referente ao tempo de subida, atribuindo valores negativos para o tempo de relutância. Quando o valor da constante $\xi_1 = T_1 + T_2$, o valor de área zero não significa que a resposta é instantânea, sendo apenas uma indicação que a área acima da linha média do valor estacionário é igual à área abaixo da mesma linha.

I.2.4.4) Sistemas Lineares com Resposta Inversa

Basicamente processos que apresentam resposta inicial à perturbação degrau em direção oposta ao valor estacionário são definidos como processos lineares com resposta inversa. Considera-se o sistema no qual a função de transferência é composta por uma função de transferência principal e uma função de transferência secundária de sinal oposto, ambas com ganho positivo.

Dessa forma a dinâmica destes processos é dada pelo somatório, neste caso a diferença, entre as funções características.

Para uma perturbação degrau unitário, a resposta final no estado estacionário é simplesmente a diferença dos ganhos correspondentes ao processo principal e secundário. Como o ganho para o processo principal por hipótese é maior que o secundário, no estado estacionário o sistema terá inclinação positiva. Observe-se que se o sistema principal tiver inclinação negativa, no estado estacionário o processo terá inclinação negativa.

Para o estado inicial pode-se desenvolver a diferencial para a diferença entre as dinâmicas dos dois sistemas, conforme a equação (I.2.4.4.1).

$$y(t) = y_1(t) - y_2(t)$$

$$\left.\frac{dy}{dt}\right|_{t\to 0} = \left.\frac{dy_1}{dt}\right|_{t\to 0} - \left.\frac{dy_2}{dt}\right|_{t\to 0} = \frac{K_{E_1}}{T_1} - \frac{K_{E_2}}{T_2} \qquad \text{(I.2.4.4.1)}$$

Em resumo, sistemas de respostas inversas somente serão possíveis quando o sistema secundário:

1- tiver ganho estacionário menor que o sistema principal, garantindo $K_{E2} > K_{E1}$;

2- tiver resposta mais rápida que a associada ao sistema principal.

Assim, para obter resposta inversa, têm-se os seguintes requisitos:

a) Inicialmente inclinação negativa e positiva no estado estacionário;

Os dois ganhos são positivos e:

$K_{E1} > K_{E2}$, $K_{E2} / T_2 > K_{E1} / T_1$, o que significa $K_E > 0$ e $\xi < 0$.

b) Inicialmente inclinação positiva e negativa no estado estacionário.

Os dois ganhos são negativos e:

$|K_{E_1}| > |K_{E_2}|, |K_{E_2}/T_2| > |K_{E_1}/T_1|$, o que significa $K_E < 0$ e $\xi < 0$.

Conclui-se que para a existência da resposta inversa o ganho da função pode ser de qualquer sinal, mas a constante de tempo ξ tem que ser menor que zero. Em outras palavras, a função de transferência destes sistemas tem zero 'positivo' (metade direita do plano imaginário).

A solução deste sistema para processos com perturbação degrau unitário é representada pela equação (I.2.4.4.2).

$$y(t) = K_E\left[1 - \left(\frac{T_1 + \eta}{T_1 - T_2}\right)e^{-t/T_1} - \left(\frac{T_2 + \eta}{T_2 - T_1}\right)e^{-t/T_{21}}\right] \qquad \text{(I.2.4.4.2)}$$

onde $\xi = -\eta$, ou seja a constante de tempo para os zeros da função assume valores de sinal contrário ao das raízes do polinômio no denominador da equação característica.

O tempo de inversão de um processo linear com perturbação degrau unitário pode ser determinado pela derivada da equação (I.2.4.4.2), igualando-se a zero.

Quando são adicionados mais pólos a equação característica do sistema o efeito é semelhante ao estudo de funções lineares com p pólos, acelerando a resposta do sistema, isto é, tornando-o mais imediato e diminuindo o efeito da resposta inversa.

Para sistemas com um maior número de zeros na equação que descreve a dinâmica do processo tem-se dois casos:

a) Um número 'ímpar' de zeros no plano direito do domínio imaginário 's';

Independente do número de zeros 'ímpares', a direção inicial do sistema será sempre oposta à direção final do sistema no estado estacionário.

b) Um número par de zeros no plano direito do domínio imaginário 's'.

A direção inicial do sistema será sempre igual à direção final do sistema estado estacionário, sendo o número de zeros "pares" igual ao número de inversões do sistema.

I.2.5) Sistemas Não-lineares

Os sistemas não lineares são representados por sistemas nos quais:

- princípio da superposição não pode ser empregado, isto é, uma perturbação simultânea não pode ser representada pelo somatório das perturbações individuais;
- a magnitude e as características dinâmicas da resposta degrau são dependentes das condições iniciais do sistema;
- uma perturbação degrau A não pode ser determinada a partir da perturbação degrau unitária vezes a magnitude A;
- uma perturbação degrau positiva, não é representada como o rebatimento de uma perturbação degrau negativa;
- a função de entrada é diferente da função de saída para o sistema.

Para a resolução de tais sistemas a metodologia não pode ser descrita como estudado para processos lineares e certamente será dependente do processo a ser analisado.

Sugestivamente processos não - lineares podem ser resolvidos por:

A) Rigoroso Tratamento Analítico

Poucos processos não-lineares apresentam solução analítica possível, devido à inexistência de uma teoria geral para a solução formal de tais sistemas. Ao contrário de sistemas lineares, os sistemas não – lineares são identificados por soluções particulares e específicas.

Na literatura são encontrados métodos clássicos para a resolução de sistemas não – lineares de forma analítica segundo Poincaré, Krylov e Bogolyubov, bem como as técnicas de Liapunov, Hopf, Golubitsky e Arnold, citados por Ogunnaike e Ray (1994).

B) Transformação de Variáveis

A transformação de variáveis é baseada na possibilidade de representar um conjunto de variáveis não lineares em variáveis lineares, as quais são aplicáveis à teoria de controle para processos lineares, resolvendo-se o processo e regressando para as variáveis não-lineares ao final, a fim de expressar a resposta.

C) Soluções Numéricas e Simulação Computacional

Uma vez definido que soluções algébricas para processos não-lineares que em última análise são representados por equações diferenciais, apresenta formas bastante limitadas; a solução por métodos numéricos é sempre uma alternativa a ser considerada.

A aplicação de métodos numéricos pode ser resumida abaixo:

- A equação diferencial tem solução desconhecida;

$y = \delta(t)$, onde $\delta(t)$ é a solução desconhecida.

- A solução contínua da equação diferencial é representada por uma discretização numérica a intervalos de tempo definidos;

- O conjunto de intervalos discretizados passa a gerar uma equação de diferenças, substituinte da equação diferencial, produzindo a solução mais exata, quanto menor o tamanho dos intervalos de tempo, considerando a capacidade computacional;

- A aproximação da solução numérica com a solução desconhecida é normalmente pequena para métodos numéricos apropriados, caracterizando erros computacionais pequenos;

- A diferença dos diversos métodos numéricos é baseada nas distintas formas nas quais a função contínua de solução desconhecida é aproximada para que se determine a solução numérica aproximada.

Observa-se que um método numérico nem sempre garante convergência, sendo o método propriamente dito e a natureza do sistema, associados à capacidade computacional os principais fatores responsáveis pela convergência e exatidão da solução numérica. Dentre os principais métodos de resolução numérica pode-se listar: Método de Euler, Método de Euler Melhorado, Método de Runge-Kutta, Método dos Poliedros Convexos, Newton – Rapson, Simples, Quasi – Newton.

D) Linearização

A linearização é a aproximação de um sistema não linear para um sistema linear conhecido. O método mais conhecido é a expansão em séries de Taylor

A expansão em séries de Taylor pode ser usada para sistemas com mais variáveis, utilizando-se o mesmo princípio, observando-se que as derivadas serão parciais para cada componente.

Este método apresenta a restrição de ser pontual, pois à medida que o valor de x se afasta do valor de x_s escolhido, a aproximação linear perde efeito, principalmente para não-linearidades severas.

I.2.5.1) Principais Não-Linearidades

A existência de sistemas não – lineares na indústria alimentícia é bastante comum, as quais embora os métodos de linearização discutidos acima sejam úteis, para a resolução de tais sistemas, a implementação de uma forma de controle adequado será quase sempre mais complexa. Será visto que, embora o sistema seja complicado, o conhecimento algébrico de suas variáveis não é premissa para o seu controle, como normalmente é assumido quando se toma como ponto de referência à teoria clássica de controle.

Como a maioria dos elementos de controle, apresentam certa não-linearidade, caso específico de válvulas de controle de vazão, a não – linearidade de um sistema é o somatório de diversas outras não linearidades. Muitas vezes mesmo com esse comportamento a aproximação por um sistema linear é solução bastante razoável para empregar o controle automático do sistema.

São listadas algumas das principais não linearidades nas próximas seções. Observa-se que a não linearidade pode ser dividida entre contínua e descontínua, sendo este segundo caso o pior caso de controle a ser resolvido. A não linearidade contínua não apresenta saltos ou mudanças súbitas de inclinação (Coelho, 1995).

I.2.5.1.1) Atrito

O atrito definido como fenômeno de resistência ao movimento, com grande dissipação de energia, é exatamente o princípio gerador da maior quantidade de energia em um extrusor comercial. Para este caso o atrito é a composição entre a 'vazão de pressão'(provocada pela pressão) e 'vazão de arraste' (vazão provocada pelo arraste) ao longo do extrusor.

I.2.5.1.2) Valor Absoluto

Usualmente presente em componentes elétricos de válvulas e conversores digital/analógico e analógico/digital. Este processo é definido não linear através da natureza da função módulo, que é o rebatimento dos valores positivos para a parte negativa do plano cartesiano.

I.2.5.1.3) Saturação

A saturação é provavelmente o fenômeno mais comum entre todas as não-linearidades. Este efeito é baseado na incapacidade física que os componentes internos de um sistema têm em responder proporcionalmente a um sinal de entrada para todo o intervalo de resposta. Este problema é muitas vezes resolvido pela análise linear do intervalo dividido em segmentos menores.

I.2.5.1.4) Zona Morta

Esta não – linearidade é caracterizada pela resposta nula referente a pequenas perturbações, como para o posicionador de uma válvula com sinais de entrada bem pequenos.

Esta anomalia é identificada por sistemas de controle bem desenhados, mas de qualquer forma, é relacionada com a correta seleção de válvulas de controle, o que é precisamente um problema nas indústrias em geral.

I.2.5.1.5) Histerese

A histerese é a resposta oriunda de folgas mecânicas ou histerese magnética. As principais folgas mecânicas na extrusora são encontradas no sistema de transmissão da potência elétrica do motor para a rotação do eixo, muitas vezes realizado por um conjunto

de polias. A valores de potência elevados a histerese pode ser bastante acentuada e certamente se confunde com a inércia associada a variações na matéria – prima e reações químicas ao longo do processo de extrusão.

I.2.5.1.6) Controle de Duas – Três Posições

Este controle também é conhecido por relés e basicamente trabalha com valores definidos, aos quais então é aplicada ação de controle. É típico para válvula do tipo aberta, aberta 50% e fechada. Observa-se que de tempo em tempo, quando o sistema entra em atuação, é introduzida uma não – linearidade a resposta. O relé pode ser encarado como um amplificador de potência não – linear que possibilita grandes amplificações de potência, podendo conter não – linearidades tais como histerese, zona morta, saturação e valor absoluto.

I.3) PARÂMETROS DO CONTROLADOR PID PARA SISTEMAS LINEARES

Assumindo-se que uma certa perturbação degrau seja aplicada, por exemplo, no processo de extrusão no instante $t = 0$ com amplitude R_0, a entrada e a saída da extrusão podem ser expressas na equação (I.3.1), respectivamente:

$$r(t) = R_0 u_{-1}(t), R_0 \neq 0$$
$$y(\infty) = \lim_{t \to \infty} y(t) \qquad \text{(I.3.1)}$$

Para um sistema com dinâmica linear invariante com função de Transferência $W(s)$ pode-se escrever a dinâmica no domínio imaginário pela aplicação da Transformada de Laplace, conforme a equação (I.3.2) . O valor no estado regime permanente é dado pela equação (I.3.3).

$$Y(s) = W(s)R(s) = \frac{R_s W(s)}{s} \qquad \text{(I.3.2)}$$

$$y(\infty) = W(0)R_0 \qquad \text{(I.3.3)}$$

onde o ganho estático é representado por *W(0)*. Esta equação é válida também para sistemas com condições iniciais não nulas, uma vez que nesses sistemas a resposta livre é sempre zero (Stephanopoulos, 1984).

A duração e a forma da resposta transitória são dependentes dos pólos e zeros em sistemas lineares.

I.3.1) Características da Resposta Degrau

O estado transitório pode ser avaliado através das características da resposta degrau:

1- O sistema possui inércia intrínseca, o que gera resposta inicial nula;

2- A estabilidade do sistema garante resposta finita para qualquer tempo *t*, garantindo, para a Função de Transferência, todos os pólos com parte real negativa;

3- As características da resposta degrau são caracterizadas por frações da resposta final associados a crescentes intervalos de tempo.

No gráfico representado na Figura 3 são mostradas as principais características para uma resposta degrau típica de um sistema oscilatório estável (Coelho, 1995). Observa-se que a normalização *(y(t)/y(∞))* empregada, torna o sistema independente do valor da amplitude do degrau e apresentará valor final sempre igual a 1.

❖ Tempo de Subida *(t_r)*: é o tempo de subida *'ta'*, necessário para que a resposta *y(t)* varie de *a_1=10%* até *a_2=90%* do valor final pela primeira vez, expresso pela equação (I.3.1.1):

$$t_r = \min\left\{\left(t_{a_2} \middle| \frac{y(t_{a_2})}{y(\infty)}\right) - \left(t_{a_1} \middle| \frac{y(t_{a_1})}{y(\infty)}\right) = \alpha\right\}, 0 < \alpha > 1 \qquad \text{(I.3.1.1)}$$

Para sistemas sub-amortecidos o tempo de subida é considerado entre 0 e 100%.

❖ Tempo de passagem por transitório nulo *(t_0)*: é considerado o tempo em que a parcela transitória da resposta a perturbação degrau se anula pela primeira vez, representada na equação (I.3.1.2).

$$t_0 = \min\left\{t_a \middle| y(t_a) = y(\infty)\right\} \qquad \text{(I.3.1.2)}$$

❖ Tempo de pico *(tp)*: é o tempo necessário para a resposta atinja o primeiro supremo *Mp*, conforme a equação (I.3.1.3).

$$\frac{y(t_p)}{y(\infty)} = \max_t\left[\frac{y(t)}{y(\infty)}\right] = M_p, M_P > 1 \qquad \text{(I.3.1.3)}$$

❖ Ultrapassagem Máxima 'Overshoot' *(M_0)*: é definido como a diferença entre a maior amplitude *(Mp)*, no mesmo sentido do valor final, e o próprio valor final, dado pela equação (I.3.1.4).

$$M_0\% = (M_P - 1)x100\% = \frac{y(t_P) - y(\infty)}{y(\infty)}x100\% \qquad \text{(I.3.1.4)}$$

❖ Tempo de acomodação *(t_s)*: é o tempo necessário para que a resposta entre dentro do intervalo de erro ε definido e permaneça nele após esse tempo, conforme a equação (I.3.1.5):

$$t_s = \min\left\{t_b \left| \frac{y(t)}{y(\infty)} - 1 \right| \le \varepsilon, \forall t \ge t_b \right\} \qquad \text{(I.3.1.5)}$$

Usualmente ε é definido entre 2% (0.02) e 5% (0.05).

❖ Retrocesso 'Undershoot' *(L_p)*: é valor absoluto da maior amplitude negativa da resposta normalizada, ou seja, em sentido oposto ao valor final, conforme a equação (I.3.1.6).

$$L_P = \left|\inf_t\left[\frac{y(t)}{y(\infty)}\right]\right| \qquad \text{(I.3.1.6)}$$

Este conceito não apresenta relação com o tempo morto, mas representa conforme estudado o comportamento de funções com resposta inversa.

❖ Período de oscilação aparente *(T_d)*: é definido com a duração da primeira oscilação detectada a partir do tempo de passagem por transitório nulo, dado pela equação (I.3.1.7).

$$T_d = \min\left\{Ty(t_0 + T) = y(t_0), \frac{y(t_0 + T)}{y(\infty)} > 0\right\} \qquad \text{(I.3.1.7)}$$

❖ Número de Oscilações até o tempo de acomodação (*Ns)*: uma vez conhecido o tempo de acomodação e o período de oscilação, o número de oscilações é calculado conforme a equação (I.3.1.8).

$$N_s = \frac{t_s}{T_d} \tag{I.3.1.8}$$

❖ Tempo morto *(tm)* : é o tempo necessário ao qual após o instante zero da perturbação o sistema começa a apresentar resposta diferente de zero para o valor normalizado da resposta.

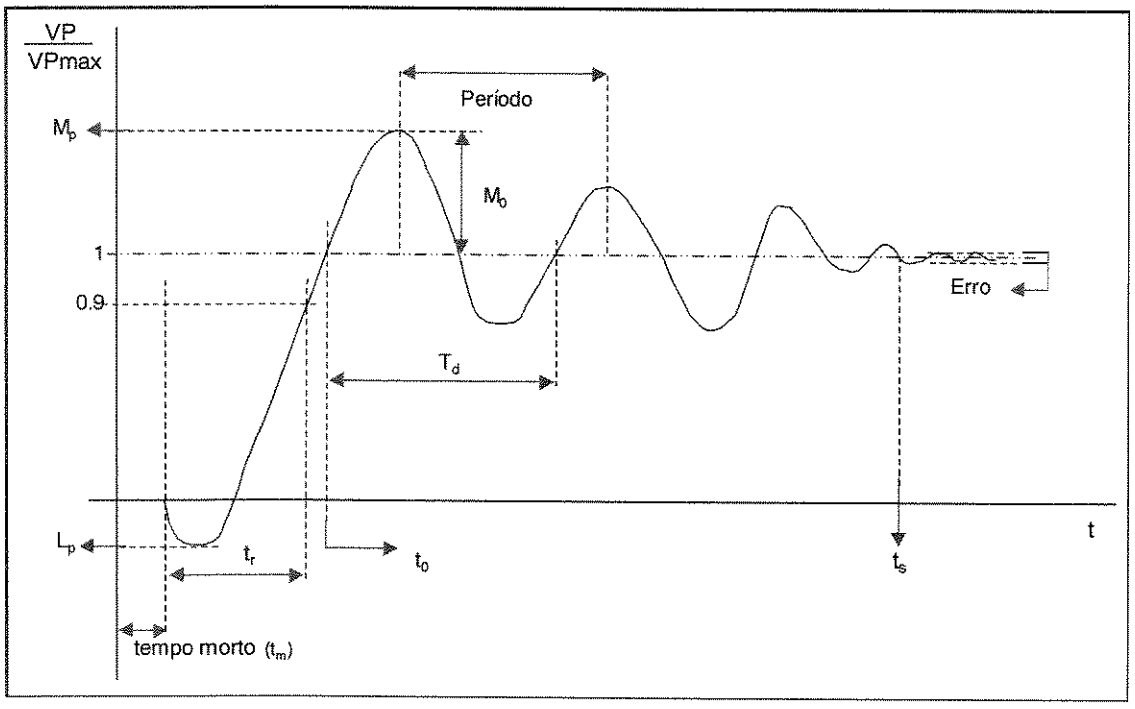


Figura 3:Resposta Degrau Normalizada para um Sistema Estritamente Próprio Estável (Coelho, 1995).

I.3.2) Estratégias de Controle

O controlador é considerado o 'cérebro' da malha de controle e a sua configuração pode ser projetada segundo diferentes configurações, dentre as quais os modelos 'feedback', 'feedforward', 'ratio', 'override', 'split-range', cascata, preditivo, adaptativo, inferente e técnicas avançadas de controle, dentre as quais os sistemas 'Model Free

Adaptive' (*MFA*), a lógica *fuzzy* e os sistemas puramente neurais; que compõem a maioria das aplicações para pesquisa e instalações industriais (Haley e Mulvaney, 1995).

Os controladores 'feedback' executam a ação de controle baseados no cálculo dos valores de saída *y(t)* comparados através de uma função erro *E(t)* com o valor de 'set point' da variável controlada, comumente conhecida como variável de processo. A resposta de controle pode assumir quatro formas básicas: liga desliga (*on-off*), proporcional, integral e derivativa (Hsieh e Mulvaney, 1988).

O controle liga-desliga usualmente apresenta duas posições, aberto ou fechado, constituindo-se na forma mais simples do controle 'feedback', avaliando-o pelo sinal da função erro. Em algumas aplicações industriais é apresentado com três posições: aberto, aberto 50% e fechado, ou ainda a introdução de um limite superior e inferior ao qual a ação está baseada. Entretanto com muitas limitações para o controle com exatidão de processos alimentícios.

Para o controle Proporcional (*P*) usa-se o princípio que o tamanho da resposta *y(t)* é proporcional ao tamanho do erro *E(t)*. A principal característica deste tipo de controle é o ganho *Kc*, que representa a mudança percentual na medida, a 'set point' constante, necessária para causar uma mudança de 100% no valor da resposta. O ganho é a relação da mudança no valor da resposta para o erro gerado, sendo avaliado pela sensibilidade, dada pela magnitude do erro medido. Tão importante quanto o ganho é a faixa de controle, que permite ao controlador a mudança nos valores de resposta, a fim de reduzir o valor do erro.

A ação de controle Proporcional / Integral (*PI*) baseia-se no princípio que a resposta é proporcional ao sinal, tamanho e duração do erro. Enquanto a ação proporcional 'amarra' a resposta com o erro, a ação integral prossegue até que seja alcançado o valor de 'set point' (erro zero). Evidente que, por esse comportamento, é bastante associada a controles 'feedback', requerendo devido à natureza da sua resposta gradual, a presença de um elemento de atraso no controlador, o que causa um acerto atraso através do controlador, provocando um aumento no período da oscilação da resposta.

Embora as ações *P* e *I* requeiram erros significativos para que o controle possa atuar, a ação Derivativa (*D*) permite a ação de controle relacionada com a taxa a qual o valor da resposta muda. Uma vez que a ação derivativa é 'amarrada' com a taxa de mudança no valor da resposta, quando este não sofre alteração o controle *D* assume o valor zero.

Observa-se que a ação *D* sempre se opõe a mudança. Mesmo que o valor da resposta esteja se afastando do valor do 'set point'.

O controle baseado em estratégia 'feedforward' mede antecipadamente mudanças nas variáveis de entrada, e efetua a correção antes que estas disturbâncias afetem o processo. Para que a sua atuação seja efetiva, é necessário o preciso conhecimento da influência das disturbâncias nas variáveis de resposta. Pela alteração das variáveis de entrada e conhecimento do processo, muitas vezes dado pela relação entre o ganho e as condições do processo estacionário, o controle 'feedforward' altera momentaneamente os valores de saída para o controle 'feedback'. A sua aplicação é indicada para processos onde as disturbâncias no processo podem ser preditas e/ou são mensuradas, a fim de que se estabeleçam relações significativas para as mudanças sofridas pelas variáveis de processo (Haley e Mulvaney, 1995).

I.3.2.1) O Controlador *PID*

O controlador *P* inevitavelmente irá apresentar um valor de erro, o que certamente é uma desvantagem para controles que requeiram grande exatidão para o valor da resposta. A ação *I* é normalmente associada a controles *P* formando o controle *PI*, com performance superior para a eliminação do erro associado à resposta. A associação do controlador *P* com o controlador *D* , *PD*, provoca uma ação antecipativa muito forte a dinâmica do processo, uma vez que existe a tendência a redução no período de oscilação, podendo promover o colapso para a avaliação do erro. A incorporação do controlador *D* ao controle *PI* forma o conhecido controlador *PID*, que pela característica derivativa do controle *D*, tende a anular o efeito de atraso do controle *I*, produzindo períodos de oscilação menores, com pequeno aumento ganho proporcional do sistema. Os sistemas *PID* oferecem grande vantagem para sistemas com significativa inércia associada e tempo morto relativamente pequeno (Hsieh e Mulvaney, 1988). O comportamento descrito para as formas *P*, *PI*, *PD* e *PID*, juntamente com um sistema em malha aberta pode ser observado na Figura 4, onde a variável *C* é apresentada como desvio em relação ao valor inicial em regime permanente, após a perturbação degrau.

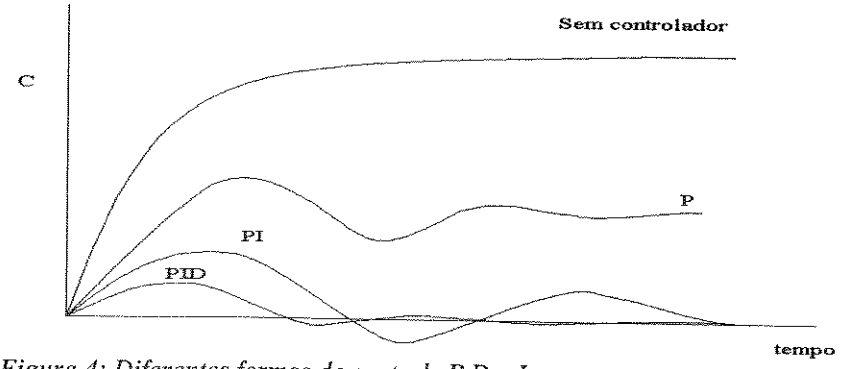


Figura 4: Diferentes formas de controle P,D e I.

O controlador *PID* pode ser representado na sua forma contínua pela equação (I.3.2.1.1):

$$CS(t) = K_C \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(t).dt + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \qquad \text{(I.3.2.1.1)}$$

onde K_C, τ_I e τ_d são o ganho, o tempo Integral e Derivativo, respectivamente.

A determinação dos valores do controlador *PID* está baseada na análise da curva sigmoidal de resposta do processo a ser controlado, conforme mostrado na Figura 5. Para processos com dinâmica indeterminada, nos quais a função de transferência não é conhecida, a análise baseada em dados experimentais assegura o conhecimento dos parâmetros do controlador (Stephanopoulos, 1984). Este fato não garante que o processo seja controlável, uma vez que o mesmo pode ser variante no tempo.

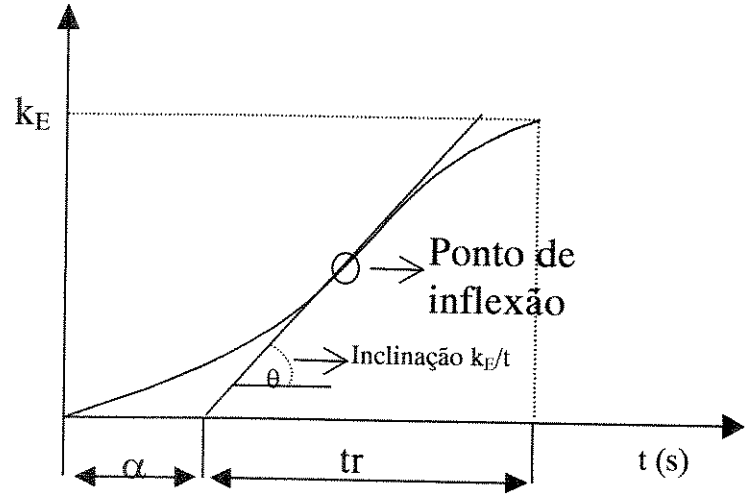


Figura 5:Curva Sigmoidal da Resposta de Processo.

Pela análise da curva resposta, determina-se o valor de $K_E = Ym/\Delta u$, que representa a tangente da curva resposta. O valor α é aproximado como o tempo morto associado ao processo e o valor *tr* representa o tempo de subida. O valor do período *Pu* é determinado pela equação (I.3.2.1.2), e a constante especial K_{cu} do ganho K_c pela equação (I.3.2.1.3).

$$P_u = 4\alpha \qquad \text{(I.3.2.1.2)}$$

$$K_{cu} = \left(\frac{2}{K_E}\right)\left(\frac{t_r}{\alpha}\right) \qquad \text{(I.3.2.1.3)}$$

O Quadro 1 apresenta as sintonias de controladores propostas por Ziegler e Nichlols baseados no método da curva resposta. Após verificado a melhor alternativa, finalmente determina-se o valor dos três parâmetros *P*, *I* e *D* em função dos valores de K_C, τ_I e τ_d .

Quadro 1: Métodos de Sintonia para Controladores PID (Stephanopoulos, 1984).

ZIEGLER-NICHOLS Stability Margin Controller Tuning Parameters							
	Parâmetros	**Kc**	σ_I	σ_D	**P**	**I**	**D**
P	Equação	0,5 K_{cu}	-	-	Kc	-	-
PI	Equação	0,45 K_{cu}	P_u / 1,2	-	Kc	Kc / σ_I	-
PID	Equação	0,6 K_{cu}	P_u / 2	P_u / 8	Kc	Kc / σ_I	Kc*σ_D
ZIEGLER-NICHOLS Approximate Model PID Tuning Rules							
P	Equação	(1 / K_E)* (t_r / α)	-	-	Kc	-	-
PI	Equação	(0,9 / K_E)* (t_r / α)	3,33 α	-	Kc	Kc / σ_I	
PID	Equação	(1,2 / K_E)* (t_r / α)	2,0 α	0,5 α	Kc	Kc / σ_I	Kc*σ_D

I.3.2.2) O controlador 'Model Free Adaptive' – *MFA*

O controlador comercial 'Model Free Adaptive' (*MFA*) pertence ao grupo de controles digitais uma vez que se constitui em software de controle que necessita de uma plataforma para poder processar os dados do sistema, usualmente numa unidade *CPU* ou sistema supervisório.

A estratégia usada pelo controlador *MFA* é uma evolução do conceito tradicional de sistemas *PID*, a fim de suportar aplicações mais complexas, como é o caso de sistemas interativos e não-lineares. A análise e ação de controle são baseadas no conceito desenvolvido para o controlador *PI*, com uma variável integral e um ganho geral resultante dos diversos ganhos isolados do sistema. A rede neural possibilita a ação integral através da soma dos erros das perturbações individuais medidos, empregando um sistema variável que define diferentes contribuições para cada variável isolada ao longo do tempo. Por este motivo o controlador consegue reavaliar constantemente os parâmetros de sintonia inicialmente projetados para achar um valor ótimo, admitindo variações na dinâmica do processo, as quais impossibilitam o emprego de técnicas de controle convencionais.

O funcionamento da rede neural, mais especificamente, inicia pelo armazenamento da 'história' dos erros, através de blocos de atraso no final da rede. Então, o erro mais recente medido entra no começo do armazenamento, sendo deslocado um nível a baixo na rede neural à medida que o novo erro é medido. Depois desse procedimento, a rede neural multiplica cada erro pertencente a 'história' do controlador por fatores de peso (variáveis com o tempo); sendo a soma final submetida a um conjunto de filtros, produzindo o valor interno da resposta. Esse valor, então, é somado ao corrente erro medido e a soma é multiplicada pelo ganho atribuído ao sistema, finalmente, resultando na ação de controle. Observe que o fato deste controlador apresentar 'história', é análogo ao conceito de memória e pela forma adaptativa (tomar 'decisões') pode ser inserido na classificação de controle inteligente.

As principais características do controlador *MFA* são listadas abaixo (CYBOCON User Manual, 1998):

- Dispensável o conhecimento algébrico preciso do processo a ser controlado;

- Sem identificação quantitativa do processo, isto é, a função de transferência não necessita ser conhecida;
- O controle não necessita especificidade;
- Aplicável a sistemas não lineares;
- Aplicável a sistemas com significativos tempos mortos;
- Aplicável a sistemas tempo variante;
- Aplicável para sistemas multivariáveis;
- Simples para operação;
- Estabilidade avaliada em malha fechada;
- Alta velocidade de convergência.

Mesmo não sendo apontada nenhuma limitação para o sistema neural 'Model-Free Adaptive', a maior dificuldade parece ser encontrada para a aplicação em sistemas que apresentem comportamento reverso brusco e / ou interação entre as variáveis independentes variável conforme a proporção entre elas. Como será visto posteriormente este é exatamente o caso do processo de extrusão. A aparente complexidade dos cálculos conduzidos na rede neural pode promover um certo receio para sua utilização.

I.3.3) Natureza do Conjunto de Variáveis para Aplicação do Controle

Com o avanço das técnicas computacionais as estratégias de controle podem ser usadas de forma combinada para controlar processos com ganho em velocidade, precisão e exatidão, nos quais a relação entre as variáveis independentes (manipuláveis) e de controle (processo) pode ser definida em dois grandes grupos: sistemas *SISO* e sistemas *MIMO*.

I.3.3.1) Sistemas *SISO*

Os controles single-input, single output são os mais simples apresentados na teoria de controle, os quais são comuns no campo industrial. Quando o processo é de natureza *SISO* o sistema de controle opera com uma entrada e uma saída na malha de controle, o que não garante linearidade para o mesmo. Caso esse sistema seja linear, o uso de *PID* é normalmente empregado, devido à simplicidade do controlador e o baixo custo da malha de controle se comparado com controladores mais complexos. Observa-se aqui, que um conjunto de sistemas *SISO* é considerado um sistema múltiplo, mas, pode ser controlado por um conjunto de *PID's* em arranjos cascata ou por sistemas não – acoplados.

I.3.3.2) Sistemas *MIMO*

Sem dúvida, o maior desafio na indústria alimentícia é o controle de processos multivariáveis, onde duas ou mais variáveis produzem dois ou mais efeitos importantes, que necessitam ser controlados. Esses sistemas são conhecidos como 'multiple-input, multiple-output'. O controle de tais processos pode ser efetuado qualitativamente, quando são usadas regras lógicas e lógica heurística , ou quantitativamente, quando são empregados modelos matemáticos (Perkins e Kookos, 2000).

Definindo-se a natureza multivariável do processo deve-se determinar o grau de liberdade do mesmo, que é dado pela diferença entre o número de variáveis independentes e o número de equações independentes para as mesmas variáveis. Entretanto para essas resoluções é necessário um conhecimento superior da dinâmica do processo (Stephanopoulos, 1984). Obviamente essas relações podem ser obtidas por análise de dados experimentais.

Geralmente os sistemas *MIMO* possuem interação das variáveis independentes para a expressão das variáveis de resposta, necessitando de técnicas que operem a função de transferência para uma variável como resultado 'algébrico' das duas funções de transferência relacionadas a cada variável independente para a variável de processo. Esses sistemas são representados por um processo de controle acoplado, onde se deve classificar a

influência de uma determinada variável independente normalmente como forte ou fraca para duas variáveis de processo.

O caso mais complexo encontrado em controles *MIMO's* acoplados ocorre quando além da interação citada acima, existe interação entre as variáveis independentes com diferente comportamento, dependendo da proporção entre as mesmas. Obviamente sugere-se o estudo detalhado dessas interações de forma qualitativa e, em muitas vezes, um controle preliminar 'ratio' associado com sistemas compensatórios 'feedforward', é uma solução bastante eficiente, entretanto de difícil sintonia.

I.4) EXTRUSÃO PARA 'PET FOOD'

O processo de extrusão relacionado para a produção de alimento para animais de estimação (rações), assim como as demais aplicações nas indústrias alimentícias (cereais matinais, arroz instantâneo, massa instantânea, produtos de panificação, salgadinhos, amidos modificados, rações para peixes, produtos texturizados) (Kearns; Rokey e Huber, 1988), é uma das operações unitárias mais empregadas atualmente, que pode ser avaliada como uma composição entre transporte, mistura, compressão, cozimento e expansão de um dado grupo de matérias–primas (Yeh e Jaw, 1998).

Nos últimos vinte (20) anos, devido a maior disponibilidade de diversas matérias–primas, verificou-se um avanço muito grande para o processo de extrusão, visto a sua grande flexibilidade (Sunderland, 1993) para misturas diversas de fontes de proteínas, carboidratos, gorduras, fibras, sais minerais, vitaminas e corantes em um mesmo meio reacional, acelerando a produção de extrusores comerciais, desenvolvidos em sua grande maioria para aplicações específicas, adequados para conceitos de otimização energética e características de qualidade para os produtos manufaturados (Paton et al., 1980) . Este avanço tecnológico necessita de uma base científica também mais complexa para a elucidação do fenômeno físico-químico (Cayot; Bounie e Baussart, 1995).

A extrusão é um processo contínuo tipo HTST (*High Temperature, Short Time*) de bioreação (Mercier; Linko e Harper, 1989) que combina a temperatura e pressão para a expansão (Mathew; Hoseney e Faubion, 1999) no qual amidos são gelatinizados e

hidrolisados, proteínas desnaturadas, açúcar dissolvidos e uma série de microingredientes intimamente misturados, modificações químicas de hidrocolóides, remoção de solvente e odores, produção de complexos proteínas-polissacarídeos (Shukla, 1993) derretidos a cerca de 180 ^{0}C por poucos segundos (Renard e Bimbenet, 1988) e reestruturados para serem expandidos na forma geométrica desejada (Sunderland, 1993). Essas alterações dependem do tipo e quantidade de energia transferida para a massa a ser extrusada (Mathew; Hoseney e Faubion, 1999).

Quimicamente, através do processo de extrusão, materiais úmidos, expansíveis, amiláceos e/ou proteináceos, fibrosos e gordurosos são plastificados em um duto através da combinação de umidade, pressão, calor e cisalhamento mecânico. Disto resulta elevada temperatura para a massa no extrusor, descrevendo-se o fenômeno como uma expansão exotérmica. Quando a energia mecânica (produzida pelo transporte da massa pelo parafuso de extrusão, cisalhamentos entre a massa e parede interna do extrusor) e a energia térmica (da conversão da energia mecânica e pela adição de vapor na mistura antes da entrada do extrusor e no próprio extrusor) são aplicadas durante o processo de extrusão, as macromoléculas de proteína perdem a sua estrutura organizada, formando uma massa contínua e viscoelástica. A geometria do extrusor (eixo, parte terminal e matriz) promove o alinhamento das moléculas na direção do fluxo, necessário para a exposição dos sítios de ligação, que através de ligações cruzadas perfazem a estrutura final expandida, responsável pela característica sensorial de mordida para produtos extrusados (Kearns; Rokey e Hurber, 1988). Dessa forma, este processo pode ser aproximado por um biopolímero, de estrutura e propriedades físico-químicas bem mais complexas que as matérias-primas que lhe deram origem. O estado físico-químico é alterado ao longo do extrusor, bem como as propriedades reológicas, que atualmente ainda não têm perfeito entendimento, em grande parte, devido à dificuldade de instalação de sensores precisos e reprodutíveis para a massa no extrusor. Portanto, a extrusão é ainda controlada, freqüentemente, de forma manual e empírica (Cayot; Bounie e Baussart, 1995).

Pequenas variações nas condições de processamento afetam as variáveis de processo, bem como a qualidade final do produto. As propriedades do produto extrusado são particularmente afetadas por variações físicas (distribuição granulométrica) ou químicas (umidade, percentual de amilopectina e amilose, teor de lipídios e proteínas) nas matérias-primas associadas as variáveis de manipulação e equipamento (Desrumaux; Bouvier e Burri, 1999). Entretanto, segundo Lengerich (1990), uma vez conhecido o perfil de

temperatura e atrito interno gerado, na variável temporal, a expansão é independente da configuração do equipamento. Este Conceito é bastante criticado e provavelmente é válido somente para aplicações experimentais (Onwulata, Mulvaney e Hsieh, 1994).

O processo de extrusão deve atender os seguintes parâmetros para a indústria de *PET FOOD* (Mercier; Linko e Harper, 1989):

- Processamento contínuo a altas taxas;
- Energeticamente eficiente;
- Processar matérias primas com altas viscosidades;
- Atender as especificações de qualidade do produto extrusado;
- Melhoria na textura e sabor e remoção de odores dos produtos;
- Controle das alterações térmicas nos constituintes;
- Flexibilidade no uso de matérias-primas;
- Inativação de fatores tóxicos e antigênicos;
- Instrumentação adequada e confiável.
- Baixo desgaste de equipamento;
- Ser controlável.

I.4.1) Extrusor de Eixo (Helicóide) Simples

I.4.1.1) Características Dimensionais

O conjunto conhecido como extrusor de rosca simples é dado pelo pré-condicionador e extrusor propriamente dito. O pré-condicionador é utilizado para promover a mistura contínua entre os diferentes ingredientes, o que aumenta o tempo de residência, mas diminui o consumo de energia mecânica para o extrusor. Trata-se de uma cuba com perfil cilíndrico, no qual a farinha de cereal e farinhas protéicas são uniformemente umedecidas, misturadas e aquecidas através do contato com a água e vapor no eixo duplo co-rotacional, com arranjos geométricos diferenciados, por pás auto-ajustáveis ao longo do eixo misturador. Neste podem ser adicionados ainda pasta de origem animal (bovina, suína,

avícola), óleo ou gorduras, corantes diversos e algumas misturas específicas para cada produto extrusado (Mercier; Linko e Harper, 1989).

O extrusor de rosca simples consiste em três zonas: alimentação, transição e derretimento. O parafuso simultaneamente transporta, aquece e transforma a matéria alimentícia em uma contínua massa plástica pelo esforço mecânico ao longo do extrusor. A taxa de compressão pode ser entendida pelo aumento de vazão da primeira zona para a última (chegando até 1:5), donde justifica-se o aumento significativo na compressão desde a zona de transição, exigindo maior energia mecânica para o parafuso e aquecendo severamente a massa no interior do extrusor (Mercier; Linko e Harper, 1989).

Dentro do extrusor de rosca simples a mistura dos ingredientes é bastante limitada, visto o fluxo ser laminar, uma vez que o arranjo helicoidal dos elos do parafuso desloca (*drag flow*) a massa para frente, evitando que a mesma fique estaticamente circundando uma seção do helicóide. Entretanto a essa pressão originada opõe-se a pressão da zona final do extrusor, que é minimizada pelos sulcos presentes na camisa do extrusor. Existem diversas configurações para eixos de extrusores, sendo necessário definir:

- o diâmetro do helicóide;
- a distância do elo do helicóide da camisa da extrusora;
- a altura e a largura dos elos utilizados ao longo do helicóide;
- a ângulo de inclinação para cada elo;
- o tipo de camisa (normalmente cilíndrica, ou ainda cônica) e seu comprimento;
- a presença de sulcos ou parafusos de restrição (modelo *PX-200* e Tecnal) na camisa;
- perfil cilíndrico (variação do diâmetro ao longo do eixo horizontal) do eixo maciço do extrusor e o espaçamento dos elos do helicóide (define a taxa de compressão ou popularmente o 'grau de enchimento'), além do comprimento;
- Presença de espaçadores ou quebradores de fluxo nos parafusos (Mercier; Linko e Harper, 1989).

Na figura 6, pode-se avaliar em detalhes um eixo extrusor (tipo *PX-200*).

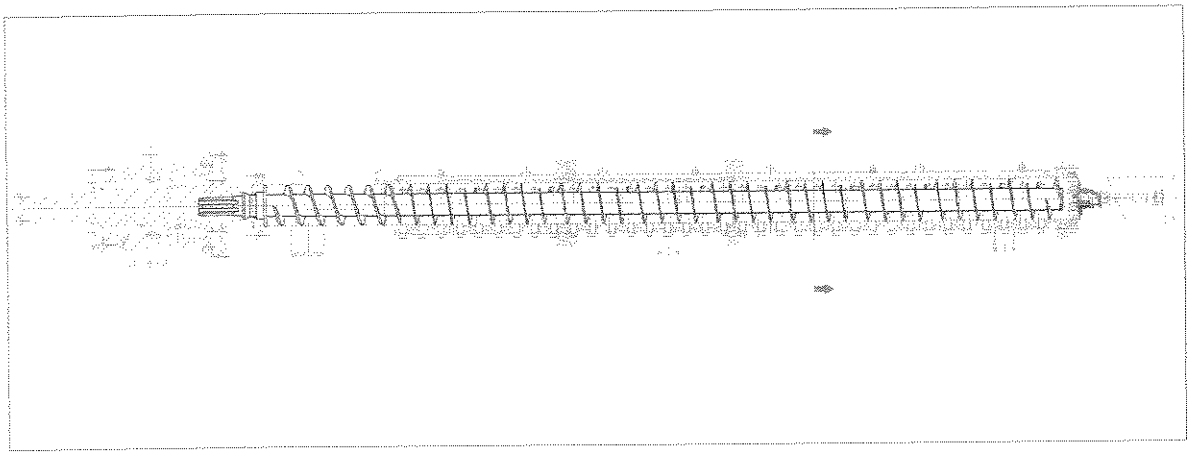


Figura 6:Eixo do Extrusor Modelo PX-200.

A complexidade do processo de extrusão implica que variações repentinas na constituição da matéria –prima, combinadas com percentual de umidade e vazão de farinha, associadas ao desgaste dos elementos de configuração do parafuso e camisa provocarão profundas modificações na qualidade do produto final.

I.4.1.2) Balanço Geral de Energia

Os extrusores são classificados pela taxa de energia líquida fornecida ao produto, dados por:

- Dissipação viscosa (μV) dada pela energia mecânica usada para manter a velocidade centrífuga do parafuso;
- Transferência térmica através das camisas (Q);
- calor latente ($m_s.\lambda$) do vapor injetado diretamente no pré-condicionador ou na camisa do extrusor.

Tem-se então, a equação (I.4.1.2.1) geral de energia para sistema, segundo Mercier; Linko e Harper, (1989):

$$E = \left({}^{(\mu V + Q + m_s \lambda)} \Big/ _{m} \right) \qquad \text{(I.4.1.2.1)}$$

Necessariamente baixos teores de umidade afetam grandemente a energia específica por dissipação viscosa que neste caso pode ultrapassar 0,36 MJ/kg, com temperaturas superiores a 150 ^{0}C para o produto. Pela equação (I.4.1.2.1), embora seja possível o fornecimento de energia para o produto através de energia mecânica, é normalmente essa a mais onerosa nas plantas industriais e, como o termo relativo às trocas térmicas entre as camisas de aquecimento é relativamente pobre, é muito comum o uso máximo de adição de vapor direto ao pré-condicionador e à camisa nos extrusores industriais.

No Quadro 2 pode-se observar algumas aplicações de extrusores em diferentes classificações, conforme seu perfil energético. Podem ser classificados desde baixa temperatura e baixa tensão de deformação até alta temperatura e alta tensão de deformação (com grande transferência de energia para dissipação viscosa) (Mercier; Linko e Harper, 1989).

Quadro 2: Emprego de Extrusores para Diferentes Aplicações (Mercier; Linko e Harper, 1989).

	EQUIPAMENTO				
Medida	*'Pasta Press'*	*'High-Pressure Forming Extruder'*	*'Low-Shear Cooking Extrude'*	*'Collet Extruder'*	*'High-Shear Cooking Extruder'*
Umidade Farinha (%)	32	25	28	11	15-20
Umidade produto (%)	30	25	25	2	4-10
Temperatura final produto, ^{0}C	52	80	150	200	180
Diâmetro do parafuso / altura da aleta ($m.10^{-2}$)	3-4	4,5	7-15	9	7
Número de espaçamentos paralelos	1-2	1	1	2-4	1-3
Rotação parafuso, 1/s	4,5	6,5	10-30	50	70
Taxa de deformação, s	5	10	20-100	140	165
Entrada líquida de energia mecânica, MJ/kg	0,11	0,14	0,14	0,36	0,40
Injeção de vapor, MJ/kg	0	0	0,11	0	0
Troca de calor na camisa de resfriamento, MJ/kg	- 0,04	- 0,04	0-0,11	0	-0,11-0
Energia líquida para o produto MJ/kg	0,07	0,10	0,25-0,36	0,36	0,29-0,40
TIPOS DE PRODUTOS	Macarrão	Cereais matinais, *pellets*, *snacks* 2^0 geração	Produtos moles, amidos, sopas	*Snacks* doces	Proteína de soja texturizada, ***PET FOOD***, amido modificado

I.4.1.3) Variáveis Manipuláveis

As variáveis manipuláveis, normalmente de ajuste operacional, promovem as transformações na extrusão que influenciam na tensão interna gerada, na temperatura e no tempo de residência (Yeh e Jaw, 1998).

I.4.1.3.1) Pressão e Tensão

Na zona de alimentação do extrusor, a massa é transportada com a maior vazão possível principalmente auxiliada pelos sulcos (ranhuras) axiais da camisa, que promovem o aumento da pressão até o valor máximo, quando ocorre alta queda no valor da viscosidade. Note-se que neste ponto um aumento de vazão irá promover uma queda no valor de pressão; donde $Pmax \,.\, Q = constante$.

O extrusor de eixo simples é constituído por uma zona inicial de transporte de sólidos em forma elástica, passando após por uma fase de transição, onde a viscosidade é reduzida e, portanto, a massa viscosa precisa ser bombeada a fim de vencer a barreira de pressão a qual está exposto até a zona de saída (final) do extrusor, conforme Figura 7:

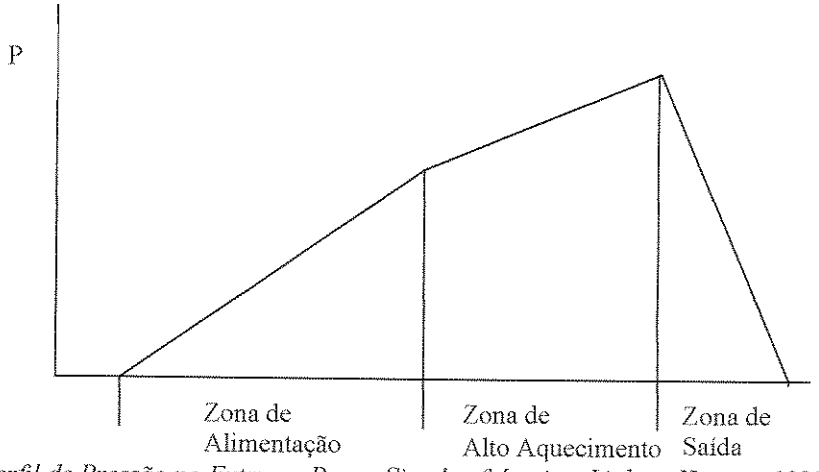


Figura 7: Perfil de Pressão no Extrusor Rosca Simples (Mercier; Linko e Harper, 1989).

Para facilitar a interpretação do fenômeno, o sistema é considerado como fluido Newtoniano aquecido isotermicamente e instantaneamente analisado em geometria retangular. Consideram-se equações de movimento entre duas placas paralelas, e que as

forças viscosas sejam dominantes perante as forças inerciais e gravitacionais. A coordenada 'Z' indica a direção do fluxo, a coordenada 'Y' a altura do canal e a coordenada 'X' a largura do canal.

O tensor Z na direção Y é representado pelas equações (I.4.1.3.1.1) e (I.4.1.3.1.2); e o tensor X na direção Y é representado pelas equações (I.4.1.3.1.1) e (I.4.1.3.1.2) abaixo:

$$\frac{\partial \tau_{zy}}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial z} \qquad \text{(I.4.1.3.1.1)}$$

$$\tau_{zy} = -\mu \frac{\partial V_z}{\partial y} \qquad \text{(I.4.1.3.1.2)}$$

$$\frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = -\frac{\partial P}{\partial x} \qquad \text{(I.4.1.3.1.3)}$$

$$\tau_{xy} = -\mu \frac{\partial V_x}{\partial y} \qquad \text{(I.4.1.3.1.4)}$$

Por outro lado, às velocidades relativas da parede em relação à massa podem ser expressas nas equações (I.4.1.3.1.5) e (I.4.1.3.1.6):

$$U_z = \pi NDCOS\Phi \qquad \text{(I.4.1.3.1.5)}$$

$$U_x = \pi NDSEN\Phi \qquad \text{(I.4.1.3.1.6)}$$

Observando-se nestas últimas equações os valores D = diâmetro do parafuso, N = velocidade angular do parafuso e Φ o ângulo que informa a inclinação dos elos dos parafusos. Assumem-se como condições de contorno na parede ($y=0$) que $V=0$ e no eixo ($y=H$) na direção Z que $Vz = Uz$ e, depois de combinar equações (I.4.1.3.1.1) e (I.4.1.3.1.2) tem-se a equação (I.4.1.3.1.7), que representa o perfil de velocidade ao longo da direção do fluxo Z.

$$V_z = U_z\left(y/H\right) - \frac{H^2}{2\mu} * \frac{dP}{dz} * \left[\left(y/H\right) - \left(y/H\right)^2\right] \qquad \text{(I.4.1.3.1.7)}$$

Da mesma forma se obtém o perfil de velocidade ao longo da largura X na equação (I.4.1.3.1.8):

$$V_x = 3U_x \frac{y}{H}\left(\frac{2}{3} - \frac{y}{H}\right) \qquad \text{(I.4.1.3.1.8)}$$

Fazendo a integração da equação (I.4.1.3.1.7) e multiplicando-se ambos os lados pela largura do canal W têm-se a equação (I.4.1.3.1.9):

$$Q_v = W\int_0^H V dy = \frac{W}{2}U_z H - \frac{H^3 W}{12\mu}\frac{dP}{dz} \qquad \text{(I.4.1.3.1.9)}$$

Observa-se que a equação (I.4.1.3.1.9) representa o volume de passagem da massa no extrusor, entretanto a largura do canal, W, não é infinita e devem ser aplicados fatores de correção: um para o arraste da massa (Fd) e outro para o fluxo de pressão (Fp) expressos na equação (I.4.1.3.1.10):

$$Q_v = \frac{W}{2}U_z H(F_d) - \frac{H^3 W}{12\mu}\frac{dP}{dz}(F_p) \qquad \text{(I.4.1.3.1.10)}$$

Na equação (I.4.1.3.1.10) é observado o termo relativo à velocidade rotacional do parafuso (primeiro termo à direita da equação), e o termo relativo à pressão no final do extrusor (termo mais à direita), válidos para a zona de alta temperatura com comportamento Newtoniano.

Da divisão da Equação (I.4.1.3.1.7) pelo termo referente ao fluxo de arraste gera-se as equações (I.4.1.3.1.11) e (I.4.1.3.1.12):

$$\frac{2Q}{U_z WH} = 1 - a \qquad \text{(I.4.1.3.1.11)}$$

$$a = \frac{H^2 \nabla P}{6\mu U_z Z} = \frac{fluxodepressão}{fluxodearraste} \qquad \text{(I.4.1.3.1.12)}$$

onde o termo a é a relação entre fluxo de pressão (numerador) e fluxo de arraste (denominador), segundo Mercier; Linko e Harper (1989). Deste valor observa-se que a máxima pressão no extrusor é conseguida quando o valor de $a = 1$ e a máxima vazão quando $a = 0$.

Através de desenvolvimento algébrico chega-se a expressão (I.4.1.3.1.13), que define a eficiência de bombeamento para a massa na extrusão na fase de derretimento:

$$e = \frac{3a(1-a)}{1+3a+4\tan^2\theta} \qquad \text{(I.4.1.3.1.13)}$$

Os extrusores comerciais operam com raio de inclinação θ em torno de $17^0 40'$ e $a = 0{,}36$; resultando em eficiência de cerca de $27{,}9\ \%$, o que quer dizer que cerca de $72\ \%$ da

energia gerada pelo motor é diretamente convertida em calor pela dissipação viscosa, sem ser usada para o transporte da massa (Mercier; Linko e Harper, 1989).

A pressão gerada na saída (área de corte) do extrusor, onde o produto tem a sua forma final definida, é usada para o transporte do produto, conforme a equação (I.4.1.3.1.14):

$$Q_v = \frac{1}{k_C}\frac{P_d}{\mu} \qquad \text{(I.4.1.3.1.14)}$$

onde k_C é a resistência ao fluxo na área de corte e Pd a pressão no mesmo setor.

Entretanto o modelo de análise Newtoniano tem demonstrado alguns resultados inconsistentes com os dados experimentais. Como exemplo disso tem-se o decréscimo de pressão e torque observado pelo aumento de rotação de eixo, que pelo modelo Newtoniano apresentaria resultado oposto (Lu, Hsieh, Mulvaney, Tan e Huff, 1992).

Segundo Holay e Harper (1982) a equação (I.4.1.3.1.15) representa o tensor dado para um fluido pseudoplástico ao longo do extrusor cilíndrico, com raios pequenos de corte.

$$\tau_w = \frac{\nabla P}{2\left(\frac{L}{Rd} + e\right)} \qquad \text{(I.4.1.3.1.15)}$$

Visto que o aumento da pressão aumenta a tensão gerada τ_w pela equação (I.4.1.3.1.15), o valor da viscosidade aparente μ_a será reduzido uma vez que sob condições operacionais de cisalhamento, amidos e proteínas seguem a lei da potência conforme a equação (I.4.1.3.1.16) (Sokhey, Ali e Hanna, 1997):

$$u_a = K_V|\tau_w|^{n-1}\exp\left[-\beta(T - T_0)\right] \qquad \text{(I.4.1.3.1.16)}$$

onde Kv é a consistência , β uma constante, n o índice da lei da potência, T_0 a temperatura de referência e T a temperatura da saída (Lu, Hsieh, Mulvaney, Tan e Huff, 1992).

O modelo viscoelástico 'Phan –Thien Tanner' é empregado por Dhanasekharan e Kokini (2000) para a comparação da viscosidade no extrusor com o modelo Newtoniano.

I.4.1.3.2) Avaliação da Temperatura e Trabalho de Eixo

A temperatura ao longo do extrusor é determinada por Tan e Hofer (1995) pela natureza da troca energética. O calor transferido é afetado pelo calor adicionado *He*, pelo sistema de refrigeração na camisa *C*, pelo trabalho de eixo W_k e pelo tempo de residência *t*. O trabalho de eixo está associado ao conceito de energia mecânica específica (*SME*), a qual é dada pelo quociente entre o trabalho mecânico do eixo e a taxa de alimentação do extrusor, constitui a maior parcela de influência para a mudança de temperatura na massa extrusada durante o processo. Segundo Onwulata, Mulvaney e Hsieh (1994), a *SME* é a forma mais precisa para controlar a densidade do produto extrusado, baseado na relação aproximadamente linear com o índice de solubilidade de água, no fato que para certas configurações de eixo, reduzindo a pressão, produziu-se baixa densidade, devido ao efeito direto para a viscosidade do produto e o efeito exercido pela umidade do produto.

Entretanto, pode-se descrever a dependência da temperatura como *T= F (C, He,Wk,t)*, pelo modelo mostrado na equação (I.4.1.3.2.1), proposta por Tan e Hofer (1995), denominado *ARMAX* .

$$T(k+1)=[a_{T1}(k)a_{T2}(k)a_{T3}(k)]\begin{vmatrix}T(k)\\T(k-1)\\T(k-2)\end{vmatrix}+[b_c(k)b_H(k)]\begin{vmatrix}C(k-d_C)\\H(k-d_H)\end{vmatrix}+$$

$$[\delta_1(k)\delta_2(k)\delta_3(k)]\begin{vmatrix}W(k-d_W)\\W(k-d_W-1)\\W(k-d_W-2)\end{vmatrix}+[\sigma(k)][\omega(k)] \qquad \text{(I.4.1.3.2.1)}$$

onde: $a_{T1}(k)...a_{T3}(k)$, $b_C(k)$, $b_{He}(k)$, $\delta_1(k)...\ \delta_3(k)$, $\sigma(k)$ são coeficientes da equação; *dC, dHe e* dW_k são os tempos mortos associados com *C, He e* W_k.; ω é a interferência e *k* um número inteiro.

Observa-se que mesmo aparecendo do lado direito da equação acima o termo de trabalho mecânico não deve ser usado como variável independente no controle de temperatura, visto a sua alta influência em todas as zonas . A *SME* é função da velocidade do eixo da extrusora, da taxa de alimentação e do torque do motor.

Para uma dada velocidade e taxa de alimentação constantes (na prática são condições de operação constantes), o torque do motor será dependente do tipo de matéria-prima e do teor de umidade da farinha na entrada da extrusora (diretamente associado às reações biopoliméricas ao longo do extrusor). O trabalho mecânico também pode ser predito pela equação (I.4.1.3.2.2):

$$W_k(k+1) = \left[a_{Wk1}(k) a_{Wk2}(k)\right] \begin{bmatrix} W_k(k) \\ W_k(k-1) \end{bmatrix} + b_M(k) M(k-d_M) + c(k) e(k) \qquad \text{(I.4.1.3.2.2)}$$

As equações (I.4.1.3.2.1) e (I.4.1.3.2.2) podem ser resolvidas pelo algorítimo *Normalized Least-Mean-Squares* (*NLMS*), usado para a identificação *on-line* dos parâmetros. Dessa forma, através do algoritmo em questão é possível fazer a predição e portanto instalar uma lógica de controle para a temperatura e trabalho mecânico. Entretanto, devido à natureza do processo, isto é, os tempos mortos associados à temperatura e trabalho do eixo até que seja sentida a perturbação, tem-se ainda que estipular uma função do erro médio entre a variável calculada e o valor real, a fim de que os coeficientes das equações sejam o mais preciso possíveis (Tan e Hofer, 1995).

Genericamente pode-se entender que os termos relativos a *He* aumentam o valor da temperatura, assim como os relativos a *C* diminuem. Dessa forma o aumento no teor de umidade diminui a viscosidade da massa e assim menor torque do motor será exigido. Entretanto não é uma relação linear, pois a medida em que ocorre a redução da viscosidade, o aumento da pressão próximo a zona de corte é uma função da velocidade do parafuso [(Tan e Hofer, 1995) e (Hsieh, Mulvaney, Tan e Huff, 1992)].

I.4.1.3.3) Avaliação do Tempo de Residência (RTD)

Zuilichem; Swart e Brueman (1973) consideraram o extrusor de eixo simples como uma série de *CSTRs* (*Continuous Stirred Tank Reactor*). Por outro lado, o modelo proposto por (Yeh e Jaw, 1998) é uma combinação de *PFR* (*Plug Flow Reactor*) e *CSTR*, no qual a alimentação é feita em um *PFR*, com uma fração volumétrica P_F, passando para um *CSTR*, com fração volumétrica $(1\text{-}d)(1\text{-}P_F)$, com uma fração representando o volume morto de $d(1\text{-}P_F)$. Esta fração de volume morto deve ser entendida como o termo de correção nos

modelos anteriores para a concordância com os dados experimentais, sendo dado pelo fluxo *bq*. Esta descrição do sistema é mostrada na Figura 8.

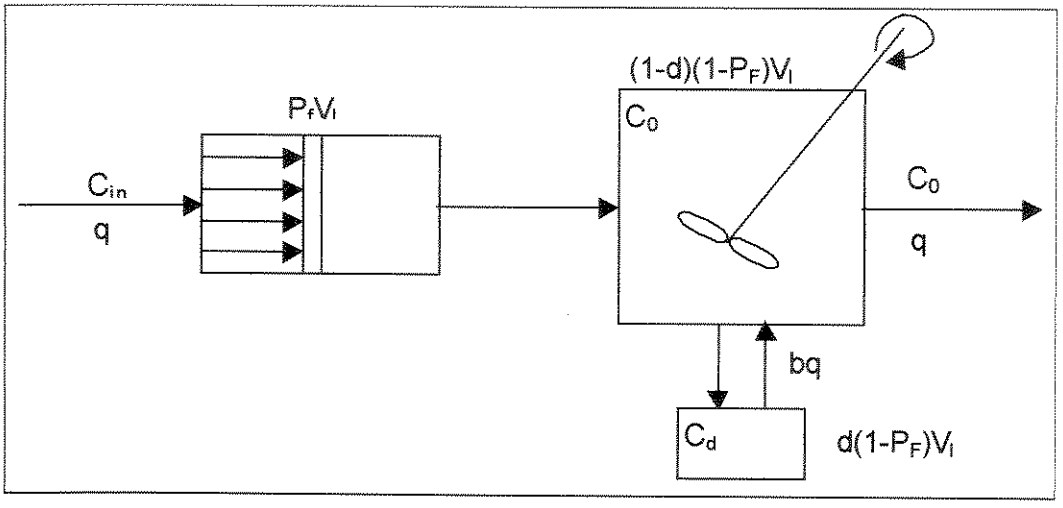


Figura 8: Esquema Proposto para Tempo de Residência (Yeh e Jaw, 1998).

A partir do balanço de massa neste sistema tem-se a equação diferencial (I.4.1.3.3.1) que descreve o extrusor.

$$(1-P_F)(1-d)Vl\frac{dC_0}{dt} = q(C_{in}-C_0) + bq(C_d-C_0) \qquad \text{(I.4.1.3.3.1)}$$

onde b = fração da vazão do *CSTR* no volume morto, C_d = concentração no volume morto, C_{in}= concentração de entrada de um marcador no *CSTR*, C_0 = concentração de saída do marcador do *CSTR*, d = fração do volume morto no *CSTR*, P_F = fração do *PFR*, q = taxa volumétrica de alimentação do material e Vl = volume total do extrusor.

Através da resolução da equação (4.1.3.3.1) por Transformada de Laplace, utilizando-se como tempo de residência $t = Vl/q$, a fim de que o marcador chegue até o *CSTR*, o tempo gasto é determinado por $PF_t = P_FVl/q$. Assim chega-se a uma relação que define uma função no tempo dada pelo quociente da concentração inicial C_0 pela solução da equação diferencial ordinária (I.4.1.3.3.1) integrada de PF_t até t. Portanto, graficando-se o comportamento desta função com relação ao tempo, a velocidade de rotação do eixo e taxa de alimentação definida, é obtida a curva de resposta para os diferentes tempos de residência. Como foi usado um marcador na definição do modelo, evidente que após assumir o valor máximo de concentração a curva cai substancialmente, de forma contínua,

o que atesta a grande presença de interferentes no processo. Finalmente, avalia-se a função do tempo para um tempo infinito e normalizado em relação a variável tempo de residência do *CSTR*, adimensionalizando a solução do sistema (Yeh e Jaw, 1998).

Com esse modelo é possível simular o extrusor a diferentes taxas de alimentação com diferentes geometrias e espaçamentos. Em concordância com o modelo, geometrias convencionais, têm com o aumento da alimentação uma queda no tempo de residência (aproximadamente linear). Quando são adicionados elementos de mistura em comparação com uma seção de igual comprimento mais lisa no eixo, os primeiros apresentam menores tempos de residência, justificado pela sua contribuição ao transporte. Também quando é aumentada a taxa de alimentação o sistema de discos ou quando o eixo tem seções lisas sofre uma maior queda (maior valor da tangente à curva) no tempo de residência médio com relação ao arranjo convencional no eixo do extrusor.

Embora o aumento de velocidade do eixo também diminui o tempo de residência médio no extrusor, quando isto ocorre, o arranjo com discos, devido ao efeito de mistura, atribui o maior valor de tempo de residência médio quando comparado com um parafuso com algum perfil liso e com o modelo convencional (menor tempo de residência médio). Conclui-se que a função de tempo de residência está intimamente associada com a variação na alimentação e velocidade de rotação do eixo, apresentando um comportamento diferenciado, conforme a geometria do parafuso (Yeh e Jaw, 1998).

Na prévia análise das variáveis de processo (torque, temperatura e pressão de saída), verifica-se a influência direta, individual ou associada das variáveis operacionais da maioria dos extrusores comerciais: vazão de alimentação de farinha, vapor (para o pré-condicionador e extrusora) e água (injeção para o pré-condicionador ou resfriamento da camisa), velocidade de rotação do eixo e geometria do parafuso. A análise dos efeitos destas variáveis conjugados à constituição da matéria-prima evidenciada pelos teores de umidade, proteína, gordura e carboidratos, bem como a distribuição granulométrica serão avaliados nas discussões deste trabalho.

I.4.1.3.4) Distribuição Granulométrica

Embora não seja abordado neste trabalho, a influência do tamanho de partícula e distribuição granulométrica da farinha a ser extrusada parece ser um dos principais fatores que, conjugados aos demais itens estudados neste trabalho, irá definir o perfil de viscosidade do produto extrusado. Segundo o estudo de Pietsch (1997) as forças referentes à distribuição de partícula que influenciam no processo de aglomeração podem ser sumarizadas entre forças de atração, entre elas pontes de Van der Walls, energia potencial, forcas eletromagnéticas e forças de valência, derretimento de partícula, camadas de adsorção e formação de blocos de partículas de mesma geometria. Este mesmo autor demonstra que o mecanismo de aglomeração é extremamente influente para características como fluidização, densidade e mistura. Ainda prova-se que o decréscimo do tamanho de partícula médio – abaixo de 0.5 mm diminui a eficiência de mistura e fluidez e sugere-se nesse trabalho que o melhor arranjo de partículas é alcançado com uma maior variabilidade no tamanho médio do material sólido, uma vez que os interstícios entre as partículas maiores são preenchidos com as partículas menores, evitando sob certas condições operacionais a excessiva formação de aglomerados.

Assim, empregando esses conceitos na extrusão, embora o tamanho de partícula seja superior aos valores onde esses efeitos são mais pronunciados, é importante salientar que parte do material pode apresentar esse comportamento e promover a formação de blocos indesejáveis quando na saída do pré-condicionador, prejudicando a uniformidade do sistema. Observa-se que partículas muito grandes também são prejudiciais ao sistema como um todo, uma vez que apresentam uma grande variabilidade de densidade e reduzida superfície de contato, necessitando de um emprego muito maior de energia mecânica no extrusor para o alcance dos resultados desejados de densidade. O trabalho apresentado por Servais et al. (2002) analisa profundamente características como densidade, forma da partícula, rugosidade da superficie, volume de partícula, absorção e adsorção de outros componentes, bem como as forças entre as partículas, aglomeração e viscosidade como resultado da definição do ponto ótimo de distribuição granulométrica. Assim a extrusão também deve ser otimizada para a distribuição de partículas.

II) MATERIAIS E MÉTODOS

II.1) MATERIAIS

O material listado abaixo se refere à parte de estudo das variáveis do processo de extrusão realizado no nível piloto e industrial. O primeiro foi necessário para o estudo das tendências do processo de extrusão e avaliação dos parâmetros de controle e comportamento do processo segundo um controlador *PID* convencional, através do emprego das receitas *SC, PP e Wos* distintas, em três dias consecutivos, típicas nos processos de rações para *'PET FOOD'* citadas no Quadro 4. O segundo utilizou-se dos conhecimentos adquiridos do teste Piloto propondo e aplicando preliminarmente uma estratégia de controle *MIMO 2X2* em uma planta industrial através do emprego de um software de natureza adaptativo / neural durante para o processo produtivo, incluindo estudo preliminar do processo de extrusão, configuração do algorítmo e aplicação preliminar do controlador *MFA*.

II.1.1) Equipamentos

1) Extrusor: Para a parte de obtenção de dados experimentais foi utilizado um extrusor piloto de eixo simples Wenger *X-85* com capacidade de 238 a 475 kg/h, 6 zonas de aquecimento e motor com 15kW, e velocidade de eixo variável entre 400 e 550 rpm, com fator de 'scale up' 16,59 para o modelo industrial *X-185*, com motor de 185 kW, 6 zonas de aquecimento e com capacidade para 9 ton/h empregado quando na aplicação do controlador comercial, com velocidade de eixo constante de 800 rpm.

2) Unidade de pré-condicionador: Modelo *MLD4DDC* com velocidade constante de 1200 rpm, 3,75 kW e capacidade de 238 a 475 kg/h para geração dos dados experimentais com fator de 'scale up' de 13,50 para o modelo industrial *MLD54DDC*, empregado na aplicação do controlador adaptativo.

O arranjo do pré-condicionador *MLD4DDC* seguiu a seguinte configuração: eixo direto: pedals de 1 a 12 com 15 graus positivos de inclinação e pedals 13 a 60 com 15 graus

negativos; e eixo esquerdo : pedals 1 a 18 com 15 graus positivos de inclinação, pedals 19 a 42 sem inclinação e pedals 43 a 60 com 15 graus negativos de inclinação.

3) Unidade *CLP*: *Modicon* para controle das variáveis independentes e de processo para a parte experimental.

4) Unidade *PC*: 500 MHz e 256 *RAM*, equipada com rede Wonderware, empregada para o armazenamento dos dados das perturbações experimentais e geração da tela de controle para o teste piloto.

5) Programa no *CLP Modicon* feito internamente para a geração de dados.

6) Controlador comercial: 'Model Free Adaptive' (*MFA*), marca comercial 'CyboSoft', compatível com *Windows 2000*.

7) Unidade *CLP Modicon* utilizada para estabelecer a comunicação entre os transmissores de campo e o controlador MFA.

8) Unidade *PC* 500 MHz e 256 *RAM* dedicada à geração de dados experimentais e controle do extrusor de eixo simples *X- 185*.

9) *Softwares*: *MATLAB 6.1* e *STATISTICA 5.0*.

II.1.2) Instrumentação

O Quadro 3 lista os principais instrumentos utilizados neste trabalho, no qual os transmissores foram de saída 4 – 20 mA. Todas as válvulas empregadas no teste piloto foram equipadas com atuadores, não havendo operação manual.

Quadro 3: Instrumentação para os Testes Piloto e Industrial

VARIÁVEL	TESTE PILOTO	TESTE INDUSTRIAL
Moinho para cereal	Moinho martelo de 15 kW com tela 0,93 mm de abertura.	Moinho martelo de 150 kW com tela 1,18 mm de abertura.
PRÉ-CONDICIONADOR		
Vazão de Farinha	Medidor Volumétrico e conversor de freqüência variável para o eixo de alimentação.*	Medidor Gravimétrico e conversor de freqüência variável para o eixo de alimentação.
Vazão de Vapor	Válvula Esfera com atuador e medidor de placa de orifício.	Válvula Esfera com atuador e medidor de placa de orifício.
Vazão de Água	Válvula Globo, com atuador e medidor de vazão com princípio capacitivo.	Válvula Globo com atuador e medidor de vazão com princípio capacitivo.
Vazão de Óleo	Bomba dosadora centrífuga de ajuste manual.	Válvula esfera e medidor de coriolis.
EXTRUSORA		
Temperatura	Termopar tipo *K*	Termopar tipo *K*
Pressão	Transdutor de pressão.	Transdutor de pressão.
Temperatura ao longo do extrusor	Termopares para as zonas 2, 3 e 4, 5 e 6.	Não foi empregado.
Pressão ao longo do extrusor	Transdutores de pressão para zonas 5 e 6.	Não foi empregado.
Densidade	Baseado na medida de massa a volume constante.	Não foi utilizado. **
Vazão de vapor Extrusora	Não foi utilizado.	Válvula Esfera com atuador e medidor de placa de orifício.
Água de resfriamento da camisa	Não foi utilizado.	Válvula esfera manual on/off.
Velocidade de eixo Extrusora	Conversor de freqüência variável e conversor elétrico para a medida.	Não foi utilizado.
Torque	Medidor elétrico de potência.	Medidor elétrico de potência.

*A vazão de farinha foi controlada através da velocidade em rpm do eixo alimentador do pré-condicionador. Para tanto, foi utilizada uma curva de ajuste experimental, dada pela equação (II.1.2.1), empregada para as três receitas descritas no Quadro 4, uma vez que a variação de densidade foi considerada insignificante durante a alimentação do pré-condicionador e entre as receitas. Foram realizados testes de validação na região de interesse para esta curva de ajuste antecedendo o início do teste piloto para cada uma das três (3) receitas.

$$y(x) = -0{,}027x^2 + 12{,}49x - 804{,}12$$
$$R^2 = 0{,}9877 \qquad \text{(II.1.2.1)}$$

onde 'x' representa o valor desejado de vazão de farinha em kg/h e $y(x) = a$ resposta em rpm para a rotação do eixo

**A densidade do produto seco após o secador foi medida no teste industrial utilizando-se um equipamento de bancada para a relação Massa / Volume. O equipamento de bancada é composto de um cilindro a volume constante montado sobre uma balança analítica, o qual uma vez enchido o cilindro perfeitamente com a amostra de produto, informa o valor de densidade em kg/hL, dado pela divisão da massa da amostra em kg pelo volume fixo do cilindro em hL.

As variáveis: energia mecânica específica (*SME*) e energia térmica específica (*STE*) foram calculadas segundo as equações (III.1.1.1.a) e (III.1.1.3) respectivamente mostradas na seção (III.1.1) a partir dos valores medidos acima no Quadro 4.

A análise para os constituintes da farinha de alimentação, farinha de saída do pré-condicionador e produto extrusado úmido no teste piloto, realizadas em escala laboratorial, foram as seguintes:

- ✓ Teor de umidade: equipamento TGA-601
- ✓ Teor de proteínas: princípio de aquecimento por infra-vermelho FP2000
- ✓ Teor de gordura: hidrólise ácida
- ✓ Teor de cinzas: queima da amostra para obtenção de cinza TGA-601

Para o teste industrial não foram empregadas as análises químicas da farinha de alimentação ou saída do pré-condicionador, bem como do produto extrusado úmido, uma vez que a aplicação preliminar do controlador objetivou a observação da performance segundo um processo real.

A Figura 9 apresenta os principais equipamentos e sensores empregados nos testes piloto e industrial segundo um sistema hipotético pré-condicionador extrusora.

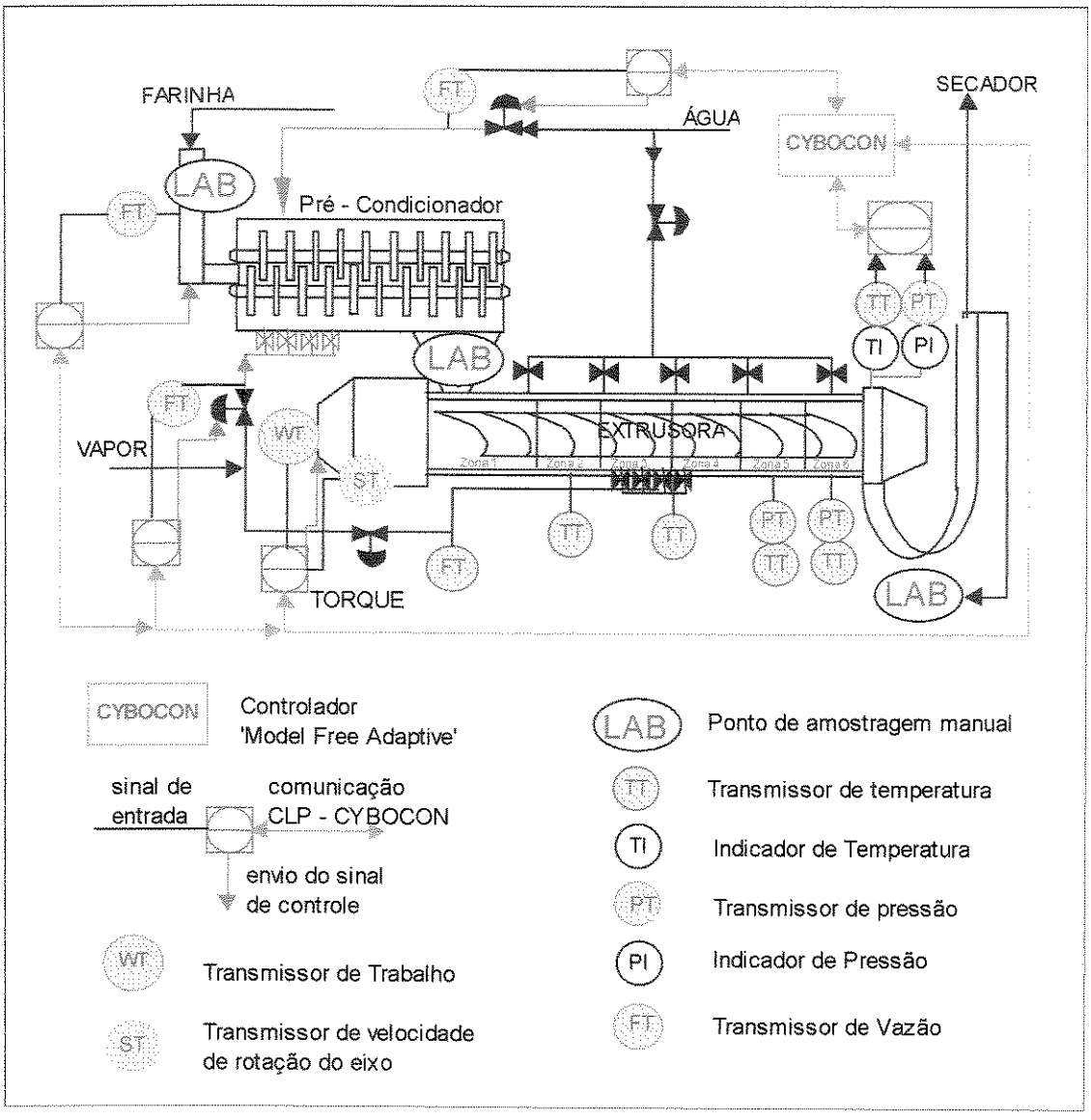


Figura 9: Representação Esquemática da Instrumentação para o Conjunto Pré-Condicionador e Extrusor.

Na Figura 10, pode-se observar o conjunto *WENGER* montado, constituído por pré-condicionador *MLD4DDC* e extrusor *X – 85* utilizados no teste piloto.

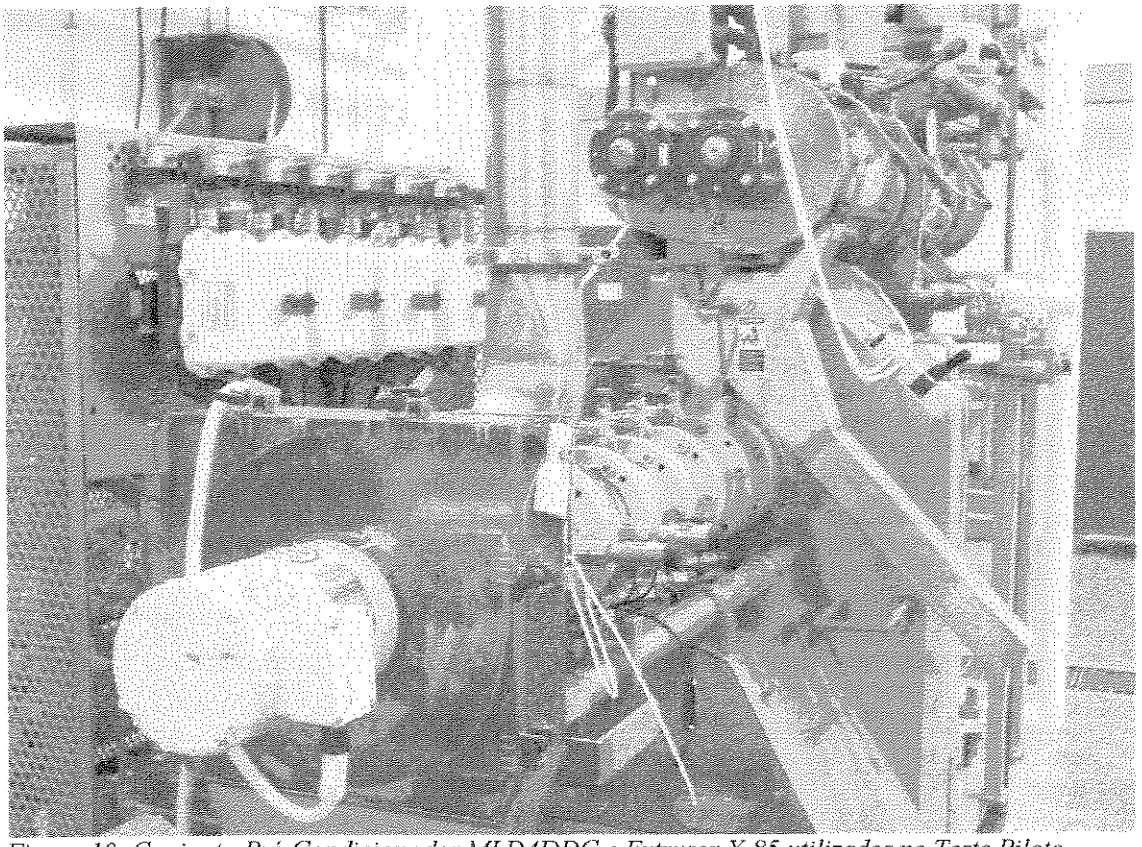


Figura 10: Conjunto Pré-Condicionador MLD4DDC e Extrusor X-85 utilizados no Teste Piloto.

Em virtude do grande número de variáveis no processo de extrusão, para ambos os experimentos (piloto e industrial), assumiu-se então, algumas condições invariantes.

Para o experimento Piloto:

a) Foi empregado, para todas as receitas, uma tela do moinho martelo de moagem de 0,93 mm, assumindo-se a distribuição granulométrica uniforme para a farinha de alimentação;

b) A batelada foi misturada após moagem de cereais e não foi empregado remoagem;

c) A placa de formação do produto na saída da extrusora foi empregada com dois (2) orifícios, o que normalmente é operado em condições de prova;

d) Foram empregados três tipos distintos de placas formadoras com área por orifício de 29,1612. 10^{-6} m^2, 32,2580.10^{-6} m^2 e 32,2580.10^{-6} m^2 para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente;

e) O sistema foi operado sem mudanças na configuração do pré-condicionador e/ou eixo do extrusor.

Para o experimento Industrial:

f) Foram empregadas as mesmas receitas do teste piloto *SC* e *PP* com abertura de placa de saída da extrusora de vinte (20) furos de saída;

g) A moagem dos cereais foi conduzida com tela de 1,18 mm e a mistura dos ingredientes da batelada ocorreu após a moagem, com o uso de peneira de segurança antes da alimentação do pré-condicionador de 1 mm;

h) Não foram realizados ajustes na configuração do pré-condicionador, bem como mudanças na configuração do eixo do extrusor, considerando-se desprezíveis as possíveis variações na farinha de alimentação;

i) Quando na aplicação do controlador foram mantidas constantes a injeção de vapor para a extrusora e a presença ou não de água de resfriamento para a carcaça da mesma.

Para ambos os experimentos foram considerados uma operação precisa das válvulas, sensores e uniformidade do processo quanto à matéria-prima, moagem, mistura e extrusão.

Será visto, posteriormente, que estes fatores devem ser limitados sob certas condições operacionais. Como os equipamentos e instrumentação são calibrados periodicamente, os experimentos foram conduzidos sem calibração prévia destes itens.

A configuração do pré-condicionador e do eixo do extrusor do teste Industrial não serão informadas neste trabalho baseado que uma vez estes parâmetros sejam mantidos constantes, o controlador poderá controlar o processo a partir das variáveis manipulativas e de processo associadas aos parâmetros de qualidade do produto extrusado conforme será discutido no capítulo III.

II.1.4) Composição das Receitas Avaliadas

Foram empregadas três (3) receitas de produtos para rações animais, denominadas respectivamente *SC*, *PP* e *Wos*, conforme o Quadro 4 abaixo.

Quadro 4: Receitas Empregadas para os Testes Piloto e Industrial.

PRODUTO	INGREDIENTES		Percentual (%) estimado para a farinha de alimentação				
			Umidade	Lipídios	Proteínas	Cinzas	Carboidratos
	Principais Fontes de	(%)	9,5	4,5	21,0	8,9	56,1
SC	proteína	28,27	base farinha de suíno e de osso				
	lipídios	0,90	base gordura animal				
	carboidratos	68,40	base milho				
	outros	2,43	vitaminas, corantes e aditivos				
			Percentual (%) estimado para a farinha de alimentação				
			Umidade	Lipídios	Proteínas	Cinzas	Carboidratos
	Principais Fontes de	(%)	9,0	4,0	30,0	7,9	49,1
	proteína	37,53	base farinha de aves				
PP	lipídios	2,02	base gordura animal				
	carboidratos	53,33	base milho e arroz				
	outros	7,13	vitaminas, corantes e aditivos				
			Percentual (%) estimado para a farinha de alimentação				
			Umidade	Lipídios	Proteínas	Cinzas	Carboidratos
	Principais Fontes de	(%)	8,0	5,0	36,0	6,3	44,8
	proteína	41,07	base farinha de aves				
Wos	lipídios	4,78	base gordura animal				
	carboidratos	52,02	base milho				
	outros	2,94	vitaminas, corantes e aditivos				

A análise do Quadro 4 informa de uma forma geral que a receita *SC* é mais rica em carboidratos e com baixo teor de lipídios, enquanto as receitas *PP* e *Wos* apresentam teor similar de carboidratos. A receita *PP* apresenta como componente da fonte de carboidratos farinha de arroz, enquanto as outras duas receitas têm base na farinha de milho. A receita *Wos* por sua vez apresenta mais do dobro do teor de lipídios do que a receita *PP*. Em relação ao valor protéico, as receitas *PP* e *Wos* apresentam teores cerca de 10% superior ao encontrado na receita *SC*, além de uma base avícola, ao contrário da base suína encontrada na receita *SC*.

As conjunções desses elementos serão avaliadas posteriormente, mas o maior teor de carboidratos e baixo teor de lipídios na receita *SC* deverá evidenciar maior efeito do processo de gelatinização, enquanto a receita *PP* tenderá a uma maior expansão para o

mesmo teor de carboidratos, visto a inclusão de amido de arroz, e por último, a receita *Wos* pelo maior teor de lipídio terá uma influência mais direta desse componente nas variáveis de processo. O teor elevado de outros componentes na receita *PP* pode promover efeitos adversos ao processo de expansão e alterar significativamente o perfil de viscosidade da massa a ser extrusada.

II.2) METODOLOGIA

Como vem sendo salientado, o trabalho em questão pode ser dividido em dois grupos: teste piloto e teste industrial.

II.2.1) Teste Piloto

O teste piloto empregou as três (3) receitas descritas para os produtos *SC*, *PP* e *Wos*, bem como a lista de equipamentos e instrumentação descrita. O passo inicial para o armazenamento das medidas do experimento foi a construção de um programa no *CLP* Modicon, que gerou a tela de comando, conforme a Figura 44 no Anexo I, através da plataforma *Windows*.

Os arquivos gerados por esse programa foram um a um descarregados em arquivos de dados Excel, que então puderam ser tratados e facilmente convertidos em arquivos dos programas *MATLAB 6.1* e *STATISTICA 5.0*.

O experimento foi conduzido em três dias consecutivos, um dia para cada receita e subdividido em dois grupos por dia. O primeiro grupo foi responsável pelas perturbações isoladas (individuais) e o segundo pelas perturbações simultâneas.

Inicialmente, os cereais da receita foram moídos e a mistura foi transportada para um misturador em batelada, que após passar por uma peneira de segurança, alimentou um silo pulmão que supriu o pré-condicionador.

Após isso, foi iniciada a extrusora, que permaneceu operando até o ponto em que se chegou a densidade considerada ótima pelos operadores. Este ponto foi definido como regime permanente para aquela determinada receita. O medidor de densidade pode ser visto

na Figura 45 e o conjunto pré-condicionador / extrusora na Figura 46 do Anexo I. Os detalhes internos do pré-condicionador podem ser observados na Figura 47 do Anexo I.

Para os ensaios com perturbações isoladas procedeu-se a perturbação degrau individual de cada variável independente uma a uma. Observa-se aqui, que quando foi alterada uma variável independente do grupo de três, as outras duas variáveis permaneciam com o valor referente ao regime estacionário. Então, a partir da mudança do valor da variável na tela de controle, o programa aguardava uma confirmação, que quando iniciada, definia o tempo zero para a perturbação. Os valores iniciais foram registrados quando no momento da modificação. Após isso, a cada segundo foram registrados os valores das variáveis de processo e das variáveis monitoradas. Depois de encontrado o estado estacionário, evidenciado pela pequena mudança nos valores das variáveis independentes, aproximadamente 3 minutos, a coleta de dados era terminada e o arquivo salvo, retornando o valor da variável independente para o valor estacionário anterior, ou seja, das condições iniciais. O ponto crucial deste procedimento foi definido no intervalo entre uma perturbação e outra. Após o retorno da variável independente ao valor original, para a obtenção do 1° estado estacionário, esperou-se cerca de mais três (3) minutos até que o sistema efetivamente regressa-se aos valores estacionários iniciais. Foram realizadas três diferentes perturbações isoladas para cada variável independente, num total de nove testes para cada receita, mostrados nos nove (9) últimos ensaios de cada um dos Quadros 21, 23 e 25 no Anexo II.

As perturbações simultâneas obedeceram a um planejamento fatorial composto com pontos em estrela, repetições no ponto central e pontos escolhidos pela experiência operacional. Apresentaram a mesma metodologia descrita para as perturbações isoladas, exceto pelo fato de que todas as quatro variáveis independentes foram perturbadas simultaneamente. A comparação para as variáveis manipulativas e de processo empregadas nos dois experimentos pode ser observada no Quadro 5.

Quadro 5: Conjunto de Variáveis Empregadas para o Teste Piloto.

Natureza da Pertubação	Receita	Número total de ensaios	Variável Manipulativa	Código	Variável de Processo	Código	Variável Monitorada	Código
			Pré-Condicionador		Extrusor			
	SC	9	Vazão de Farinha	VM1	Temperatura de saída	VP1	Temperatura Zona 2	VP7
ISOLADA	PP	9	Vazão de Vapor	VM2	Pressão de saída	VP2	Temperatura Zona 3& 4	VP8
	Wos	9	Vazão de Água	VM3	Densidade do extrusado	VP3	Temperatura Zona 5	VP9
					Torque do helicóide	VP4	Temperatura Zona 6	VP10
					SME	VP5	Pressão Zona 5	VP11
					STE	VP6	Pressão Zona 6	VP12
							Análises Físico -Químicas	
			Pré-Condicionador		Extrusor			
	SC	45	Vazão de Farinha	VM1	Temperatura de saída	VP1	Temperatura Zona 2	VP7
SIMULTÂNEA	PP	41	Vazão de Vapor	VM2	Pressão de saída	VP2	Temperatura Zona 3& 4	VP8
	Wos	49	Vazão de Água	VM3	Densidade do extrusado	VP3	Temperatura Zona 5	VP9
			Rotação do Helicóide	VM4	Torque do helicóide	VP4	Temperatura Zona 6	VP10
					SME	VP5	Pressão Zona 5	VP11
					STE	VP6	Pressão Zona 6	VP12
							Análises Físico -Químicas	

A partir de alguns valores do Quadro 5 foram ainda determinados os valores de energia mecânica específica *(SME) – VP5* e energia térmica específica *(STE) – VP6* .

A referência constante ao regime estacionário foi necessária a fim de que as mudanças fossem feitas sempre sobre o mesmo sistema, uma vez que após a cada perturbação era gerada uma nova condição de estabilidade (denominada segundo estado estacionário), possibilitando a análise e comparação posterior.

Observa-se que os valores relativos à variação de matéria – prima e produto, no item referente às análises físico – químicas, foram avaliados segundo o tipo de produto e podem ser consultados em detalhes na seção (II.2.2.1) referente à amostragem. Neste experimento os valores de vazão de vapor, água e óleo não foram alterados proporcionalmente ao valor de alimentação de farinha.

As perturbações isoladas seguem essencialmente o procedimento *SISO*, uma vez que as variáveis de processo registradas foram provenientes de uma perturbação degrau isolada. Por outro lado, às perturbações simultâneas associam-se ao modelo *MIMO* e serão utilizadas como premissa para a definição do sistema de controle.

II.2.2) Considerações Estatísticas

A análise das perturbações simultâneas é baseada no conceito de planejamento central composto, com uma parte quadrática ou fatorial, dada por dezesseis (16) ensaios correspondentes aos dois níveis adotados (*+1* e *–1*) elevado na potência quarta, uma vez

que são analisadas as combinações de quatro variáveis independentes. Os pontos axiais, neste experimento calculados por $\alpha = (niveis)^{\frac{1}{4}(variaveis_manipulativas)}$, correspondentes a $\alpha = -2$ e $\alpha = +2$ somam dois ensaios por variável independente. O ponto central, cuja repetição é realizada seis (6) vezes, não foi planejado para corresponder a uma perturbação, entretanto a variação nos valores reais medidos das variáveis independentes acabou identificando o ponto central como parte das perturbações. Dessa forma, para este experimento não se aplica o cálculo do erro puro, embora se considere as repetições próximas o suficiente para estabilizar a variância da resposta prevista.

Os valores previstos para o planejamento composto central são observados no Quadro 6. Os valores reais experimentais atingidos e alguns pontos adicionais inseridos no planejamento da superfície resposta são mostrados nos Quadros 21, 23 e 25 para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente no Anexo II. Observa-se que as perturbações individuais – últimos nove (9) ensaios - foram incluídas como parte do experimento múltiplo.Todos os ensaios foram realizados sem repetições.

Quadro 6: Níveis para as Receitas usadas no Ensaio de Perturbações Simultâneas no Teste Piloto.

		Valores Absolutos			**Perturbações (Δ)**		
		Receitas			Receitas		
Fatores	**Níveis**	*SC*	*PP*	*Wos*	*SC*	*PP*	*Wos*
Vazão de farinha (kg/h)	- α	145	130	130	-40	-40	-40
	-1	165	150	150	-20	-20	-20
	0	185	170	170	0	0	0
	+1	205	190	190	+20	+20	+20
	+ α	225	210	210	+40	+40	+40
Vazão de vapor (kg/h)	- α	15	10	10	-15	-15	-15
	-1	22,5	17,5	17,5	-7,5	-7,5	-7,5
	0	30	25	25	0	0	0
	+1	37,5	32,5	32,5	+7,5	+7,5	+7,5
	+ α	45	40	40	+15	+15	+15
Vazão de água (kg/h)	- α	28	24	24	-12	-16	-16
	-1	34	32	32	-6	-8	-8
	0	40	40	40	0	0	0
	+1	46	48	48	+6	+8	+8
	+ α	52	56	56	+12	+16	+16
Velocidade do helicóide (Rpm)	- α	440	420	420	-40	-60	-60
	-1	460	450	450	-20	-30	-30
	0	480	480	480	0	0	0
	+1	500	510	510	+20	+30	+30
	+ α	520	540	540	+40	+60	+60

O valor do nível axial empregado segue o conceito de rotabilidade desenvolvido por Box e Hunter em 1957 (Neto, Scarminio e Bruns, 2001), que define que as variâncias de suas estimativas só dependem da distância em relação ao ponto central, ou seja, assume-se que a precisão da resposta prevista é a mesma em todos os pontos situados numa hiperesfera eqüidistante do centro do planejamento. Como foi definido para o cálculo dos zeros e pela observação do Quadro 6, é provável que o experimento para as perturbações múltiplas siga um conceito de quase de rotabilidade.

Observa-se que a importância desse planejamento experimental para a extrusão pode ser resumida nos itens abaixo:

- a função de resposta, uma superfície tridimensional para três variáveis ou curvas de níveis (contornos) para duas variáveis, é caracterizada na região de interesse do experimento;

- inferências estatísticas, como análise de significância, podem ser incorporadas a análise, a fim de determinar as influências para as variáveis de processo;

- as equações e ou gráficos informam sobre valores ótimos, que para o processo de extrusão raramente se adequam aos conceitos de pontos mínimos ou máximos;

- condições ótimas podem ser determinadas para um conjunto de variáveis de processo.

O terceiro item pode ser exemplificado na Figura 11 que representa uma solução hipotética para a variável farinha de alimentação ao processo de extrusão.

Observa-se que a solução do sistema é a região, o que possibilita um maior intervalo de atuação do que um ponto (valor) único que resolve as exigências de todas as cinco variáveis de processo empregadas neste exemplo. Assim como no processo real, valores críticos são usualmente encontrados, uma vez que podem atender algumas variáveis de processo, mas não todas simultaneamente. Define-se por região aceitável que atribui certa instabilidade ao processo, uma vez que se encontra entre a solução ótima e os valores críticos.

Este exemplo é apenas uma representação esquemática, uma vez que no sistema tridimensional não se pode representar mais que três variáveis simultaneamente. Entretanto como não foram consideradas interações lineares, a variável *VM1* é o ponto otimizado que resolve cinco (5) equações referentes às variáveis de processo ao mesmo tempo. Em muitos

casos a solução de sistemas é mais simples, entretanto o aumento de variáveis independentes significativas para as respostas, certamente, levará a obtenção de sistemas mais complexos.

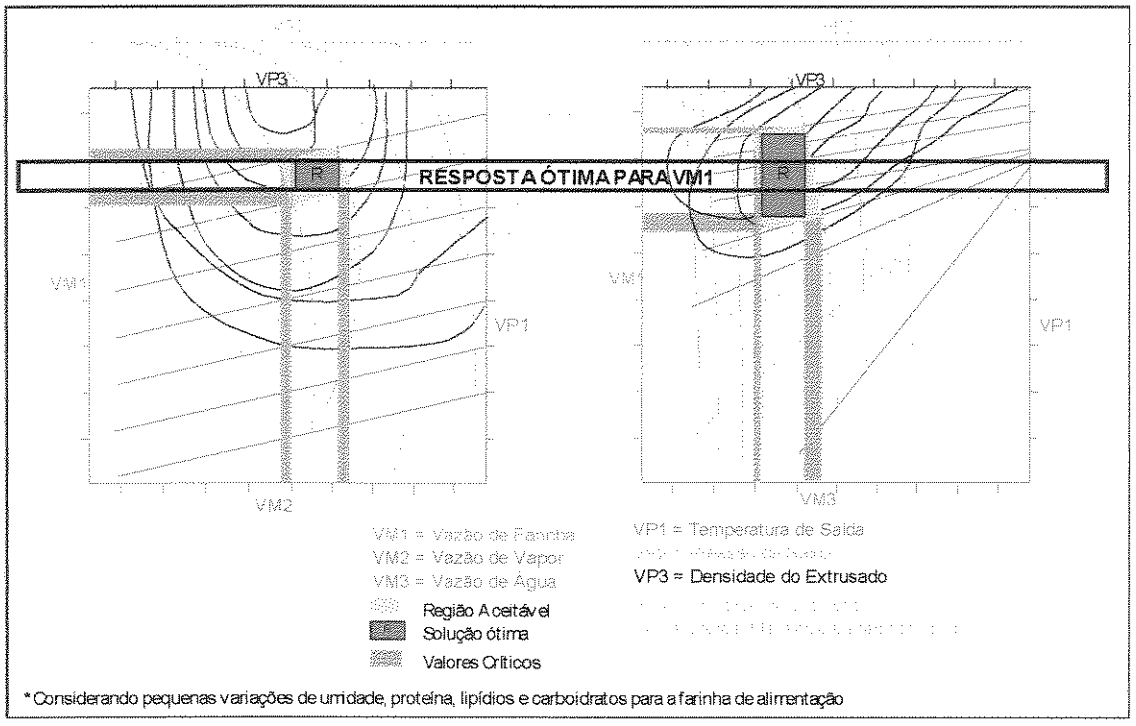


Figura 11: Representação da Solução Ótima para a Vazão de Alimentação de Farinha Segundo as Curvas de Contorno.

II.2.2.1) Amostragem Laboratorial

O procedimento de amostragem foi empregado devido a dois motivos básicos: provável variação dos valores estimados pelas receitas empregadas e a falta de instrumentação adequada para a avaliação em tempo real dos valores de umidade, proteína, lipídios e cinzas para a farinha de alimentação, descarga do pré-condicionador e produto final. O esquema de amostragem é mostrado na Figura 12.

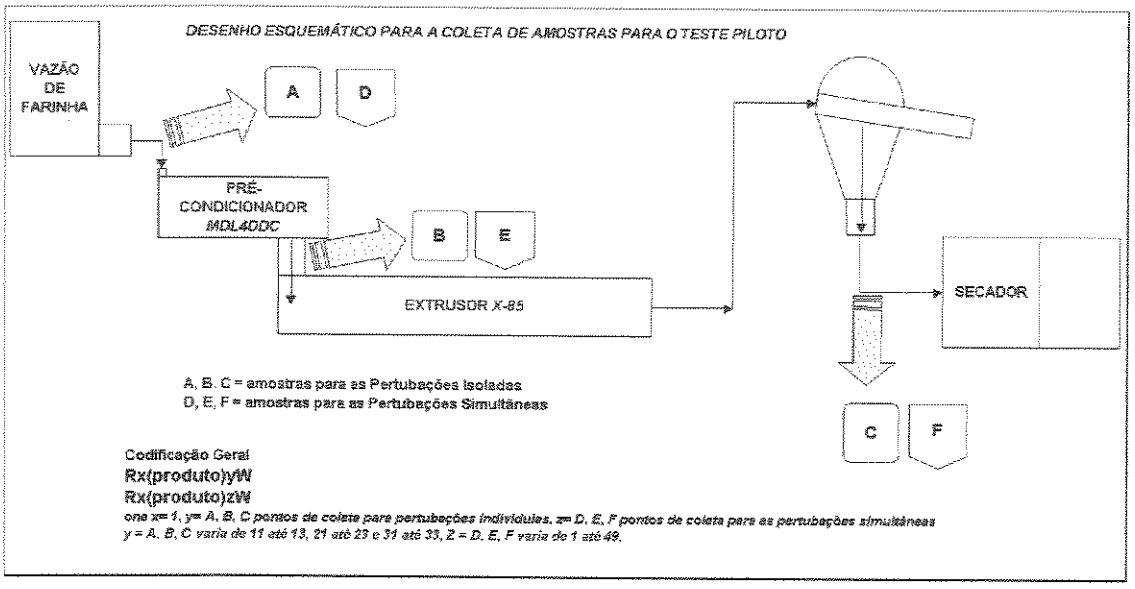


Figura 12: Desenho Esquemático para a Coleta de Amostras para o Teste Piloto.

Basicamente os pontos de amostragem foram selecionados de acordo com a facilidade de retirada da amostra. Observa-se que a retirada da amostra de farinha foi realizada no instante após iniciar-se uma perturbação degrau para a perturbação isolada ou simultânea. Para a retirada da amostra da saída do pré-condicionador foi utilizado uma chave manual para verter um pouco de farinha 'pré-cozida' ao recipiente de amostra, aproximadamente 120 s após o início da perturbação. A retirada da amostra de produto foi realizada exatamente após o medidor de densidade para os extrusados úmidos, localizado imediatamente antes da entrada do secador. Esta última amostragem coincidiu com o exato momento em que o estado estacionário foi identificado e portanto o arquivo referente aquele grupo de dados foi salvo. O tamanho de amostra utilizado foi de cerca de 250 g para farinhas e cerca de 400 g para o produto final. Todas as amostras foram conservadas sob refrigeração até a data de sua análise.

A codificação para as amostras é representada por *R1(produto)yW* e *R1(produto)zW* onde os valores de *y* e *z* são referentes às curvas de perturbações individuais e perturbações simultâneas respectivamente.

$y = A$ para a amostra de farinha de alimentação ao pré-condicionador, B para a amostra de farinha pré-gelatinizada e C para a amostra de produto úmido entre o ciclone e o secador;

z = D para a amostra de farinha de alimentação ao pré-condicionador, E para a amostra de farinha pré-gelatinizada e F para a amostra de produto úmido entre o ciclone e o secador;

W = numeração seqüencial do ensaio.

O Quadro 7 aloca a amostragem predita antes de realizar-se o experimento conforme a notação descrita acima. Na análise dos resultados será observado que alguns ensaios referentes às perturbações simultâneas não foram efetuados devidos a problemas diversos. Por outro lado, os ensaios para as perturbações isoladas foram completados para todas as receitas.

Quadro 7: Esquema das Análises Físico – Químicas Realizadas para o Teste Piloto.

Legenda	Análises necessárias
Cinza	umidade, proteína, lipídios e cinzas
Azul	umidade
sublinhado	analisar a média da mistura de 3 amostras

PERTURBAÇÕES	SC			PP		Wos	
	Primeiro DIA			*Segundo DIA*		*Terceiro DIA*	
INDIVIDUAIS	*R1(SC)A11*		R1(SC)C11	*R1(P)A11*	R1(P)C11	*R1(Wos)A11*	R1(Wos)C11
	R1(SC)A12		R1(SC)C12	*R1(P)A12*	R1(P)C12	*R1(Wos)A12*	R1(Wos)C12
	R1(SC)A13		R1(SC)C13	*R1(P)A13*	R1(P)C13	*R1(Wos)A13*	R1(Wos)C13
	R1(SC)A21		R1(SC)C21	*R1(P)A21*	R1(P)C21	*R1(Wos)A21*	R1(Wos)C21
	R1(SC)A22		R1(SC)C22	*R1(P)A22*	R1(P)C22	*R1(Wos)A22*	R1(Wos)C22
	R1(SC)A23		R1(SC)C23	*R1(P)A23*	R1(P)C23	*R1(Wos)A23*	R1(Wos)C23
	R1(SC)A31		R1(SC)C31	*R1(P)A31*	R1(P)C31	*R1(Wos)A31*	R1(Wos)C31
	R1(SC)A32		R1(SC)C32	*R1(P)A32*	R1(P)C32	*R1(Wos)A32*	R1(Wos)C32
	R1(SC)A33		R1(SC)C33	*R1(P)A33*	R1(P)C33	*R1(Wos)A33*	R1(Wos)C33
SIMULTÂNEAS	R1(SC)D1	R1(SC)E1	R1(SC)F1	R1(P)D1	R1(P)F1	R1(Wos)D1	R1(Wos)F1
	R1(SC)D2	R1(SC)E2	R1(SC)F2	R1(P)D2	R1(P)F2	R1(Wos)D2	R1(Wos)F2
	R1(SC)D3	R1(SC)E3	R1(SC)F3	R1(P)D3	R1(P)F3	R1(Wos)D3	R1(Wos)F3
	R1(SC)D4	R1(SC)E4	R1(SC)F4	R1(P)D4	R1(P)F4	R1(Wos)D4	R1(Wos)F4
	R1(SC)D5	R1(SC)E5	R1(SC)F5	R1(P)D5	R1(P)F5	R1(Wos)D5	R1(Wos)F5
	R1(SC)D6	R1(SC)E6	R1(SC)F6	R1(P)D6	R1(P)F6	R1(Wos)D6	R1(Wos)F6
	R1(SC)D7	R1(SC)E7	R1(SC)F7	R1(P)D7	R1(P)F7	R1(Wos)D7	R1(Wos)F7
	R1(SC)D8	R1(SC)E8	R1(SC)F8	R1(P)D8	R1(P)F8	R1(Wos)D8	R1(Wos)F8
	R1(SC)D9	R1(SC)E9	R1(SC)F9	R1(P)D9	R1(P)F9	R1(Wos)D9	R1(Wos)F9
	R1(SC)D10	R1(SC)E10	R1(SC)F10	R1(P)D10	R1(P)F10	R1(Wos)D10	R1(Wos)F10
	R1(SC)D11	R1(SC)E11	R1(SC)F11	R1(P)D11	R1(P)F11	R1(Wos)D11	R1(Wos)F11
	R1(SC)D12	R1(SC)E12	R1(SC)F12	R1(P)D12	R1(P)F12	R1(Wos)D12	R1(Wos)F12
	R1(SC)D13	R1(SC)E13	R1(SC)F13	R1(P)D13	R1(P)F13	R1(Wos)D13	R1(Wos)F13
	R1(SC)D14	R1(SC)E14	R1(SC)F14	R1(P)D14	R1(P)F14	R1(Wos)D14	R1(Wos)F14
	R1(SC)D15	R1(SC)E15	R1(SC)F15	R1(P)D15	R1(P)F15	R1(Wos)D15	R1(Wos)F15
	R1(SC)D16	R1(SC)E16	R1(SC)F16	R1(P)D16	R1(P)F16	R1(Wos)D16	R1(Wos)F16
	R1(SC)D17	R1(SC)E17	R1(SC)F17	R1(P)D17	R1(P)F17	R1(Wos)D17	R1(Wos)F17
	R1(SC)D18	R1(SC)E18	R1(SC)F18	R1(P)D18	R1(P)F18	R1(Wos)D18	R1(Wos)F18
	R1(SC)D19	R1(SC)E19	R1(SC)F19	R1(P)D19	R1(P)F19	R1(Wos)D19	R1(Wos)F19
	R1(SC)D20	R1(SC)E20	R1(SC)F20	R1(P)D20	R1(P)F20	R1(Wos)D20	R1(Wos)F20
	R1(SC)D21	R1(SC)E21	R1(SC)F21	R1(P)D21	R1(P)F21	R1(Wos)D21	R1(Wos)F21
	R1(SC)D22	R1(SC)E22	R1(SC)F22	R1(P)D22	R1(P)F22	R1(Wos)D22	R1(Wos)F22
	R1(SC)D23	R1(SC)E23	R1(SC)F23	R1(P)D23	R1(P)F23	R1(Wos)D23	R1(Wos)F23
	R1(SC)D24	R1(SC)E24	R1(SC)F24	R1(P)D24	R1(P)F24	R1(Wos)D24	R1(Wos)F24
	R1(SC)D25	R1(SC)E25	R1(SC)F25	R1(P)D25	R1(P)F25	R1(Wos)D25	R1(Wos)F25
	R1(SC)D26	R1(SC)E26	R1(SC)F26	R1(P)D26	R1(P)F26	R1(Wos)D26	R1(Wos)F26
	R1(SC)D27	R1(SC)E27	R1(SC)F27	R1(P)D27	R1(P)F27	R1(Wos)D27	R1(Wos)F27
	R1(SC)D28	R1(SC)E28	R1(SC)F28	R1(P)D28	R1(P)F28	R1(Wos)D28	R1(Wos)F28
	R1(SC)D29	R1(SC)E29	R1(SC)F29	R1(P)D29	R1(P)F29	R1(Wos)D29	R1(Wos)F29
	R1(SC)D30	R1(SC)E30	R1(SC)F30	R1(P)D30	R1(P)F30	R1(Wos)D30	R1(Wos)F30
	R1(SC)D31	R1(SC)E31	R1(SC)F31	R1(P)D31	R1(P)F31	R1(Wos)D31	R1(Wos)F31
	R1(SC)D32	R1(SC)E32	R1(SC)F32	R1(P)D32	R1(P)F32	R1(Wos)D32	R1(Wos)F32
	R1(SC)D33	R1(SC)E33	R1(SC)F33	R1(P)D33	R1(P)F33	R1(Wos)D33	R1(Wos)F33
	R1(SC)D34	R1(SC)E34	R1(SC)F34	R1(P)D34	R1(P)F34	R1(Wos)D34	R1(Wos)F34
	R1(SC)D35	R1(SC)E35	R1(SC)F35	R1(P)D35	R1(P)F35	R1(Wos)D35	R1(Wos)F35
	R1(SC)D36	R1(SC)E36	R1(SC)F36	R1(P)D36	R1(P)F36	R1(Wos)D36	R1(Wos)F36
	R1(SC)D37	R1(SC)E37	R1(SC)F37	R1(P)D37	R1(P)F37	R1(Wos)D37	R1(Wos)F37
	R1(SC)D38	R1(SC)E38	R1(SC)F38	R1(P)D38	R1(P)F38	R1(Wos)D38	R1(Wos)F38
	R1(SC)D39	R1(SC)E39	R1(SC)F39	R1(P)D39	R1(P)F39	R1(Wos)D39	R1(Wos)F39
	R1(SC)D40	R1(SC)E40	R1(SC)F40	R1(P)D40	R1(P)F40	R1(Wos)D40	R1(Wos)F40
	R1(SC)D41	R1(SC)E41	R1(SC)F41	R1(P)D41	R1(P)F41	R1(Wos)D41	R1(Wos)F41
	R1(SC)D42	R1(SC)E42	R1(SC)F42	R1(P)D42	R1(P)F42	R1(Wos)D42	R1(Wos)F42
	R1(SC)D43	R1(SC)E43	R1(SC)F43	R1(P)D43	R1(P)F43	R1(Wos)D43	R1(Wos)F43
	R1(SC)D44	R1(SC)E44	R1(SC)F44	R1(P)D44	R1(P)F44	R1(Wos)D44	R1(Wos)F44
	R1(SC)D45	R1(SC)E45	R1(SC)F45	R1(P)D45	R1(P)F45	R1(Wos)D45	R1(Wos)F45
	R1(SC)D46	R1(SC)E46	R1(SC)F46	R1(P)D46	R1(P)F46	R1(Wos)D46	R1(Wos)F46
	R1(SC)D47	R1(SC)E47	R1(SC)F47	R1(P)D47	R1(P)F47	R1(Wos)D47	R1(Wos)F47
	R1(SC)D48	R1(SC)E48	R1(SC)F48	R1(P)D48	R1(P)F48	R1(Wos)D48	R1(Wos)F48
				R1(P)D49	R1(P)F49		

A análise do esquema demonstrado no Quadro 7 identifica que para todas as receitas para os ensaios de perturbações isoladas não foram realizadas análises para a saída do pré-condicionador e somente foram analisadas as variações de umidade para o produto final. Além disso, as variações referentes à farinha de alimentação para as perturbações individuais foram obtidas através de análise representada pela mistura das três amostras coletadas durante o experimento.

Para as perturbações simultâneas o produto *SC* foi analisado integralmente para o teor de umidade, proteína, lipídios e cinzas, enquanto os produtos *PP* e *Wos* tiveram análise completa para a farinha de alimentação e somente análise do teor de umidade para o produto final, sem análises para a descarga do pré-condicionador.

As principais motivações para a restrição das análises descritas na Figura 12 são de ordem econômica e temporal, uma vez que considerando cada análise individualmente no conjunto de quatro (4) ensaios laboratoriais; o experimento ao todo exigiu cerca de 1100 análises laboratoriais.

II.2.3) Teste Industrial

O teste industrial visou somente o controle da densidade do produto extrusado úmido baseado na relação entre Temperatura e Pressão de Saída do extrusor, conforme o Quadro 8.

Quadro 8: Esquema das Variáveis para o Teste Industrial.

	Variável Manipulativa	Código	Variável de Processo	Código
Receita	Pré-Condicionador		Extrusor	
SC	Vazão de Farinha	VM1	Temperatura de saída	VP1
	Vazão de Vapor	VM2	Pressão de saída	VP2
	Vazão de Água	VM3		

O teste industrial consistiu em duas etapas principais:

II.2.3.1) Configuração do Algorítimo

Conforme mencionado, a instrumentação necessária e o equipamento industrial foram preparados previamente para a aplicação do controlador. Baseando-se nas conclusões relacionadas às perturbações múltiplas, foi observado o sistema por cerca de 2 dias com um mesmo produto (*SC*), a fim de selecionar a faixa de temperatura e pressão de saída correspondente para a densidade especificada pelos parâmetros de qualidade em regime considerado permanente. Como o extrusor industrial não tinha medidor de densidade para produtos úmidos, foi utilizado o sistema convencional de medida de densidade após a passagem do produto pelo conjunto secador – resfriador como parâmetro para o ajuste de pressão e temperatura. Evidentemente, durante os testes experimentais não foram realizados ajustes no secador.

Os testes foram muito válidos na definição e confirmação primeiramente das influências individuais das variáveis independentes para as variáveis de processo citadas. As perturbações não só definiram as tendências do processo industrial, mas também evidenciaram erros relacionados à lógica de controle interna seguida pelo *PID* associado ao *CLP Modicon*.

O principal erro foi o problema evidenciado quanto à alteração nos valores de vazão, controlados gravimetricamente por um silo com células de carga e um eixo transportador. Exemplificando, quando era pedido aumento do valor da vazão de farinha, o sistema respondia de forma aleatória, podendo aumentar ou diminuir o valor da vazão. O problema foi identificado como uma falha no cálculo das médias associada à medida gravimétrica, uma vez que o silo anterior ao parafuso alimentador é composto por uma célula de carga. Esta célula de carga fornece uma média da massa que vai sendo descarregada ao longo do tempo e então a velocidade do parafuso vai sendo estabelecida de acordo com a taxa de decréscimo da massa. Entretanto o sistema opera continuamente, o que faz com que no momento em que o silo estiver recebendo mais farinha o processo de medida é 'congelada', conforme a última medida antes do sistema receber a farinha. Durante esse tempo – aproximadamente 20 s – o sistema de alimentação fica operando com uma média que não representa o valor real; até que o sistema retome o valor de decréscimo da taxa de massa novamente. Observa-se que nesse período transitório o sistema poderia estar operando segundo duas condições de risco: primeiro com uma média inferior ao valor real – a vazão

real é maior do que a visualizada no monitor - ou segundo com uma média superior ao valor real – a vazão real é menor do que a visualizada no monitor. Portanto quando o sistema retorna a medida da taxa real, na situação um (1) a velocidade do parafuso é aumentada e na situação dois (2) é reduzida. Caso neste ponto o sistema tenha recebido o seguinte conjunto de sinais: situação um (1) (diminuir a vazão) e situação dois (2) (aumentar a vazão), o sistema literalmente não sabe que decisão tomar até que seja esclarecida a direção correta da taxa de perda de massa.

Este item operacional certamente não é considerado um problema quando se opera a um volume constante de taxa de alimentação, mas certamente é um ruído inaceitável sob o ponto de vista de instalação de um algorítmo de controle, uma vez que precisamente tem-se a possibilidade de iniciar-se com resposta inversa ao sinal de controle para uma variável independente. A solução para esse sistema é certamente a instalação de um medidor de vazão de sólidos após o eixo alimentador, que opere em malha fechada com lógica 'feedback'. Mesmo assim, os testes cuidadosamente avaliados, representaram a tendência natural do processo, uma vez que tiveram apenas natureza experimental.

II.2.3.2) Testes Experimentais

A configuração inicial do algorítmo pode ser observada nas duas entradas e duas saídas, que basicamente descreve um sistema *MIMO 2 x 2*, o que interfere precisamente no número de variáveis de entrada, sugeridas pelo Quadro 8. Embora de forma complicada na efetivação, os testes e os resultados experimentais dos testes piloto, bem como a aplicação industrial; possibilitaram a criação da variável única que relaciona a proporção vazão de vapor e vazão de água ao invés das mesmas isoladamente. Assim, foi instalado um bloco operacional com um controle "ratio" (proporcional), no qual o aumento da variável vazão de vapor, produziu também o aumento proporcional da variável vazão de água.

Embora o controlador *MFA* possa ser instalado diretamente aos elementos sensores do campo, considerando-se a instalação operante, baseada no *PID* alojado no *CLP Modicon*, foi decidido estabelecer a comunicação entre o controlador *MFA* e o *CLP* através do endereço dos transmissores conectados através do sistema *Wonderware*. Basicamente este procedimento possibilitou a comunicação estrutural do algorítmo de controle projetado no controlador *MFA* para as variáveis independentes e de processo conectadas diretamente

ao *CLP*. Em outras palavras, o controlador *MFA* tomava a decisão de controle, o sinal era enviado ao *CLP*, que por conversores analógico/digital, convertia o sinal em valor de corrente para a operação da variável de campo. Procedimento inverso era verificado para a leitura das variáveis – independentes e de processo – uma vez que o sinal era emitido pelos sensores no campo. Assim o ciclo de controle era completado, restando ao sistema *MFA* realizar a avaliação do erro em relação ao 'set – point' e aplicar a ação de controle neural, conforme já comentado nas seções (I.3.2.2) e (III.2.2.3), que caracterizam o controlador *MFA*.

O controlador *MFA* apresenta várias possibilidades de configuração baseadas em sistemas *SISO* e *MIMO*, que podem ser complementados com blocos funcionais com sistemas paralelos de 'feedforward', tempo morto e ratio, definidos segundo as tendências do processo. O controlador é alimentado com uma estimativa dos ganhos estacionários relacionados às perturbações, o tempo morto e o tempo de subida, bem como os valores do intervalo de variação. O sistema foi projetado para operar em módulo *MIMO* acoplado, embora o módulo *SISO* tenha sido bastante útil para a análise dos efeitos isolados. A fim de alcançar um melhor controle, foi também adicionado um controle 'feedforward' para cada variável independente o que tornou o sistema menos agressivo na ação de controle e mais estável em termos de resposta.

O tempo de amostragem definido no controlador *MFA* é definido como 63% do valor necessário para o sistema achar o valor estacionário, baseado na solução da resposta degrau para sistemas lineares de primeira ordem. Este tempo constitui o limite superior para o tempo de amostragem; sendo o limite inferior dado pelo tempo morto. Usualmente, o valor do tempo de amostragem para o controlador lógico é inferior cerca de 1/3 do valor do tempo de 63% e maior que o tempo morto. Para processos com tempo mortos muito elevados o controlador *CYBOCON* apresenta tratamento especial com o bloco funcional 'anti-time-delay' (CYBOCON User Manual, 1998).

III) RESULTADOS E DISCUSSÕES

A análise dos dados obtidos foi conduzida em dois grandes grupos. O primeiro referente ao teste piloto e o segundo associado ao teste industrial.

III.1) TESTE PILOTO

Antes de conhecer os resultados e explicações aos fenômenos estudados, é importante conhecer a rotina de análise.

Após o término da coleta de dados, os resultados referentes a cada receita foram armazenados em um arquivo principal, o qual basicamente colocou lado a lado todas as perturbações associadas à análise individual e simultânea, dispondo os valores das variáveis manipuláveis, de processo e monitoradas registrados em intervalos de 1 s. Os resultados laboratoriais são pontuais. Os valores transientes do processo foram registrados tal qual, mas a definição do valor estacionário foi obtida pela média dos cinco (5) últimos segundos, a fim de distribuir-se o erro associado a uma única medida. Esse procedimento é necessário para a análise relativa às regiões estatística de maximização ou minimização, conforme o planejamento estatístico composto central.

A análise do comportamento deste sistema define sua melhor aproximação para sistemas lineares de segunda ordem com relação aos dados experimentais. Associado a isso são calculados os parâmetros para a curva de resposta com perfil sigmoidal, aproximações para o tempo morto e tempo de subida e o valor do segundo estado estacionário da curva experimental em relação ao degrau perturbado, denominado ganho estacionário k_E, aproximado segundo um sistema linear de segunda ordem, com diferentes fatores de amortecimento ζ. Após esta análise são estimados, em função dos resultados obtidos pela análise da curva resposta característica, os parâmetros de sintonia para um controlador *PID*. Finalmente são estudadas algumas relações para o entendimento dos efeitos individuais e simultâneos das variáveis estudadas no processo de extrusão.

A avaliação dos parâmetros para a curva sigmoidal necessitou um programa específico construído em linguagem *MATLAB*. As análises estatísticas foram conduzidas no programa *STATISTICA*. Genericamente os valores de resposta *y(t)* em módulo para este experimento são normalizados através da expressão (III.1.1).

$$y(t) = \left| \frac{valor_desvio_medido}{\deg rau_da_pertubação} \right| \qquad \text{(III.1.1)}$$

Esse conceito é baseado no rebatimento da resposta negativa para o primeiro quadrante resultando em equivalentes valores de resposta para as constantes.

Para o melhor entendimento do conjunto de análises relacionadas ao teste piloto, é definido no Quadro 9 os valores empregados para o regime estacionário nas três (3) receitas avaliadas em relação à densidade e umidade do produto extrusado úmido. Esta etapa é primordial para o estabelecimento da mesma base de comparação para todos os efeitos; entretanto foi observada grande dificuldade para manter-se a mesma resposta estacionária ao longo dos ensaios para cada receita. Os Quadros 21 e 22, 23 e 24, 25 e 26 no Anexo II apresentam de forma sintética os valores estacionários para todos os ensaios relativos a cada receita, com relação as variáveis manipulativas, de processo e análises físico-químicas. Os valores relativos ao regime transiente são apresentados em cartas de avaliação gráficas.

Quadro 9: Valores Estacionários para a Qualidade do Produto Extrusado Úmido no Teste Piloto.

Produto Extrusado Valores Orientativos	*RECEITAS*		
	SC	*PP*	*Wos*
DENSIDADE (kg/hL)	36 - 40	36 - 40	37 - 39
UMIDADE (%)	22 - 24	22 - 24	22 - 24

Observa-se no Quadro 9 que os valores referentes à densidade e umidade são especificações do produto úmido. Como o objetivo do Teste Piloto é o estudo da influência das variáveis manipulativas para a determinação da qualidade do produto final, os valores de especificação de densidade e umidade do produto úmido são somente avaliados como uma resposta para a análise futura das correlações. A utilização destes parâmetros é determinante para o Teste Industrial, no qual o conhecimento angariado no teste Piloto associado com a estratégia de controle adequada tem como função garantir a qualidade final do produto.

III.1.1) Cálculos Empregados

O cálculo de energia mecânica específica *(SME)* em *kJ / kg* foi determinado a partir dos valores de torque (M_t), rotação do helicóide (*SS*) e vazão total de alimentação de farinha e gordura ao pré-condicionador (*FR*), medidos conforme equação (III.1.1.1.a). Equação similar a esta foi usada por Lu et al. (1992). A única diferença é que foi relacionada, para a equação de SME, somente a vazão de alimentação de farinha. Caso não possa ser medido o torque diretamente sugere-se o uso da equação (III.1.1.1.2) empregada pelos mesmos autores.

$$SME = \frac{0.377 M_T SS}{FR} \qquad \text{(III.1.1.1.a)}$$

A análise dimensional da equação (III.1.1.1.a) é dada abaixo:

$$SME = \left(\frac{kJ}{kg}\right) = kW.s\left(\frac{rev}{\min}\right)\left(\frac{60\min}{1h}\right)\left(\frac{h}{kg}\right) \qquad \text{(III.1.1.1.b)}$$

O uso da equação referente à energia mecânica específica em relação à vazão de farinha de alimentação possibilita uma melhor comparação energética para diferentes valores de vazão, uma vez que a adição de água e vapor ao pré-condicionador determinam diferentes perfis de viscosidade à massa extrusada, o que define distintas exigências de torque para o processo. E, uma vez que esses valores não são considerados no denominador, não confunde-se o valor de energia mecânica utilizado. Excessão é feita ao valor de gordura adicionado ao pré-condicionador, uma vez que esse excedente lipídico é incluído na definição dos ingredientes a base seca.

$$M_t = \frac{T_q(run) P_{er}(rated)}{\omega_{er}(rated)} \qquad \text{(III.1.1.2)}$$

onde o valor T_q é o percentual de torque, P_{er} é a potência do extrusor e ω_{er} a rotação do helicóide. Esta equação será importante para a explicação de alguns efeitos.

A energia térmica específica *(STE)* neste estudo foi definida como o gasto energético do sistema quanto às variações dos constituintes da farinha de alimentação, adição de vapor e água em relação à vazão de farinha e vazão de gordura adicionadas no pré-condicionador. Como o objetivo deste estudo não é a avaliação precisa de perdas térmicas no pré-

condicionador e extrusor, bem como os calores de mistura e reação durante o processo; tais valores não foram considerados no cálculo de energia térmica específica. Assim a *STE* fica definida para este estudo conforme a equação (III.1.1.3). A vazão de vapor foi considerada com um título de 100% (grau de pureza).

$$STE = \frac{\left(\left(M_{Fw}.Cp_{Fw}\right)+\left(M_{Ff}.Cp_{Ff}\right)+\left(M_{Fp}.Cp_{Fp}\right)+\left(M_{Fa}.Cp_{Fa}\right)+\left(M_{Fc}.Cp_{Fc}\right)\right)T_F + \left(L.Cp_{Ff}\right)T_L + \left(M_S.\Delta H_S\right)+\left(M_W Cp_{Fw}\right)T_W}{FR} \qquad \text{(III.1.1.3)}$$

A equação (III.1.1.3) é uma forma simplificada do balanço total de energia de energia para a extrusão visto na equação (III.1.1.1.1), onde:

- $M_{Fw}, M_{Ff}, M_{Fp}, M_{Fa}, M_{Fc}, M_S, M_W$ representam a vazão mássica de umidade, lipídios, proteína, cinzas, carboidratos, vapor e água adicionados ao pré-condicionador, respectivamente.
- T_F é a temperatura média da alimentação de farinha, no experimento 25 °C.
- T_L é a temperatura média da alimentação lipídica, no experimento 25 °C.
- T_W é a temperatura média da água no pré-condicionador, no experimento 25 °C.
- $Cp_{Fw}, Cp_{Ff}, Cp_{Fp}, Cp_{Fa}, Cp_{Fc}$ representam as capacidades térmicas em kJ/kg°C associadas ao teor de umidade (4,187), lipídios (1,675), proteínas (1,549), cinzas (0,837) e carboidratos (1,424), respectivamente.
- ΔH_S a entalpia do vapor a pressão de 30 psi adicionado ao pré-condicionador, no experimento 2707,998 kJ/kg.

Com este estudo é possível comparar os valores de *SME* e *STE* para a produção do extrusado, visto a base de cálculo ser a mesma.

III.1.1.1) Análise dos Principais Efeitos

Para a perfeita compreensão do papel das variáveis manipulativas no processo de extrusão é necessário aplicar o balanço de massa e energia para o pré – condicionador, uma vez que todas as variáveis manipulativas para o teste piloto são controladas na entrada do pré-condicionador. O balanço energia para o sistema não adiabático com reação química, o tempo de residência definido, é dado pela expressão (III.1.1.1.1).

$$(M_{Fw} \cdot Q_{Fw}) + (M_{Ff} \cdot Q_{Ff}) + (M_{Fp} \cdot Q_{Fp}) + (M_{Fa} \cdot Q_{Fa}) + (M_{Fc} \cdot Q_{Fc}) + (M_S \cdot \Delta H_S) + (M_W \Delta H_W) + Q_{mix} = (M_{LS} \cdot \Delta H_{LS}) + (M_D \overline{Q_D}) + Q_E + \Delta H_R \quad \text{(III.1.1.1.1)}$$

onde:

- M_{LS}, M_D representam a vazão mássica de perda de vapor e descarga de farinha do pré -condicionador.
- $Q_{Fw}, Q_{Ff}, Q_{Fp}, Q_{Fa}, Q_{Fc}, \Delta H_S, \Delta H_W, Q_{mix}$ representam a entrada de energia térmica total associada à umidade, lipídios, proteína, cinzas, carboidratos, a entalpia do vapor, a entalpia da água e a transferência de energia pela mistura mecânica, respectivamente.
- $\Delta H_{LS}, \overline{Q_D}, Q_E, \Delta H_R$ representam o consumo de energia pela entalpia de vapor perdido, entalpia ponderada para a vazão de descarga do pré – condicionador, energia térmica transferida para o ambiente e entalpia consumida na reação química, respectivamente.

Este balanço de energia térmica é determinante para a operação do extrusor. Excetuando-se para esta etapa a influência da matéria – prima (será discutida na análise dos efeitos múltiplos), são relevantes o desenho do pré – condicionar (geometria e potência) e as vazões de farinha, vapor e água. Estes fatores estão intrinsecamente associados com o tempo de residência do pré – condicionador.

Segundo Huber (1990) a adição de vapor no pré – condicionador promove o cozimento da massa pela hidrólise enzimática do amido. Portanto, o cozimento do produto só é conseguido caso também haja a adição de água a massa alimentícia, maximizando a ação do vapor. Este fenômeno é denominado gelatinização e como o pré-condicionador opera a pressão atmosférica, é necessário um teor de umidade mínimo de 28 % para que se promova o lichiviamento da estrutura biopolimérica em forma de cacho estruturada por

ligações *α-1,6* da amilopectina e ligações lineares *α-1,4* da amilose, esta última associada ao aspecto lamelar e também pelas zonas amorfas no considerado conjunto cristalino do amido, segundo Gallant, Bouchet e Baldwin (1997). Estudos mais detalhados sobre as propriedades dos amidos podem ser encontrados nos ensaios experimentais realizados por Di Qu, Ada e Wang (1998) e Jane et al. (1999).

Assim, a adição de vapor conjugada a adição de água permite o melhor aproveitamento do extrusor para gelatinização do amido. Por outro lado, volumes excessivos de vapor ao pré–condicionador, além de aumentar as perdas térmicas, provocam a redução da estabilidade de proteínas e vitaminas.

III.1.2) Variáveis de Análise

Uma vez que não foi utilizado a variação da matéria – prima como fator neste experimento, e esta foi apenas monitorada, é necessário estabelecer-se um critério um tanto diferente do utilizado até o presente momento, a fim de que o entendimento das diversas influências seja caracterizado de forma significativa. Dessa forma, como se tem a análise da matéria – prima quanto aos constituintes químicos, será definida a variação das variáveis manipulativas, considerando a vazão de alimentação de farinha a base seca, o que agrupa a variação de umidade como uma variável única. Este procedimento é explicado pela variação nos constituintes da farinha, observado no Quadro 10.

Quadro 10: Variação das Receitas Utilizadas para o Teste Piloto.

RECEITA	VARIAÇÃO	Umidade (%)	Lipídio (%)	Proteína (%)	Cinzas (%)	Carboidratos (%)
SC	MIN	9,01	2,80	19,09	5,57	63,53
	MÁX	10,25	6,20	24,18	10,55	48,82
	MÉDIA	9,63	4,50	21,64	8,06	56,18
	DESV. PADRÃO	0,88	2,40	3,60	3,52	10,40
PP	MIN	9,06	3,18	28,03	6,83	52,90
	MÁX	9,58	4,78	32,95	8,57	44,12
	MÉDIA	9,32	3,98	30,49	7,70	48,51
	DESV. PADRÃO	0,37	1,13	3,48	1,23	6,21
Wos	MIN	7,71	1,51	30,88	5,71	54,19
	MÁX	8,70	5,92	39,09	6,63	39,66
	MÉDIA	8,21	3,72	34,99	6,17	46,93
	DESV. PADRÃO	0,70	3,12	5,81	0,65	10,27

Assim, definem-se as seguintes variáveis normalizadas:

- Variação da vazão de vapor com relação à vazão de farinha a base seca, VM_{21};
- Variação da vazão de umidade com relação à vazão de farinha a base seca, VM_{U1};
- Variação da vazão de vapor com relação à vazão de umidade, VM_{2U};
- Variação da vazão de farinha a base seca com relação à soma da variação de vapor e umidade, $VM_{1(2U)}$.

onde a vazão de umidade engloba a adição de água e a umidade presente na vazão de farinha. Os valores relativos à matéria – prima são recalculados a base seca e a adição externa de lipídio na extrusora é adicionada no balanço de massa ao pré-condicionador. O valor de rotação do helicóide (VM_{4R}) é calculado em função do percentual de variação.

Sendo VM_{1L}, a vazão de alimentação de farinha somada a adição de lipídio (óleo ou gordura), VM_2 a vazão de alimentação de vapor, VM_3 a vazão de alimentação de água, VM_4 a variação na rotação do helicóide, UM_F a vazão de umidade da farinha de alimentação e VM_{4EST} o valor de rotação do helicóide no estado estacionário, representam-se às equações normalizadas nas equações (III.1.2.1), (III.1.2.2), (III.1.2.3), (III.1.2.4) e (III.1.2.5).

$$VM_{21} = \frac{VM_2}{VM_{1L} - UM_F} \tag{III.1.2.1}$$

$$VM_{U1} = \frac{VM_3 + UM_F}{VM_{1L} - UM_F} \tag{III.1.2.2}$$

$$VM_{2U} = \frac{VM_2}{VM_3 + UM_F} \tag{III.1.2.3}$$

$$VM_{1(2U)} = \frac{VM_{1L} - UM_F}{VM_1 + VM_2 + UM_F} \tag{III.1.2.4}$$

$$VM_{4R} = 100 - \left(\frac{VM_4 100}{VM_{EST}} \right) \tag{III.1.2.5}$$

Os valores para as variáveis manipulativas normalizadas e constituição da matéria-prima a base seca são apresentados nos Quadros 27, 28 e 30 no Anexo II respectivamente para as receitas *SC*, *PP* e *Wos*.

III.1.2.1) Relação Temperatura e Pressão de Saída Versus Umidade e Densidade do Produto Extrusado

A proposta que será avaliada para controle do processo de extrusão baseia-se na condição sinequanom que a densidade e umidade do produto extrusado úmido possam ser relacionadas com o valor de temperatura e pressão de saída, medidos na saída do extrusor. A obtenção desse modelo é avaliada para um nível de significância de 95%, o que corresponde a um fator $p <= 0,05$.

Visto a interferência das diversas fontes de erro para esse trabalho, como por exemplo o tempo morto e a medida de densidade; serão considerados valores de $p<= 0,06$ para a caracterização dos efeitos significativos para todas as análises multidimensionais.

O tempo morto associado à medida de densidade está intrinsecamente associado ao aparato mecânico empregado, uma vez que este opera através da retirada da amostra da linha por um sistema a volume definido, onde pelo emprego de uma célula de carga, mede-se a variação de massa que é então convertida ao quociente entre massa e volume dado em *kg/hL*. A localização do medidor de densidade usado ficou logo após o ciclone, que fica imediatamente antes da alimentação do secador, a fim de minimizar-se a influência de transporte pneumático desde a saída da extrusora, uma vez que o ciclone serve para ajustar a velocidade do produto para a alimentação do secador. Para o valor de umidade, existe significativa interferência durante o transporte; entretanto, a perda de umidade pode ser considerada uniforme, o que possibilita a validade sobre a influência das variáveis de processo (temperatura e pressão de saída), visto a constante velocidade do sistema pneumático transportador e o relativo pequeno comprimento da linha de transporte (cerca de 10m).

O modelo é validado pelo diagrama de *Pareto*, que basicamente grafica os valores de p e pelo teste F de significância, compara o valor de F estimado (quociente entre a

média quadrática da regressão e a média quadrática do resíduo) em função dos dados experimentais com o valor teórico de uma distribuição de freqüência de referência $F_{(p-1,n-1)}$. Este valor é informado pela tabela *ANOVA*.

No Anexo III as Figuras 48 e 49 demonstram a relação significativa entre a temperatura e pressão de saída, medidas para os parâmetros densidade e umidade do produto extrusado úmido na receita *SC*. As Figuras 50 e 51 mostram as relações observadas para a receita *PP* e as Figuras 52 e 53 às relações observadas para a receita *Wos*.

As relações estatísticas para a densidade do produto extrusado úmido *(Z)* com a temperatura *(X)* e pressão de saída *(Y)* para as receitas empregadas são obtidas através da tabela *ANOVA* nos Quadros 30, 31 e 32. As mesmas relações para a umidade do produto extrusado úmido *(Z)* são encontradas nos Quadros 33, 34 e 35 no Anexo III. Pode-se observar nestes quadros que a correlação R^2 fica em torno de 38, 39 e 36 % para a densidade nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente e 62, 31 e 47 % para a umidade nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente.

As relações para a densidade do produto extrusado úmido nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* são representadas pelas equações (III.1.2.1.1), (III.1.2.1.2) e (III.1.2.1.3) respectivamente:

Receita *SC*: $Z = -38{,}8610 + 0{,}7091X + 0{,}1603Y - 0{,}0006Y^2$ (III.1.2.1.1)

Receita *PP*: $Z = 37{,}4935 - 0{,}00003X^2 - 0{,}0002Y^2 + 0{,}0005XY$ (III.1.2.1.2)

Receita *Wos*: $Z = 50{,}1694 - 0{,}0006X^2 - 0{,}0151Y$ (III.1.2.1.3)

A dependência para a densidade apresenta valores conforme as equações acima que identificam claramente a falta de consistência para um modelo preditivo que possa ser efetivo quando aplicado a diferentes receitas. Este fato praticamente descarta a aplicação de um dado valor para temperatura e pressão de saída que atenda a correta relação para a densidade de quaisquer produtos extrusados na indústria de ração para animais de estimação. Por outro lado, a forte relação identificada garante a existência da equivalência de uma determinada região de temperatura e pressão de saída do extrusor,

que associa-se a valores definidos de densidade para aquele produto específico. A variação dos coeficientes e tendência pode ser atribuída a uma série de fatores, entre os principais o perfil reacional entre umidade, proteína, gordura e principalmente diferentes teores e qualidade de amidos, responsáveis por perfis pseudoplásticos de viscosidade distintos ao longo do extrusor. Com isso, a microestrutura do produto extrusado é afetada de forma diferenciada, o que em tese contribui de forma distinta para os respectivos valores de densidade.

As relações para a umidade do produto extrusado úmido nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* são representadas pelas equações (III.1.2.1.4), (III.1.2.1.5) e (III.1.2.1.6) respectivamente:

Receita *SC*: $Z = 87,6212 - 0,6292X - 0,0001Y^2$ (III.1.2.1.4)

Receita *PP*: $Z = 42,1535 - 0,1360X - 0,0293Y$ (III.1.2.1.5)

Receita *Wos*: $Z = 48,3982 - 0,1936X - 0,0259Y$ (III.1.2.1.6)

A análise dos valores de umidade segue por sua vez a mesma tendência descrita pela densidade, entretanto com maior proximidade dos coeficientes e mesma tendência para as três receitas, visto a umidade percentual apenas representar o valor presente de água no produto e portanto ser inteiramente dependente das vazões de vapor e água para o pré-condicionador, associada à presença de umidade na farinha e perda por evaporação na saída do extrusor. Uma vez que a simples análise de umidade não reflete o seu complicado papel na reação química ao longo do extrusor, responsável em grande parte por propriedades como densidade, textura e dimensões do produto extrusado, espera-se comportamento similar com relação à temperatura e pressão de saída. Este comportamento, assim como explicado para o caso da densidade, é novamente específico para cada receita.

A avaliação dos valores calculados pela tabela *ANOVA* identifica, conforme esperado, a relação estatística significativa entre a temperatura e pressão de saída do extrusor para os valores de densidade e umidade do produto extrusado úmido. Esta dependência é facilmente observada pela influência que a temperatura e pressão de saída exercem na viscosidade do produto ao longo da extrusão. Considera–se a temperatura de saída, como foi demonstrado pelo modelo de Tan e Hofer (1995), como uma função do aquecimento (térmico e por cisalhamento), do resfriamento da camisa do extrusor, do

trabalho de eixo e do tempo de residência. Assim, a viscosidade aparente para o amido durante a extrusão pode ser estimada a partir de uma relação entre a tensão de cisalhamento, pressão e temperatura.

De uma forma geral, o aumento de volume – expansão (relacionado com a porosidade no interior do extrusado) representado pela diferença de pressão e a taxa de evaporação na extrusão para uma receita base amilácea, dada em função da temperatura, é o resultado do perfil de viscosidade ao longo do extrusor. Este perfil é de avaliação bastante complexa e por isso as relações observadas nas Figuras 48, 49 e 50 e 51, 52 e 53 no Anexo III indicam as tendências do processo.

Embora existam algumas variações nos perfis observados nas curvas que relacionam os valores de temperatura e pressão de saída para a densidade e umidade do produto extrusado úmido, estas relações mantêm a mesma tendência. O fato de variarem os valores de temperatura e pressão de saída é relacionado à variação na receita, o que determina a cada caso um novo valor para o regime permanente. Entretanto, uma vez definido a faixa de operação, o sistema deve operar a fim de que o regime permanente seja mantido. Pelo conjunto das relações pode-se concluir pelos gráficos, relativos as receitas *PP* e *Wos*, nas Figuras 50 e 52 no Anexo III respectivamente, que um aumento de temperatura produz uma tendência de queda de densidade mais pronunciada a altas pressões. Quando os valores de pressão de saída são muito baixos a tendência é que o aumento de temperatura não promova uma mudança de densidade muito significativa. A redução no valor de temperatura produz uma tendência ao aumento no valor de densidade, o que a baixas pressões tem efeito mais pronunciado. O gráfico relativo à receita *SC* mostrado na Figura 48 no Anexo III apresenta essas mesmas tendências, entretanto a curva está um pouco distorcida na sua parte parabólica, o que confunde a interpretação mais precisa. A variação de pressão de saída tem um efeito mais simples, isto é, a baixas pressões há a tendência de uma redução de densidade e a altas pressões o valor de densidade tende a aumentar. Esse efeito pode ser relacionado com a tendência de expansão verificada ao produto, visto que a altas pressões é resultante maior cisalhamento e produzem uma maior expansão para o produto, aumentando o seu volume; já a baixas pressões esse efeito de expansão é menos pronunciado e o valor de densidade tende a diminuir. Mesmo em receitas específicas, na qual não haja uma quantidade suficiente de carboidratos para promover a gelatinização, a maior evaporação de água na saída do extrusor manterá o mesmo efeito.

As relações para a umidade do produto extrusado úmido são as de mais fácil interpretação, conforme observado nas Figuras 49, 51 e 53 no Anexo III, uma vez que o aumento de temperatura e pressão diminuem o valor da umidade e, por outro lado, uma retração nos valores de temperatura e pressão de saída, contribuem para a manutenção de maiores valores de umidade.

De uma forma geral pode dizer que a temperatura de saída tem influência bastante complexa para a densidade do produto e que pequenas variações no seu valor podem atribuir mudanças significativas no valor de densidade e umidade. Este efeito é melhor observado na equação (III.1.2.1.7), proposta por Qu e Wang (1998).

$$\mu_a = AP\ln(\gamma)\exp\left\{a_2 X \exp(a_3 P) + \left(\frac{\Delta E}{RT}\right) + HM\right\} \qquad \text{(III.1.2.1.7)}$$

na qual observa-se que para o cálculo da viscosidade aparente μ_a de uma massa extrusada rica em amido, a influência conjugada entre temperatura T e pressão P irão determinar o seu perfil. Analisando-se a equação (III.1.2.1.7) verifica-se que além da influência de T e de P são avaliadas as variáveis γ, X, M, ΔE, que representam a tensão de cisalhamento, o grau de degradação do amido, o valor de umidade e o valor da energia de ativação respectivamente, associadas as constantes A, a_2, a_3 e H relacionadas ao amido.

A relação expressa na equação (III.1.2.1.7) identifica que o valor de viscosidade é uma função na qual temperatura e pressão têm influências conjugadas ao valor de umidade, o que ratifica as relações experimentais observadas. Portanto, o controle da temperatura e pressão de saída terão efeito significativo na manutenção dos valores de densidade e umidade do produto úmido. Como a natureza da relação é complexa, define-se o controle de densidade, principalmente, como uma região ótima e não um ponto, o que permite extrema vantagem para a ação de um sistema de controle.

III.1.2.2) Normalização das Variáveis de Processo

O uso das variáveis normalizadas discutidas na seção III.1.2 representa também as regiões de trabalho usualmente adotadas no extrusor. Para as variáveis VM_{21}, VM_{U1}, VM_{2U} e $VM_{1(2U)}$ são observadas quatro possíveis combinações *3 x 3* para cada receita, *SC*, *PP*, *Wos* conforme mostrado na Figuras 13, 14 e 15 respectivamente.

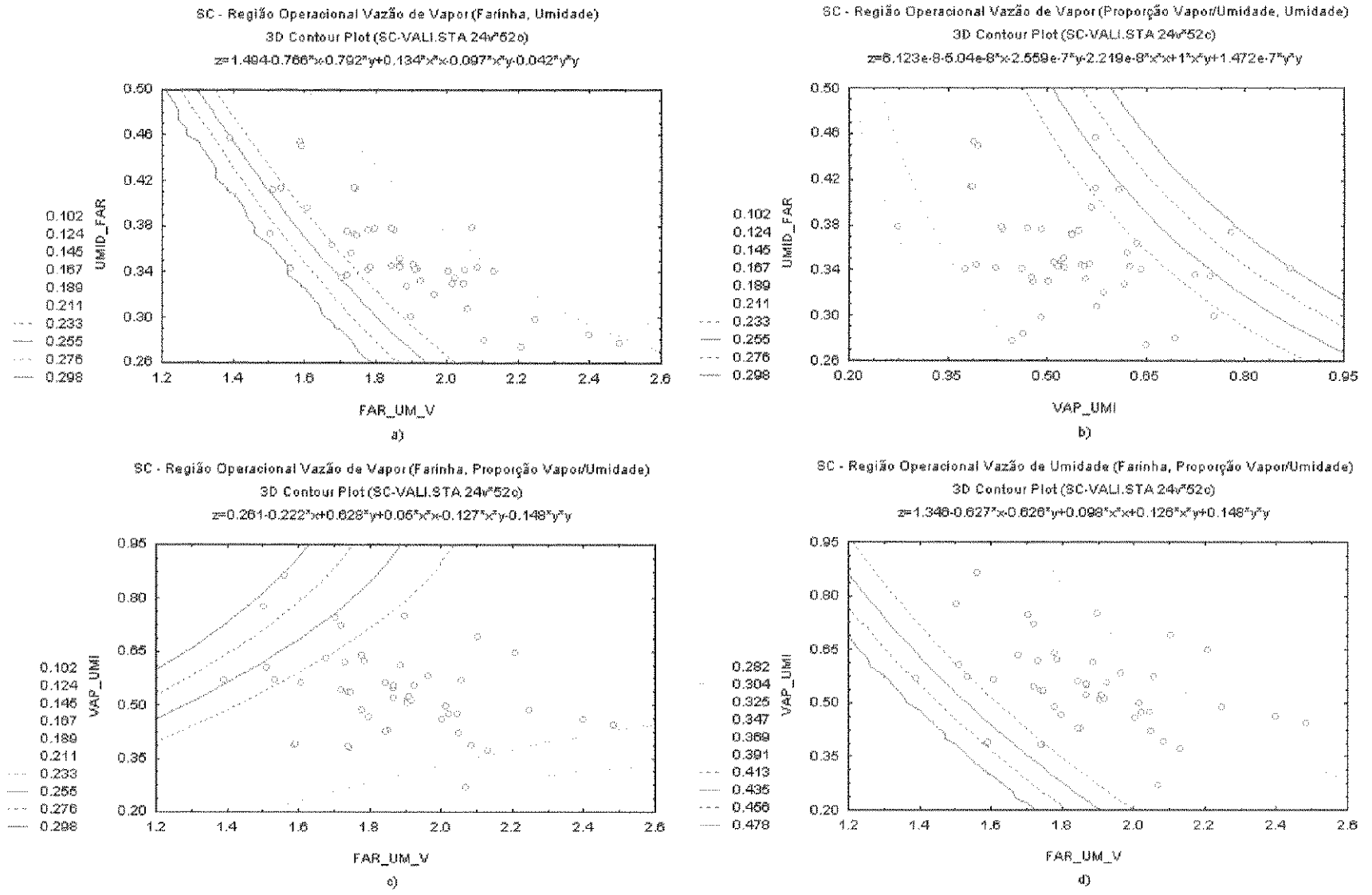


Figura 13: Região Operacional de (a) VM_{21}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{U1}; (b) VM_{21}, VM_{2U} e VM_{U1}; (c) VM_{21}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U}; (d) VM_{U1}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U} para a Receita SC.

A análise da Figura 13 possibilita a definição dos estados estacionários, uma vez que essas variáveis, em última análise, representam as variáveis vazão de alimentação de vapor, vazão de alimentação de umidade e vazão de alimentação de farinha (base seca). Por exemplo, o estado estacionário para a vazão de vapor com relação à alimentação de farinha VM_{21} é aproximadamente 0,18; significando que para cada parte de farinha a base seca alimentada (por exemplo 1 ton/h), deve-se adicionar cerca de 0,18 partes (18 %) de vapor a fim de manter-se a proporção. Então, a partir desse valor normalizado, a Figura 13.a apresenta as variáveis $VM_{1(2U)}$ (eixo x) e VM_{U1} (eixo y) e define para uma dada curva de VM_{21} (por exemplo: a curva de 0,18) as possíveis combinações de vazões de farinha a base seca e de umidade total (vazão de água e umidade da farinha) para aquele valor estacionário. O mesmo raciocínio é empregado na combinação entre as variáveis VM_{21} (eixo z), VM_{2U} (eixo x) e VM_{U1} (eixo y), na qual para pares associados da proporção de alimentação entre vapor e água encontra-se a curva de equilíbrio para a vazão de vapor, conforme a Figura 13.b. Este gráfico é bastante importante, pois basicamente identifica o compromisso que existe para o aumento de vapor, desde que a umidade de alimentação seja reduzida, a fim de que seja mantida uma umidade total para a massa a ser extrusada dentro dos valores ótimos. Deve-se então observar que a proporção vapor / umidade, como já foi discutido, desempenha um importante papel para o aumento de viscosidade da farinha a ser extrusada.

As Figuras 13.c e 13.d apresentam as curvas de alimentação de vapor e umidade, associadas aos pares de vazão de farinha (eixo x) e proporção vapor / umidade (eixo y). Estas duas curvas são de grande importância, pois identificam o "desejo" de todo extrusor comercial: operar a vazões máximas mantendo a qualidade do produto final. Entretanto, pela observação dessa curva, o aumento de vazão provoca uma maior restrição da faixa operacional. A vazão para o processo de extrusão identificada nestes testes varia de 1,8 a 2,10 partes em relação à soma das vazões de umidade e de vapor. Por outro lado a vazão de umidade representa 0,7 a 0,4 partes do valor da vazão de farinha a base seca. A relação vapor / umidade é dada entre 0,2 a 0,4 partes de vapor para 1 parte de vazão de umidade. Esses valores servem como boa referência para a otimização das variáveis de processo.

As Figuras 14 e 15 apresentam comportamentos similares para as receitas *PP* e *Wos*, respectivamente. Observam-se algumas variações nos valores dos estados estacionários, mas as tendências discutidas acima prevalecem às mesmas.

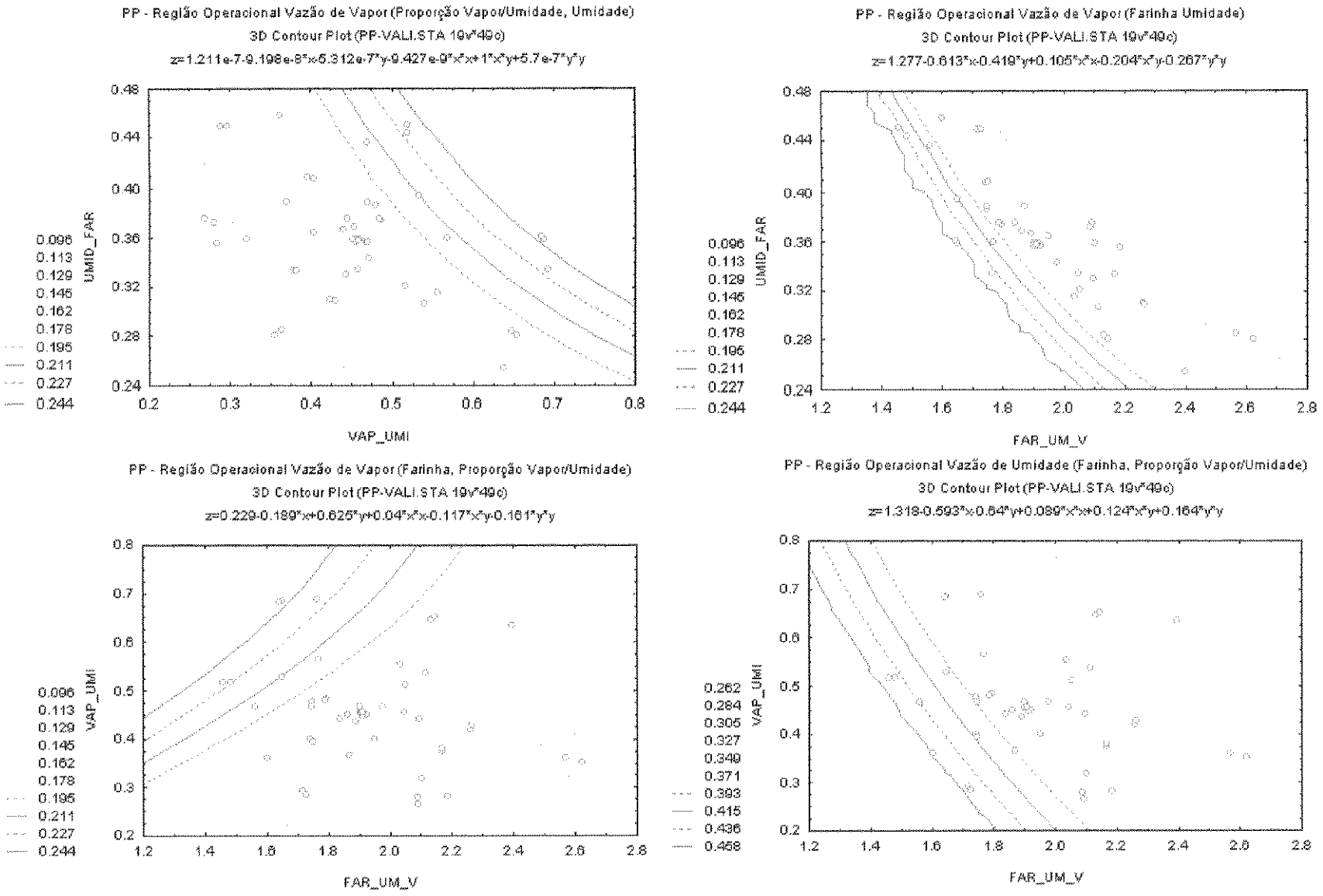


Figura 14: Região Operacional de (a) VM_{21}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{U1}; (b) VM_{21}, VM_{2U} e VM_{U1}; (c) VM_{21}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U}; (d) VM_{U1}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U} para a Receita PP.

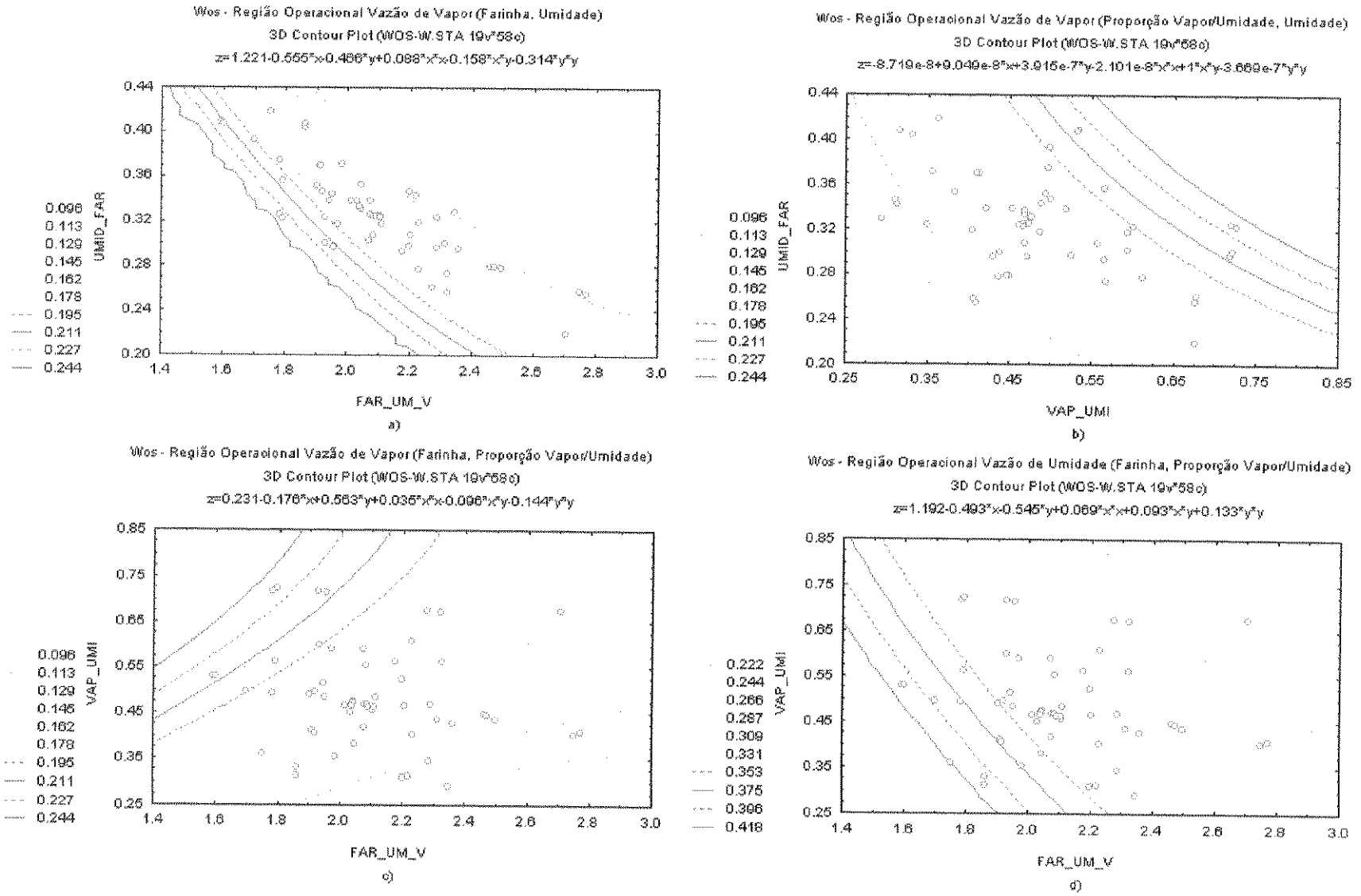


Figura 15: Região Operacional de (a) VM_{21}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{U1}; (b) VM_{21}, VM_{2U} e VM_{U1}; (c) VM_{21}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U}; (d) VM_{U1}, $VM_{1(2U)}$ e VM_{2U} para a Receita Wos.

A análise das Figuras 16 e 17 identificou como pequena a variação percentual de rotação do helicóide para a receita *SC* a fim de serem caracterizados os efeitos, sendo esta aumentada em 100% em relação ao valor usado na receita de *SC* para as outras duas receitas.

A adição da variável rotação do helicóide VM_{4R} às quatro variáveis discutidas acima aumenta o número de combinações para um total de dez (10); sendo as restantes seis (6) combinações mostradas nas Figuras 16 e 17 para a receita *SC*.

Uma vez que estão inter-relacionadas proporcionalmente e as receitas utilizadas para a obtenção dos dados experimentais são representativas da maioria dos processos de extrusão de produtos secos para animais de estimação, o emprego destas cartas definem o conjunto de possíveis regiões operacionais onde o controle da extrusão deverá atuar. Alusivo a isso, no processo manual essa árdua operação é realizada pelos operadores, usualmente encontrando algum sucesso, baseado-se na experiência operacional, o que fundamentado nas distintas combinações para o processo de extrusão, trata-se da mais bizarra definição do processo tentativa – erro.

O processo de controle de extrusão opera a uma dada condição de equilíbrio variando em pequenos degraus as variáveis manipulativas, a fim de equilibrar as contribuições de cada variável manipulativa para a manutenção do valor de temperatura e pressão de saída referentes ao estado estacionário apresentados nas Figuras 13, 14, 15, 16 e 17. A combinação dessas condições operacionais será avaliada de forma estatisticamente significativa na análise dos efeitos conjugados (múltiplos).

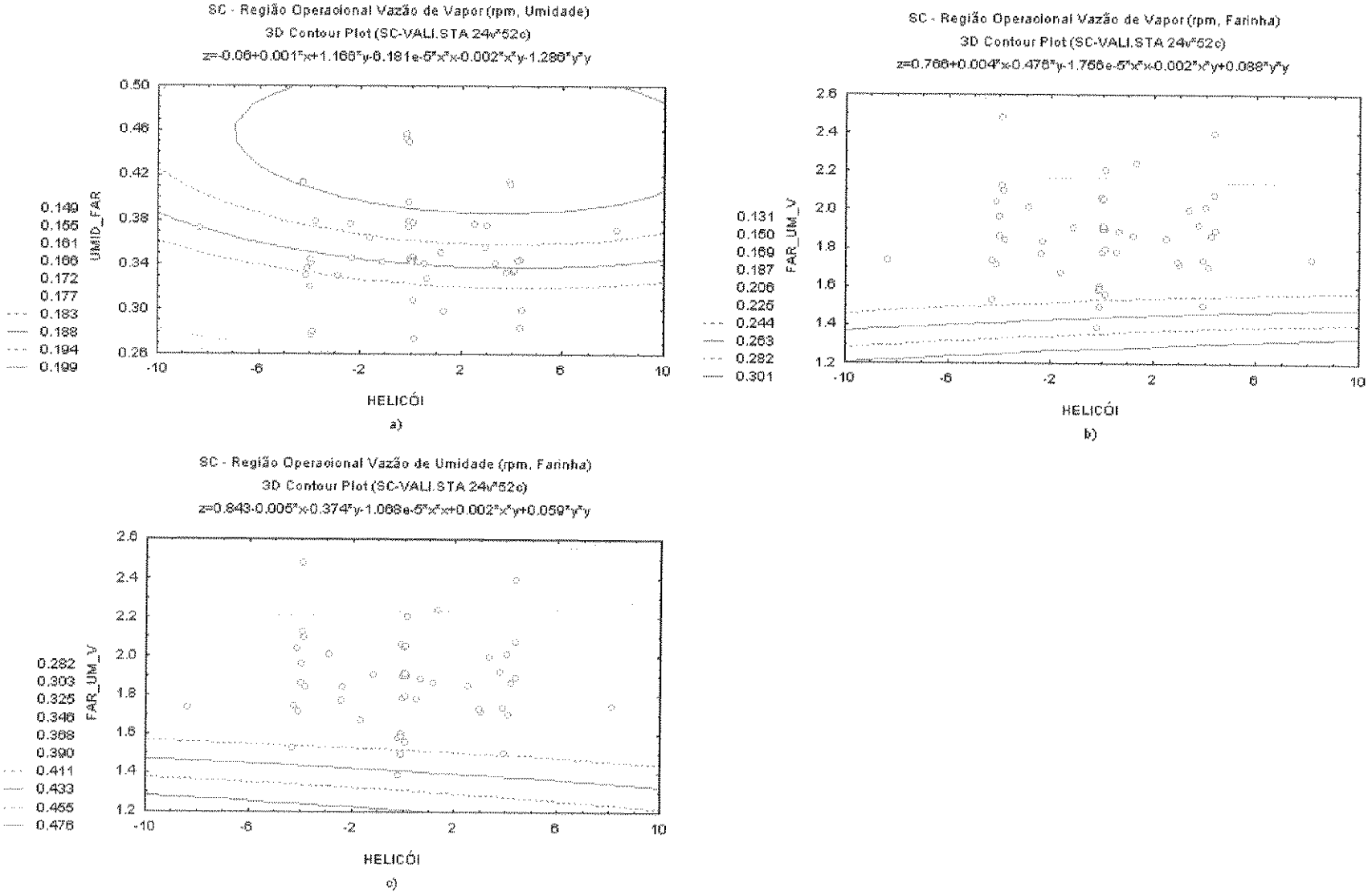


Figura 16: Região Operacional de (a) VM_{21}, VM_{4R} e VM_{U1}; (b) VM_{21}, VM_{4R} e $VM_{1(2U)}$; (c) VM_{U1}, VM_{4R} e $VM_{1(2U)}$ para a Receita SC.

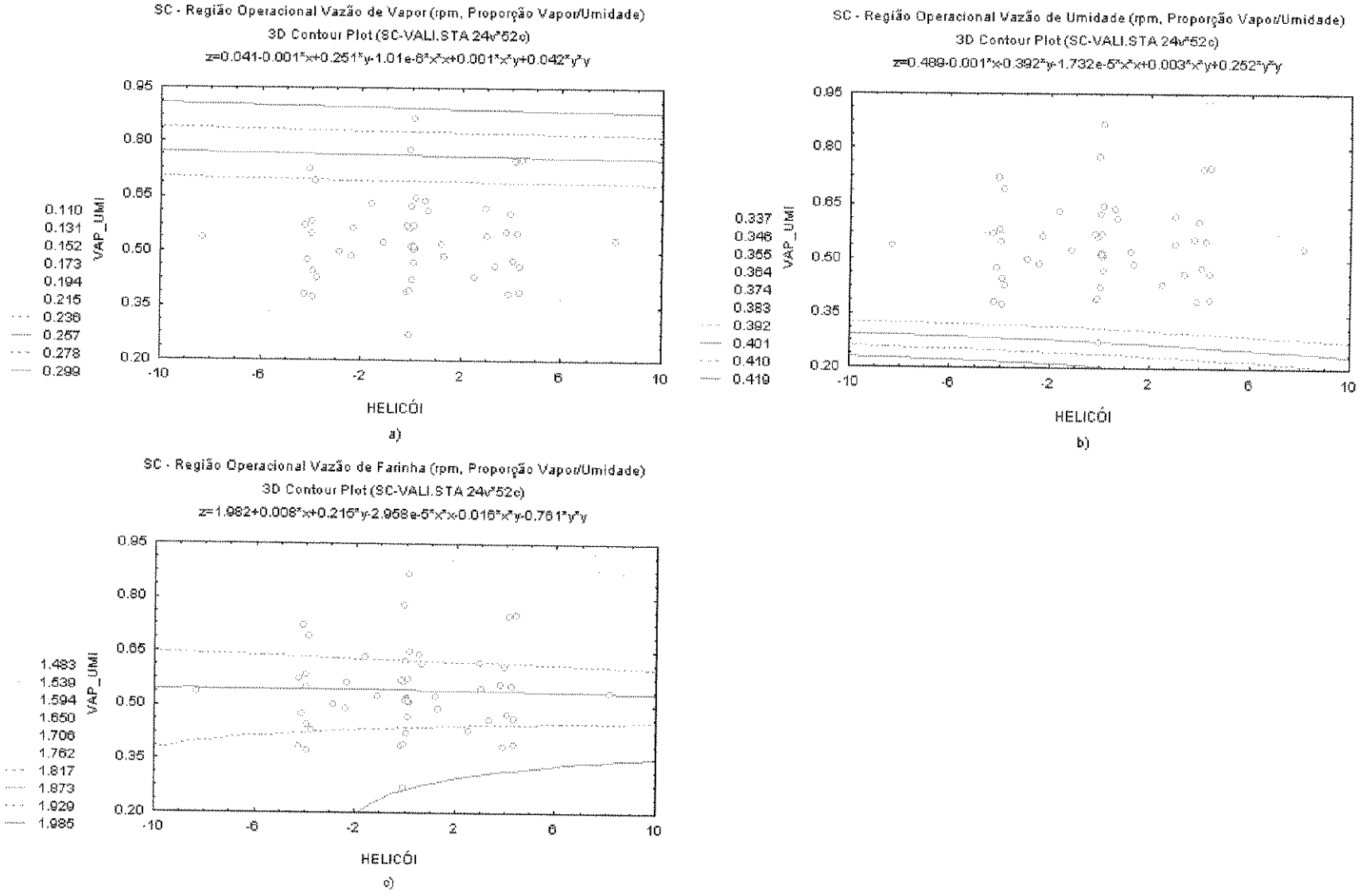


Figura 17: Região Operacional de (a) VM_{21}, VM_{4R} e VM_{2U}; (b) VM_{U1}, VM_{4R} e VM_{2U},; (c) $VM_{1(2U)}$, VM_{4R} e VM_{2U} para a Receita SC.

III.1.3) Efeitos Individuais

Embora o processo de extrusão tenha uma estrutura dinâmica na qual todas as variáveis possam ser ajustadas simultaneamente a fim de obter-se um aumento consistente de vazão de produto (mantendo-se a estabilidade do regime permanente do sistema ou ainda simplesmente para estabilizar o mesmo), o estudo das principais influências das variáveis manipulativas individualmente é primordial para desenvolver-se a base para análises conjugadas mais complexas.

Observa-se aqui que a análise dos efeitos individuais e conjugados, e a análise dos efeitos conjugados significativamente serão utilizados na definição para o controle das variáveis de processo na estrutura do controlador adaptativo neural de acordo com dois objetivos principais, respectivamente:

- Definir o sentido para a influência da variável manipulativa para a variável de processo;
- Classificar os efeitos desde o mais importante até o menos importante para a mudança da variável de processo segundo a análise estatística.

III.1.3.1) Influência da Vazão de Vapor

No processo de extrusão, como já foi estudada, a adição de vapor ao pré-condicionador diminui a necessidade de energia total à extrusão no processo de mudança de viscosidade da massa ao longo do extrusor. De acordo com o tamanho do pré-condicionador, o que determina a capacidade do mesmo, a pressão de vapor é acrescida até valores de oito (8) atm, levando-se em consideração a operação à pressão atmosférica, a fim de preservar a qualidade de nutrientes e proteínas. De qualquer forma, espera-se que a adição de vapor contribua fortemente para o aumento da temperatura do produto extrusado úmido e diminua o valor medido da pressão de saída. A vazão de vapor compõe parte da energia térmica total do extrusor, que excetuando as perdas é constituída ainda pela injeção de vapor na extrusora, a camisa de resfriamento e finalmente a conversão do tensor cisalhante em aquecimento, sendo esta última a maior fonte de energia empregada no processo.

A variação da adição de vapor seguiu a mesma tendência nos três ensaios, uma vez que o planejamento experimental foi composto por pequenas variações. Observa-se pelas

tendências nas três receitas da Figura 54 no Anexo IV, que o aumento na vazão de vapor provoca pequeno aumento na temperatura de saída e que o decréscimo provoca a diminuição de temperatura com amplitude similar ao aumento. O efeito na variável pressão de saída é mais pronunciado quando medidos em psi, pela maior sensibilidade dessa escala, entretanto a variação em kgf/cm^2 é comparável a observada nos valores de temperatura medida em graus Celsius. Assim, a variação de pressão é dada em direção oposta a temperatura, isto é, um aumento na vazão de vapor tende a diminuir o valor da pressão e vice-versa para um decréscimo na vazão de vapor.

Uma vez que o aumento de temperatura de saída do produto diminui a sua viscosidade aparente, o sistema então perde em cisalhamento interno, o que induz a redução no valor de pressão, conforme dado pela equação:

$$P_S = \frac{(FR)\mu}{D_c} \qquad \text{(III.1.3.1.1)}$$

onde P_S é a pressão de saída, FR a vazão de farinha a base seca e D_c o valor de condutividade na saída do extrusor.

Caso a perda em cisalhamento seja muito drástica poderá também promover uma reversão para o comportamento da temperatura, visto o tensor cisalhante ser responsável por cerca de 70 % da energia térmica convertida, conforme estudado na revisão bibliográfica. Este efeito é observado na Figura 55.c do Anexo IV para o produto *Wos*. Este último fenômeno é certamente difícil de ser observado somente com a manipulação do vapor e constitui-se numa condição crítica operacional, na qual o produto extrusado não tem energia suficiente para expandir em receitas a base amilácea.

As variações transientes de pressão mostradas na Figura 56 do Anexo IV também introduzem o conceito que temperatura (Figura 55 do Anexo IV) e pressão de saída variam com velocidades distintas, normalmente a segunda apresentando a resposta mais imediata, relacionada ao vetor deslocamento, enquanto a temperatura é dada em função do cisalhamento. Este conceito será avaliado na análise da curva de resposta.

A análise das Figuras 55.b e 56.b no Anexo IV demonstra que o produto *PP* apresenta, para um aumento de vazão de vapor, um aumento no valor de temperatura e redução no valor de pressão de saída, o que pode ser explicado, conforme a descrição acima. O produto *SC* apresentou o mesmo comportamento para temperatura conforme a Figura 55.a no Anexo IV, mas inverso para a pressão de saída, podendo ser explicado por

um súbito aumento na viscosidade do produto no extrusor pela queda no valor de umidade da farinha de alimentação ou excessiva gelatinização do amido. O produto *Wos* apresentou comportamento similar ao produto *PP* para a variação da pressão de saída conforme a Figura 56.c do Anexo IV, mas efeito inverso quanto ao valor de temperatura de saída conforme a Figura 55.c do Anexo IV, provavelmente pela maior quantidade de gordura, o aumento de vapor promoveu um amento de lubrificação no canhão de extrusão, reduzindo a pressão e a temperatura de saída.

Assim a adição de vapor e alta umidade do produto promovem um aumento no valor de viscosidade na alimentação do extrusor pela hidratação do amido, o que pode ser traduzido com um aumento de torque do motor do extrusor. Este aumento de torque irá aumentar inicialmente o valor de pressão e após, diminuir, devido ao aumento de temperatura e conseqüente redução no valor de viscosidade. Quando nessa mesma situação uma variação maior no teor de gordura é adicionado, o efeito em temperatura e pressão de saída são reversos em função do papel lubrificante do teor de lipídios. Por essa avaliação, a adição de vapor é um fator complexo no controle de temperatura e pressão, influenciando no teor de umidade total da massa a ser extrusada.

III.1.3.2) Influência da Vazão de Umidade

A vazão de umidade é provavelmente a mais importante variável no processo de extrusão depois da farinha de alimentação, visto o seu papel decisivo na gelatinização do amido e portanto através das ligações com proteína, amido e gordura; a influência no perfil de viscosidade da massa, em meio à tensão cisalhante aplicada. Devido a esse papel principal no processo, espera-se um comportamento complexo para a variação de umidade influenciando os valores de temperatura e pressão de saída.

Na Figura 57 do Anexo IV é apresentada a importância do conceito normalizado, uma vez que a influência do valor de umidade é tanto pelo teor de umidade na farinha ou / e pela adição de água. Embora os conceitos de água livre e água ligada sejam evidentemente distintos, após o processo de mistura e cozimento no pré-condicionador a umidade pode ser considerada apenas como água ligada, sob a ótica de utilização do extrusor. Embora considere as variações de umidade na vazão de farinha de alimentação, o valor de umidade é influenciado pelo suprimento de vapor ao extrusor, como será visto oportunamente.

A adição de água à massa produz uma redução inicial no valor da viscosidade o que induz a uma redução no valor de pressão de saída , como pode ser observado na Figura 57 do Anexo IV, quando não há variação significativa no suprimento de vapor. A variação de temperatura de saída torna-se bem mais difícil para a obtenção de um perfil, uma vez que, se por um lado a temperatura decresce pela maior adição de água, por outro lado o decréscimo de temperatura irá promover o aumento da viscosidade, o que induz ao aumento do torque do motor e por sua vez o aumento da energia mecânica específica. Essa variação então promove também o aumento da pressão. Segundo Lu et al. (1992), a temperatura decresce com o aumento de umidade, como pode ser observado nos regimes transientes para todas as receitas na Figura 58 do Anexo IV e a pressão, embora inicialmente decresça, passa a crescer novamente por um aumento do torque do motor como na Figura 59.c para a adição de 48 B kg/h de água. Observa-se que o aumento do torque influencia novamente no valor de temperatura, baseado no aumento de *SME*, conforme a equação (III.1.1.1.a) da definição de *SME*; que é observado pela certa instabilidade no comportamento de temperatura na Figura 58 do Anexo IV para todas as receitas. Com esse novo acréscimo da temperatura, o valor da viscosidade tenderá a diminuir e o ciclo se repete.

Portanto a variação isolada de umidade constitui-se num problema de análise dos efeitos de temperatura e pressão, visto o seu comportamento indefinido sob certas condições de processo. A solução proposta nesse trabalho é a associação dessa variável com a variação de vapor.

III.1.3.3) Influência da Vazão de Farinha

A observação da Figura 60 no Anexo IV que representa os efeitos totais do teste piloto indica que a variação da vazão de farinha a base seca apresenta um efeito inverso para a variação de temperatura e direto para a variação de pressão de saída para quando são mantidos aproximadamente constantes à variação de água e vapor. Entretanto, para alguns pontos esse efeito fica de difícil observação devido à variação já discutida no teor de umidade e vapor. Essa observação justifica a importância da definição de farinha a base seca, visto a variação intrínseca do valor de umidade na farinha de alimentação. Assim o efeito em relação a variável alimentação não fica mascarado por variações em outras variáveis como vazão de umidade.

Segundo a equação (III.1.3.1.1), um aumento na vazão de alimentação de farinha provoca um aumento no valor da pressão pela simples razão que o extrusor passa a operar com uma maior quantidade mássica, aumentando a pressão interna. Evidentemente, a maior vazão no extrusor diminui o valor da energia específica mecânica, embora inicialmente haja um aumento de torque, a fim de compensar o aumento de vazão.

A variação de temperatura no regime transiente, observada na Figura 61 do Anexo IV, identifica uma resposta contrária à descrita para o aumento de vazão de farinha observada na Figura 60, uma vez que é observado o aumento da temperatura, que pode ser explicado pelo aumento de farinha sem o aumento proporcional de água e vapor, correspondendo a um sistema com menos vapor e menos água, ou seja, menos gelatinizado, o que determinou o aumento de cisalhamento e o conseqüente aumento de temperatura. A redução no valor de vazão de alimentação provocou um leve aumento no valor de temperatura de saída, pelo leve aumento proporcional de água e vapor e os efeitos com relação à umidade de redução de viscosidade e com relação ao vapor de aumento de viscosidade. Por outro lado, o efeito inverso para a temperatura é basicamente explicado pela redução da viscosidade da massa, o implica em redução no valor de temperatura de saída.

A variação de pressão, conforme a Figura 62 do Anexo IV, tem efeito direto para a variação de farinha, sendo facilmente explicado pelo aumento do grau de empacotamento do extrusor no aumento de vazão e razão inversa no decréscimo de vazão de farinha.

De acordo com a previsão na mudança de viscosidade, o valor de temperatura deveria apresentar para todos os casos uma relação inversa com a temperatura de saída, baseado na redução da viscosidade

III.1.3.4) Influência da Proporção Vapor / Umidade

Pelo discutido na seção referente à influência exercida pela umidade na temperatura e pressão de saída, um aumento de umidade, embora provoque decréscimo de pressão e temperatura pela redução no valor de viscosidade da massa, pode produzir o efeito contrário pelo aumento do torque do motor baseado no fato que a menor temperatura promove o aumento de viscosidade.

Assim, a adição conjugada de vapor e umidade parece ser uma solução simples sob o ponto de vista de controle e embora complexa sob a ótica termodinâmica do equilíbrio líquido-vapor gerado no extrusor, produz uma tendência mais uniforme. Isto é, um aumento da vazão de vapor e de água tenderá a um aumento de pressão, uma vez que a adição de vapor ajuda a manter a redução de viscosidade dada pela adição de água. Por outro lado esse efeito redutor de viscosidade é impulsionado pela maior temperatura a massa, o que adiciona o efeito do aumento do torque pela maior teor de água. Assim a adição de vapor e água tende a aumentar o valor de temperatura e diminuir a pressão.

Entretanto, conforme observada na Figura 63 no Anexo IV, a influência na proporção entre a vazão de vapor e água irá determinar ajustes mais precisos para esses efeitos. Verifica-se que maiores valores da proporção de vapor e umidade aproximam os resultados para um aumento da vazão de vapor, enquanto baixos valores atribuem a incerteza da manipulação da umidade isoladamente.

III.1.3.5) Influência da Rotação do Helicóide

Este fenômeno pode ser explicado através da equação (III.1.3.5.1), que também foi utilizada por Lu et al. (1992), onde é representado a variação de viscosidade aparente μ_a para uma massa com comportamento pseudoplástico, dada pelo quociente entre o tensor de cisalhamento γ e a viscosidade μ.

$$\mu_a = \frac{\mu}{\gamma} = m\gamma^{n-1} \qquad \text{(III.1.3.5.1)}$$

Como um aumento de rotação do helicóide aumenta o valor do tensor de cisalhamento no extrusor, em conseqüência é reduzido o valor da viscosidade aparente μ_a. Paralelamente é promovido um decréscimo da viscosidade na equação (III.1.3.1.1) assegurando uma redução no valor da pressão de saída observada. Esse efeito pode ser observado na Figura 64 do Anexo IV para os pontos onde as vazões de farinha e de umidade, principalmente, são mantidas constantes. O aumento de temperatura pode ser explicado por um aumento líquido no valor da energia mecânica específica, uma vez que embora ocorra uma diminuição no valor de torque, essa redução é proporcionalmente menor que o aumento na rotação do eixo, garantindo um aumento para a *SME*. Reduções

nos valores de rotação de eixo provocam resultados inversos aos descritos acima para pressão e temperatura de saída.

Um acréscimo inicial no valor de pressão de saída foi observado no ensaio realizado por Lu et al. (1992), explicado pelo aumento súbito na taxa de alimentação para variações significativas na rotação do eixo. A fim de evitar este problema de efeito inverso, esse trabalho produziu variações mais suaves na rotação do helicóide. É também um procedimento fortemente incentivado para controladores que usem a velocidade de rotação de eixo como variável manipulativa.

Para a correta avaliação dos efeitos na rotação do helicóide é necessário a manutenção da vazão de alimentação de farinha a valores constantes, visto a variação de vazão associar diferente grau de empacotamento ao longo dos elos do helicóide. Por outro lado, pode ser um importante argumento de controle nas perturbações conjugadas.

III.1.3.6) Variações nas Características Químicas da Matéria – Prima

A Figura 65 no Anexo IV mostra a variação observada para o teor de umidade, proteína, gordura e carboidratos nas três receitas empregadas no teste piloto.

O teor de carboidratos é responsável pela maior ou menor hidratação da pasta a ser extrusada, em função da proporção entre amilose e amilopectina, a primeira, sendo responsável por produtos mais rígidos e a segunda por produtos mais elásticos. De qualquer forma, a principal contribuição do teor de carboidratos é a definição do perfil de viscosidade da massa no extrusor.

O teor de proteínas além de ser uma exigência nutricional para atender valores de palatabilidade estipulados pela indústria, contribui estruturalmente para o produto extrusado, através de propriedades como absorção, elasticidade e aderência, dada pelas proteínas de origem vegetal. Por outro lado proteínas de origem animal quase não contribuem para a estrutura de produtos extrusados, porque elas normalmente não expandem e não se combinam facilmente com a água e amidos como as proteínas vegetais.

O teor de lipídios contribui com plasticidade para o produto extrusado e lubrificação para o extrusor. Entretanto a valores superiores a 8% apresentam contribuição inversa para a expansão do extrusado, que é mais acentuada quando o material lipídico é adicionado de

forma pura. Esse efeito de gordura foi observado principalmente na receita *Wos*, conforme será discutido na avaliação dos efeitos conjugados.

O teor de cinzas relativamente alto é necessário devido às necessidades nutricionais, mas sob o ponto de vista químico gera uma série de complexos metálicos intermediários que diminuem o índice de expansão para o produto final. Evidentemente uma análise mais rigorosa deveria classificar as possíveis bivalências de ligação para os metais de maior ocorrência, segundo a receita empregada, o que certamente foge do escopo dessa análise.

O teor de fibras, embora considerado no grupo de carboidratos, também não está inserido no escopo desse trabalho, merece especial atenção, uma vez que as fibras têm propriedades de fluidez muito distintas dos materiais estudados, e certamente determinam diferentes perfis de análise para a influência das variáveis manipulativas associadas nesse ensaio experimental.

Finalmente, a normalização proposta nesse trabalho garante que um aumento da variável normalizada reflete um aumento real naquela variável. Do estudo visto acima, um aumento de umidade significa um aumento conjugado na umidade da farinha de alimentação e/ou da vazão de água, mantida a vazão de alimentação de farinha e a vazão de vapor a valores constantes. O mesmo raciocínio é empregado para as demais variáveis, sendo analisado somente o seu efeito para os valores de temperatura e pressão de saída.

Os efeitos isolados são resumidos de forma qualitativa para o processo de extrusão com as variáveis normalizadas conforme o Quadro 11, baseado na observação experimental, abaixo:

Quadro 11: Resumo dos Principais Efeitos Isolados para as Variáveis Manipulativas.

	Características do Efeito	
Variável	TEMPERATURA	PRESSÃO
Vazão de Vapor	Direto e mais pronunciado para o aumento da vazão de vapor.	Inverso e instável dependendo do teor de gordura e umidade da farinha.
Vazão Água	Inverso com presença de picos e vales (instável).	Inverso com possibilidade de inversão do sentido.
Vazão de Farinha	Direto com boa resposta e pouco pronunciado para a redução na vazão de farinha.	Direto para pressão com bom comportamento.
Prop. Vapor/Umidade	Correta proporção para gelatinização afeta muito pouco a temperatura. Sistema tende a resposta direta com excesso de vapor e inversa com excesso de água.	Inverso, apresentando aumento de ruído para excesso de um ou de outro, baseado no sub ou super cozimento da matéria-prima.
Rotação do Helicóide	Direto	Inverso
Matéria – Prima*	Sem avaliação experimental	Sem avaliação experimental

* Efeitos Relativos à distribuição granulométrica da farinha de alimentação não foram considerados neste trabalho, embora representem grande influência no comportamento do sistema.

A análise genérica dos efeitos individuais para o regime transiente identifica a instabilidade de resposta durante a transformação tanto para temperatura quanto para pressão de saída. Observa-se que a constância da curva resposta embora possa ser identificada, apresenta três pontos bastante críticos para a aplicação de técnicas de controle convencionais:

- Picos ou vales na variável de resposta, o que pode ser entendido como uma tendência momentânea, mas que infere alto grau de ruído para o controlador;

➢ Instabilidade para a obtenção do regime estacionário o que exige uma constante ação do controle e ajuste adequado da banda de controle para o sistema;

➢ Reversão do sentido do efeito dependendo da receita empregada, o que identifica a natureza característica de variabilidade relativa à extrusão de produtos de natureza alimentícia. Este é também o principal problema para a aplicação do controlador.

III.1.4) Efeitos Múltiplos

A análise conjugada de mais de uma variável manipulativa no processo de extrusão representa a realidade encontrada nos extrusores industriais sob o ponto de vista operacional. Nas próximas seções serão discutidos os diferentes pares de variáveis manipulativas quanto à influência sob temperatura e pressão de saída do extrusor. Como o objetivo básico dessa seção é a interpretação das tendências qualitativas da influência das variáveis manipulativas para as duas variáveis de processo em questão, serão apenas mostradas as curvas com o ajuste linear para as diferentes combinações. O resultado dessas tendências é extremamente importante para a definição do projeto do controlador, uma vez que é necessário definir a natureza direta ou inversa dos efeitos usados para controlar a temperatura e pressão de saída..

Os resultados foram obtidos pelo planejamento fatorial central completo com dois (2) níveis e quatro (4) variáveis independentes, conforme os níveis do Quadro 6, com os respectivos ensaios para cada receita mostrados nos Quadros 21, 23 e 25 no Anexo II. A dependência das variáveis de processo é analisada em conjunto para as três (3) receitas.

III.1.4.1) Vazão de Vapor e de Umidade

As superficies respostas nas Figuras 18 e 19, mostram a influência conjugada das vazões de vapor e umidade, que pode ser entendida como a influência da adição de energia para promover a pré-gelatinização do amido presente na matéria – prima e ou a constituição polimérica das proteínas de origem vegetal empregadas na farinha de alimentação. Esse efeito promove o inchamento do grânulo de amido, resultando num aumento de viscosidade

ao longo da alimentação do extrusor. Isoladamente, conforme discutido, a ação de vapor tem relação direta para a temperatura e inversa para a pressão de saída, embora os resultados experimentais tenham mostrado certas variações dessas tendências, conforme já foi abordado. Por outro lado, a vazão de umidade apresenta efeito inverso para a variação de temperatura e inverso para a variação de pressão de saída, se for observado que o valor em regime permanente final de pressão de saída é menor que o observado antes de ser efetuada a mudança na adição de água. Assim espera-se que a adição de vapor e umidade conjugados apresentará um efeito inverso para pressão e variável para a temperatura de saída, dependendo da proporção de vapor e de umidade adicionada, conforme será discutido na seção seguinte (III.1.4.2).

A análise da Figura 18.b e Figura 18.c demonstra que, para as receitas *PP* e *Wos*, a variação da vazão de vapor e umidade tem efeito inverso para a variação de temperatura, assumindo que em condições normais de operação, a variação de umidade é determinante para a alteração de temperatura. O efeito observado no gráfico que representa a receita *SC* na Figura 18.a é um efeito somatório do maior teor de carboidratos e da maior vazão de vapor, o que contribui para um aumento desproporcional de viscosidade na entrada do extrusor e portanto um aumento de temperatura.

A análise da Figura 19 avalia a influência conjugada da vazão de vapor e umidade para a pressão de saída, a qual tem comportamento inverso para a variação da vazão vapor / umidade , suportado pelos efeitos inversos dessas duas variáveis isoladamente.

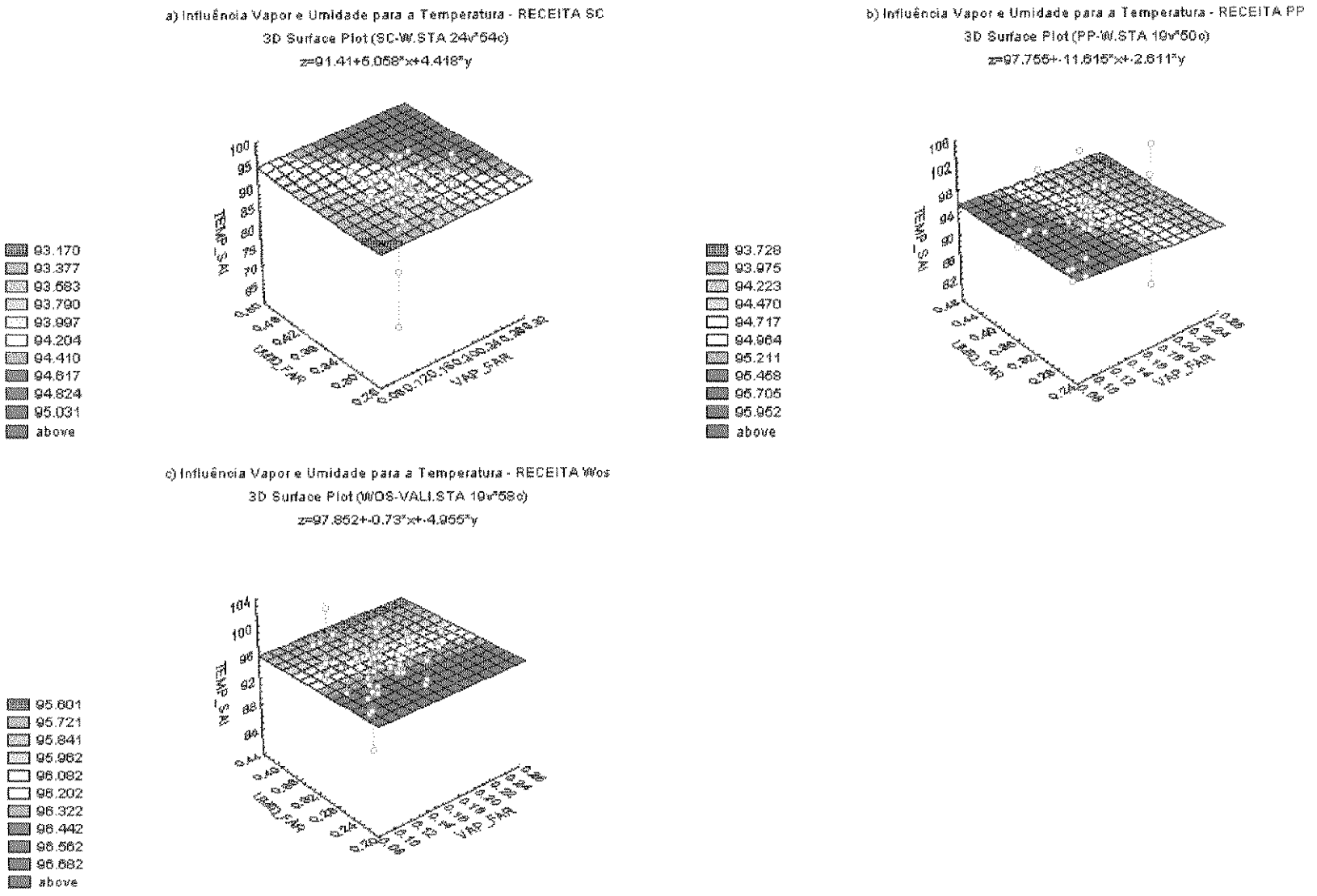


Figura 18: Influência da Vazão de Vapor e Umidade para a Temperatura (^{0}C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

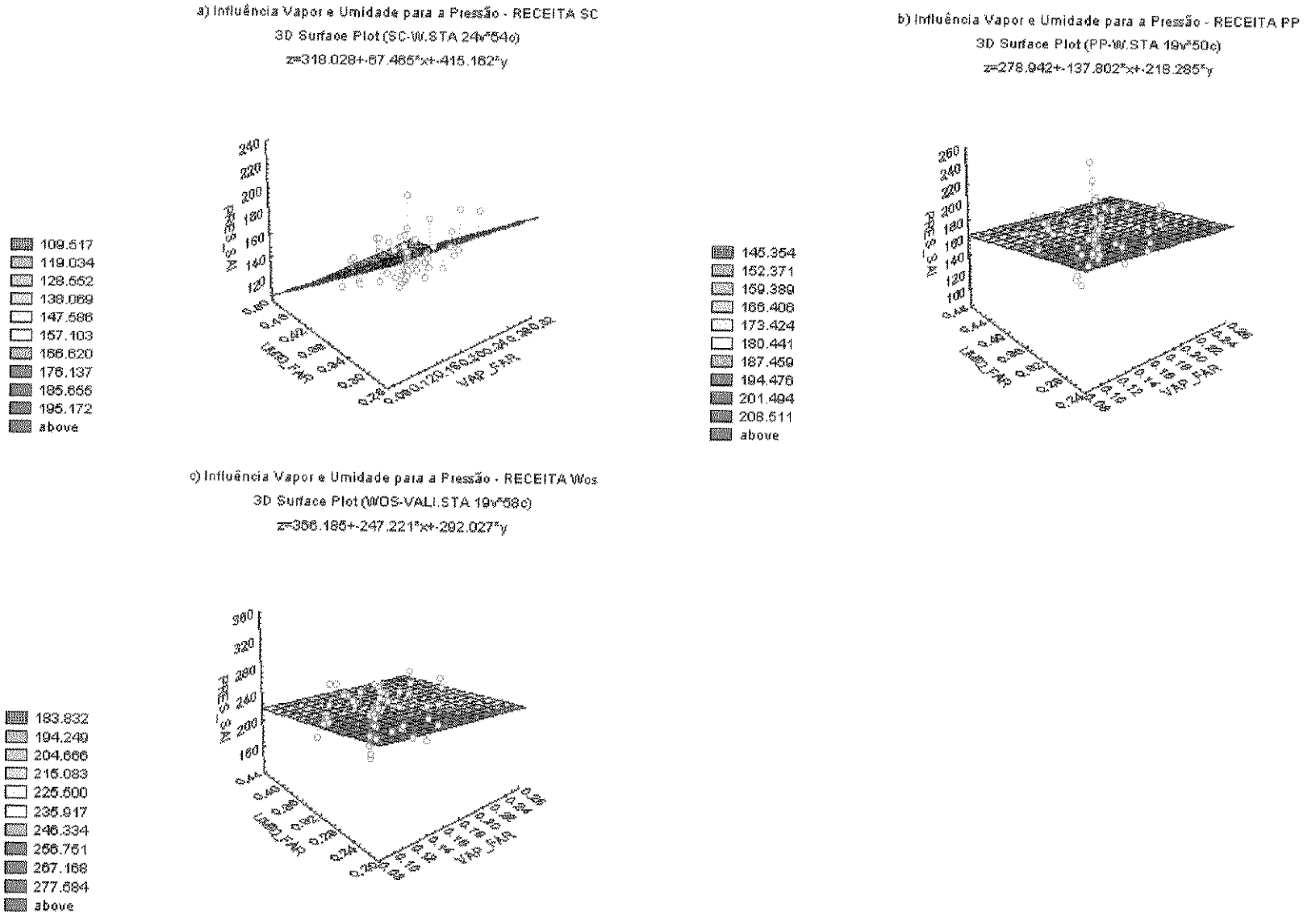


Figura 19: Influência da Vazão de Vapor e Umidade para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

III.1.4.2) Vazões de Vapor e Proporção Vapor / Umidade

A variação da proporção de vapor / umidade, conforme já discutido, pode alterar sensivelmente o comportamento da temperatura de saída do extrusor, quando associado com outras condições da matéria prima, como foi visto na análise da receita *SC* na Figura 18.a. Observa-se na Figura 20 a variação da temperatura de saída baseada no efeito conjugado entre vapor e umidade. O efeito observado para a receita *SC* na Figura 20.a está baseado nas mesmas observações já feitas para a variação de temperatura quando na adição de umidade e vapor. De qualquer forma, o efeito pode ser generalizado para uma contribuição direta para a temperatura de saída com a variação de vapor em proporção ao teor de água na receita e direta para a variação de pressão de saída observada. Observa-se aqui que a variação de pressão é direta, porque uma vez aumentado o teor de vapor na proporção vapor / água, ocorre uma redução da umidade associada à vazão de umidade, conforme a Figura 21, o que certamente irá promover um aumento do cisalhamento interno da massa e conseqüentemente o valor da pressão. Este efeito é observado em uma linha paralela a ordenada na Figura 21, que mantém a mesma vazão de vapor. Quando a vazão de vapor é sobreposta a de água (uma linha paralela à abscissa na Figura 21) o efeito é similar a um aumento puro de vapor, decrescendo o valor de pressão.

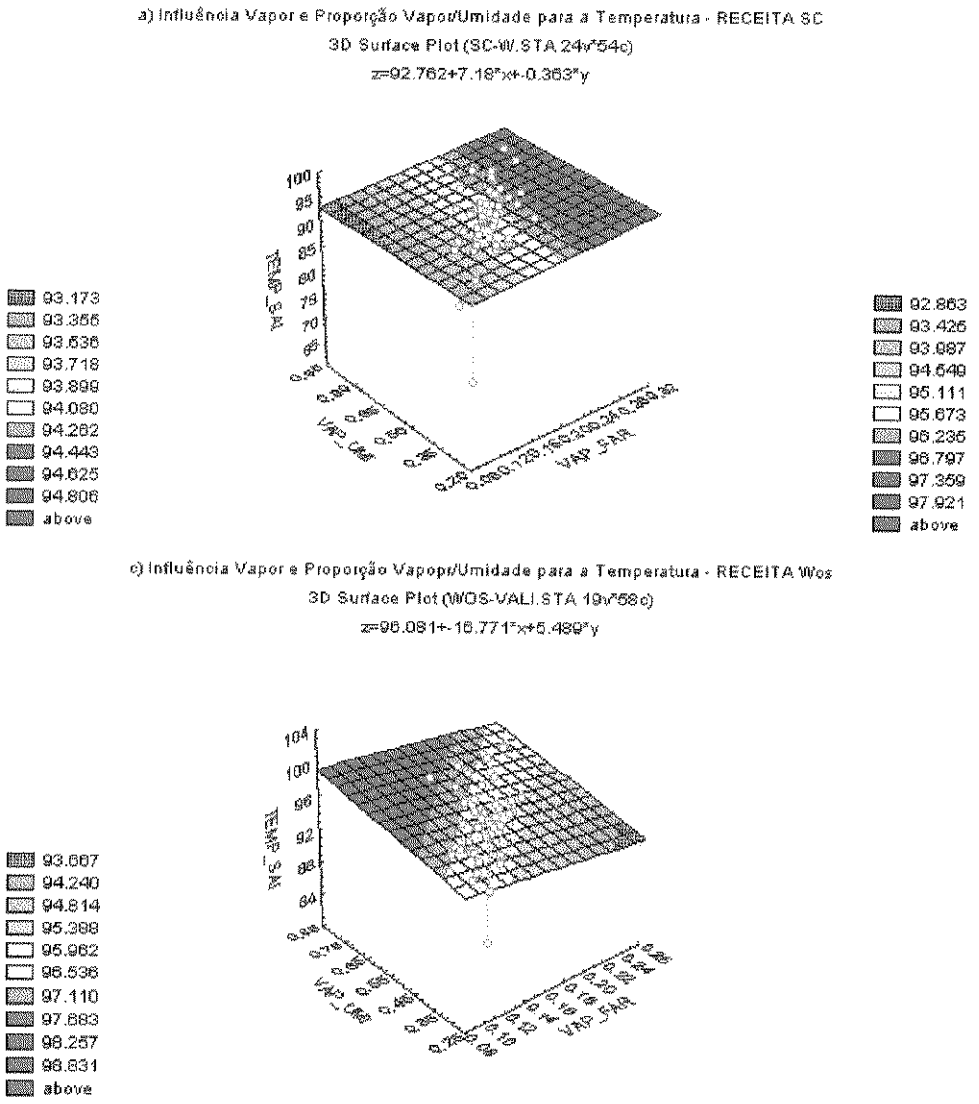


Figura 20: Influência da Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Temperatura (^{0}C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

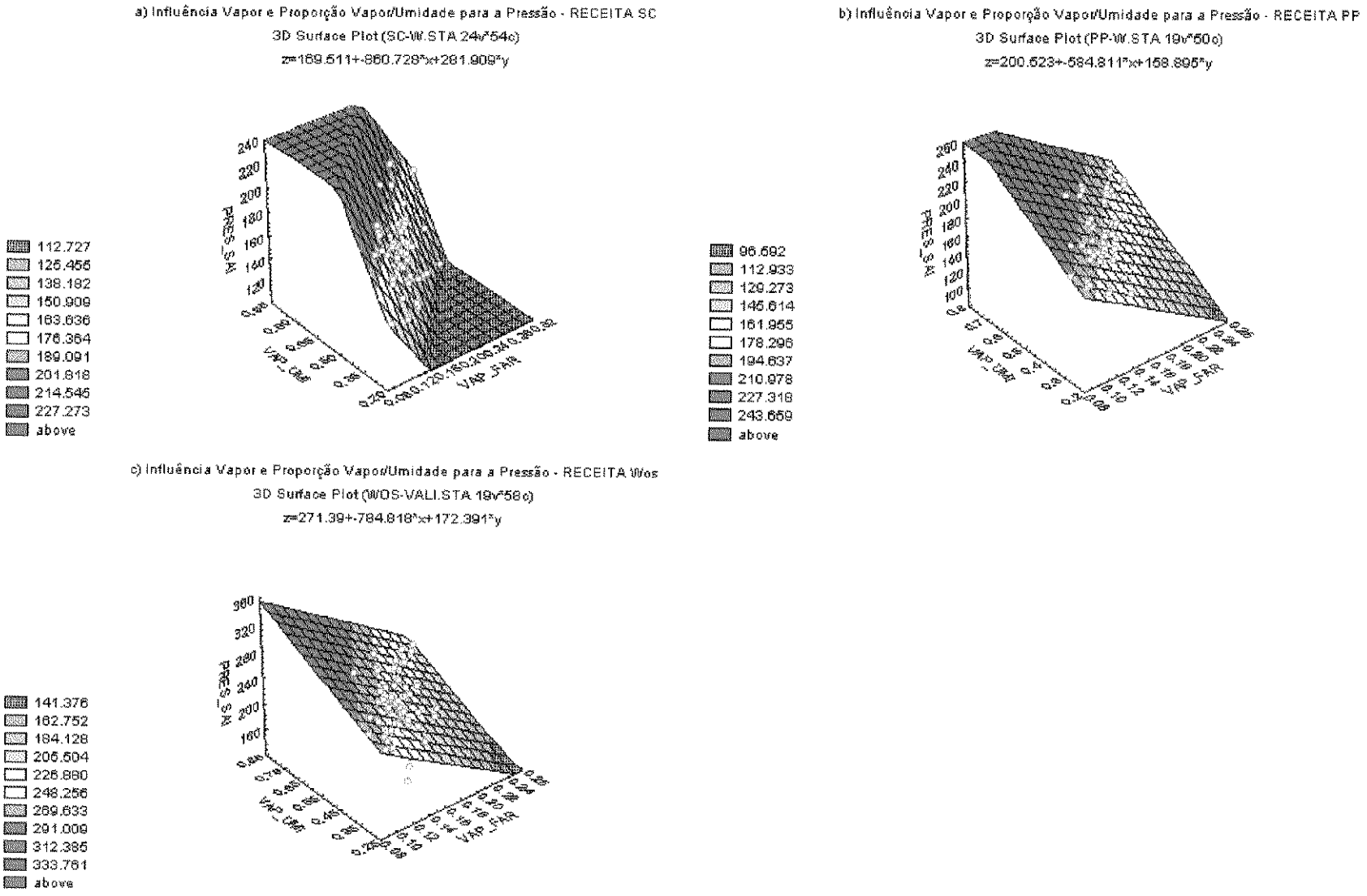


Figura 21: Influência da Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

III.1.4.3) Vazões de Vapor e Farinha

A observação da Figura 22.a e Figura 22.b demonstra que a variação da vazão de vapor e de farinha é inversamente proporcional a variação de temperatura de saída para as receitas *SC* e *PP*. Esse efeito é alcançado pela queda na viscosidade quando no aumento de farinha, desde que haja umidade suficiente para promover as mudanças de viscosidade esperadas. Quando a farinha tiver baixa umidade pode-se observar o efeito inverso como para a receita *Wos* na Figura 22.c. Pode ser gerado um aumento na tensão interna do extrusor, mesmo que a adição de vapor proporcione a maior gelatinização.

Na Figura 23 observa-se que o efeito na pressão de saída é direto para o aumento da vazão de vapor e de farinha, provavelmente comandado pelo aumento da vazão de farinha, a qual aumenta a pressão em função do maior grau de enchimento do extrusor.

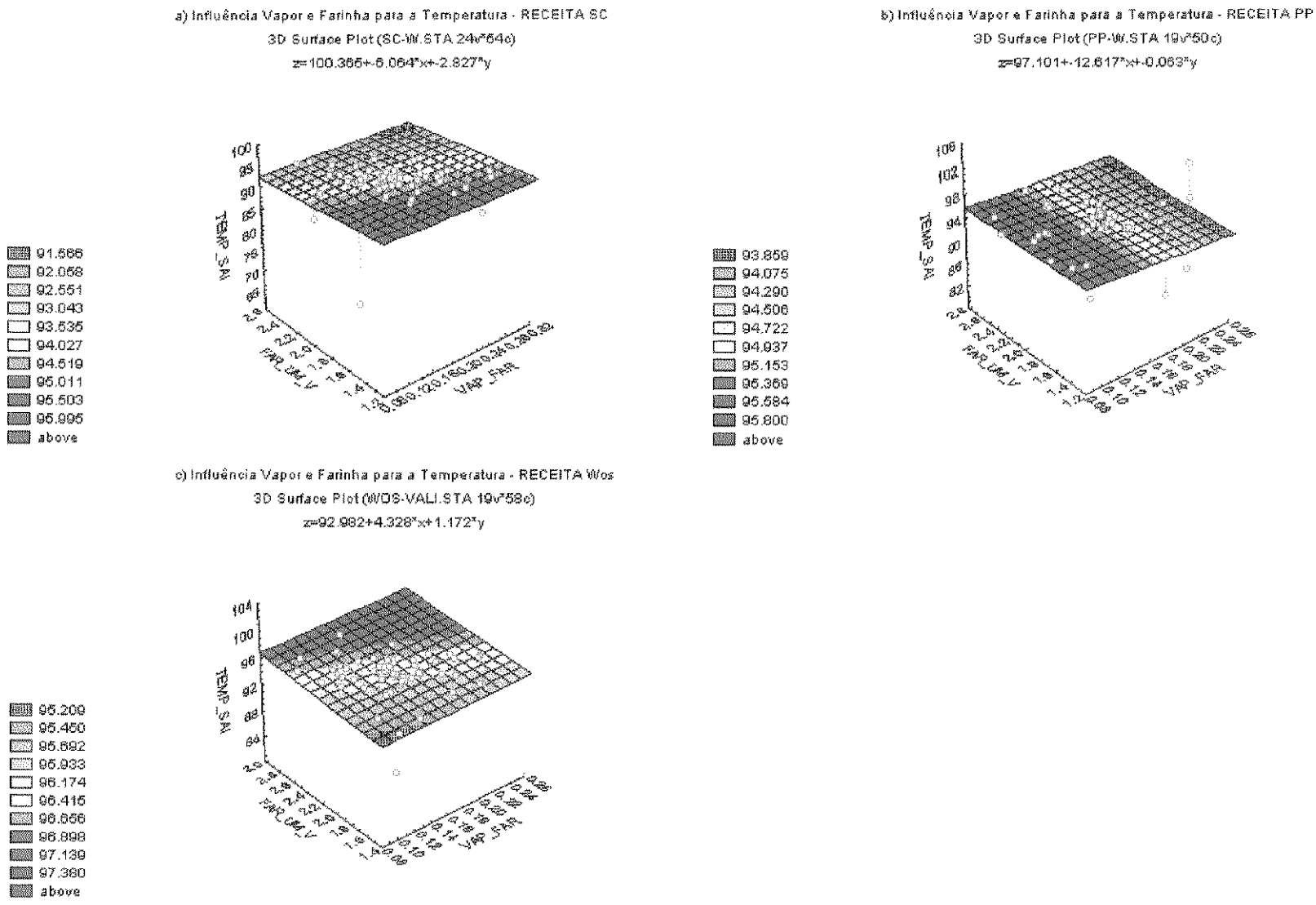


Figura 22: Influência da Vazão de Vapor e Farinha para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

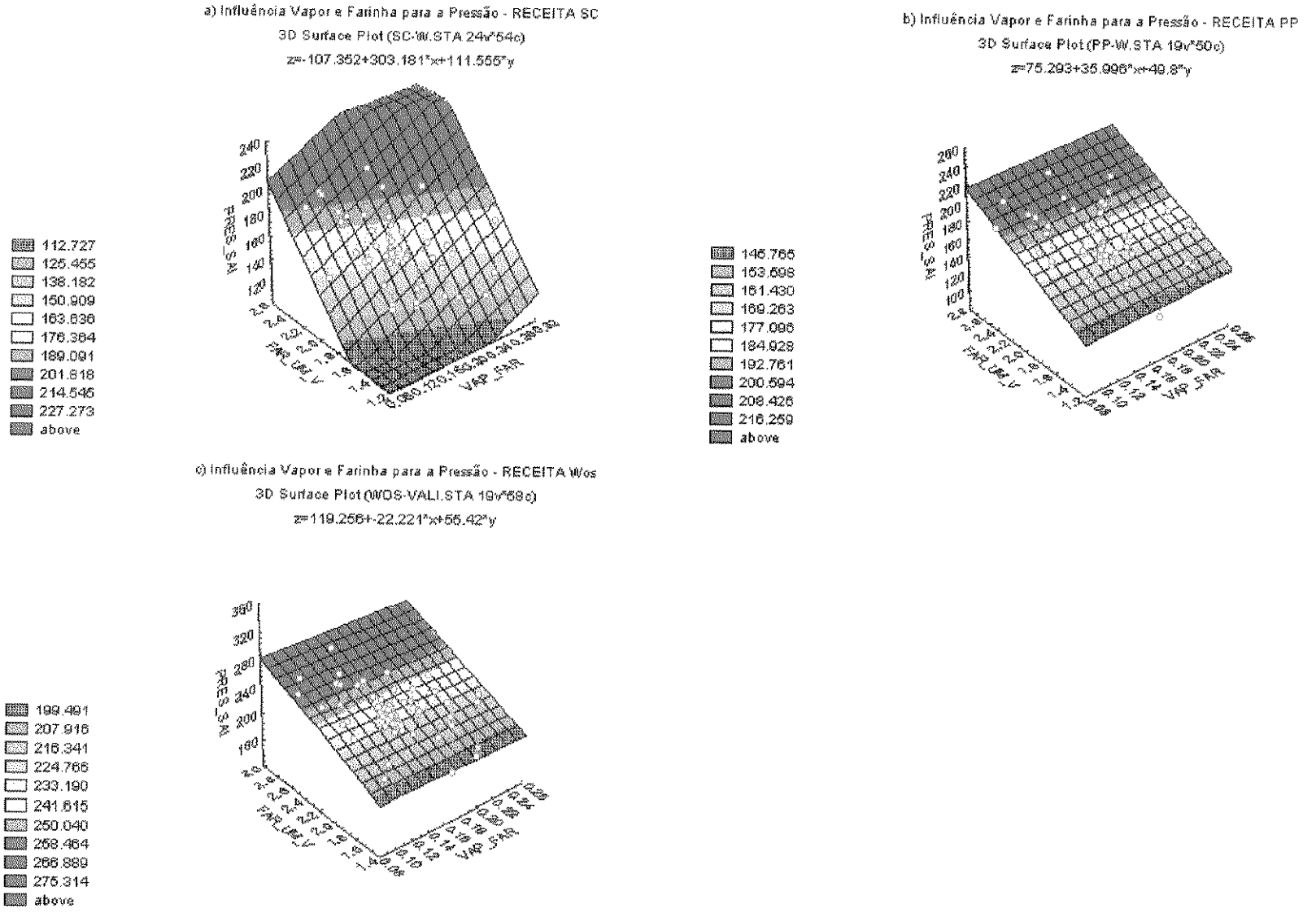


Figura 23: Influência da Vazão de Vapor e Farinha para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

III.1.4.4) Vazão de Farinha e Umidade

A variação da vazão de farinha e umidade tem efeito levemente inverso para a temperatura de saída, conforme a Figura 24 e também pouco pronunciado direto para a pressão, conforme a Figura 25. Esse efeito pode ser explicado porque o aumento de umidade diminui a temperatura de saída, mas o aumento de farinha base seca tem efeito contrário. Já o efeito levemente direto para pressão é novamente produto do aumento de pressão provocado pelo aumento da farinha e redução de pressão de saída, provocado pelo aumento de umidade. Os efeitos de redução de vazão de umidade e de farinha são igualmente observados.

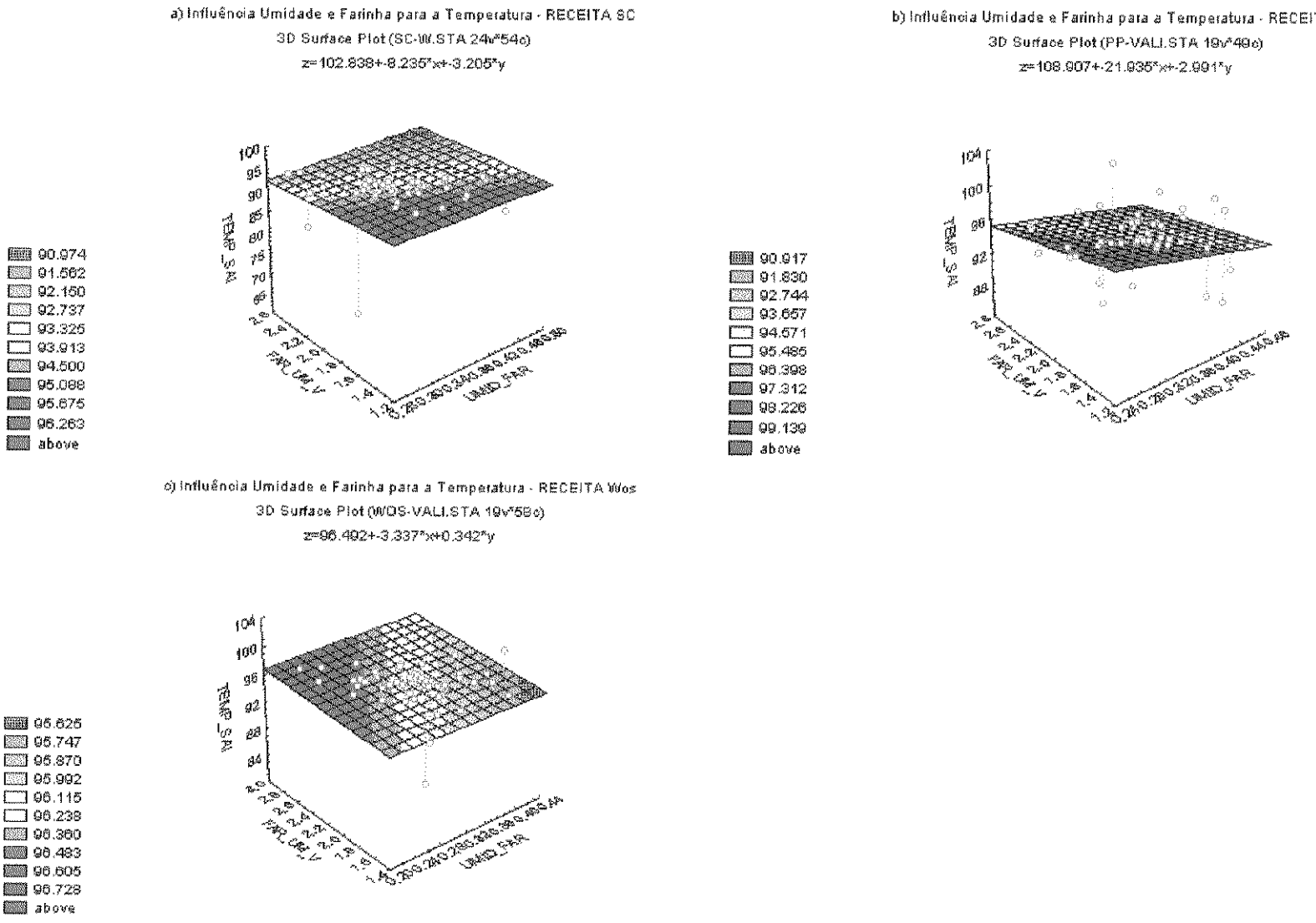


Figura 24: Influência da Vazão de Umidade e Farinha para a Temperatura (^{0}C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

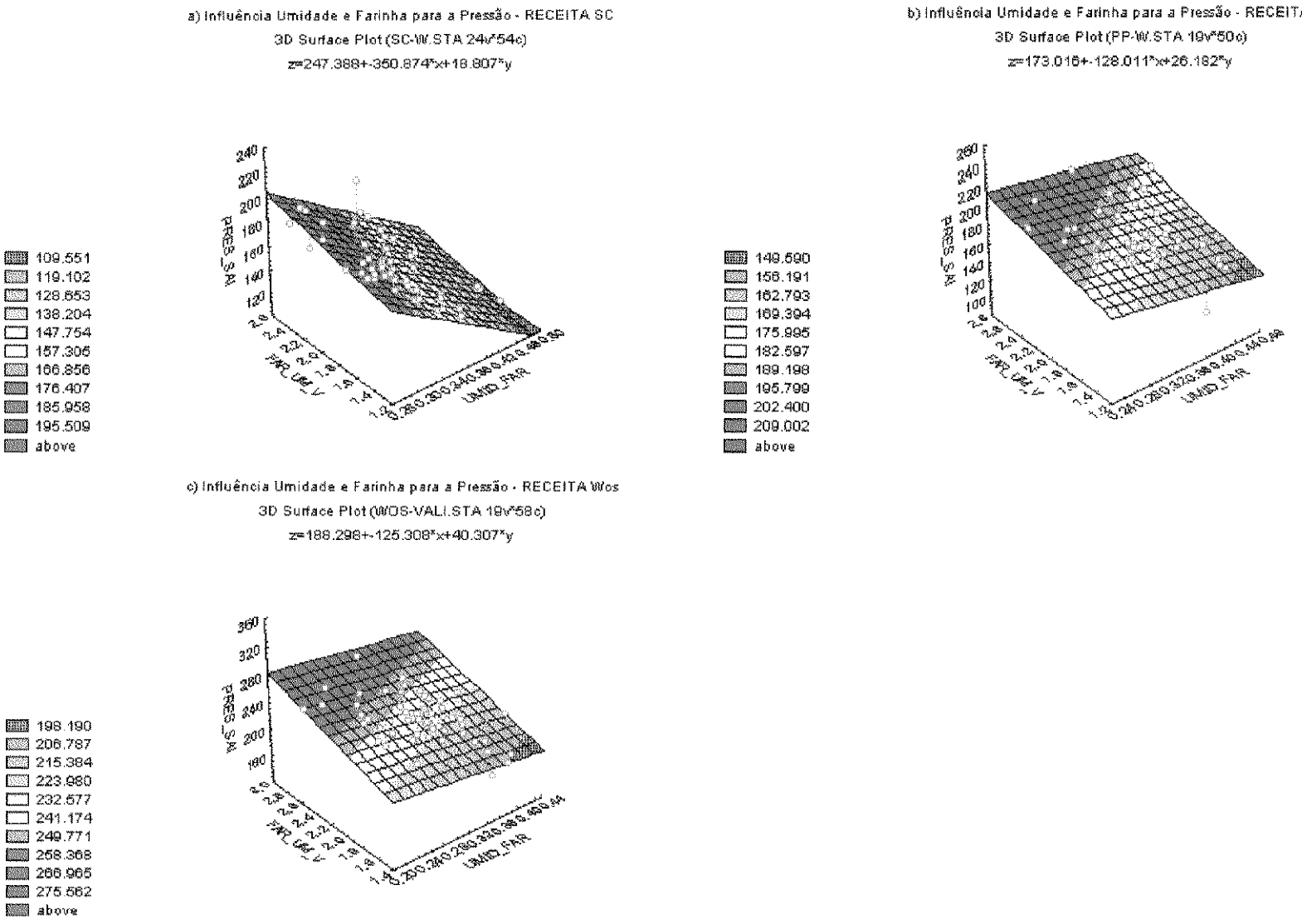


Figura 25: Influência da Vazão de Umidade e Farinha para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

III.1.4.5) Efeitos da Rotação do Eixo (Helicóide) do Extrusor (rpm)

Os efeitos da rotação da extrusora (rpm) e vazão de vapor, têm resposta direta para a temperatura de saída , conforme a Figura 26 e inversa para a pressão de saída , conforme a Figura 27. Basicamente porque o aumento da rotação do helicóide aumenta a energia mecânica específica e este aumento de temperatura reduz a viscosidade, o que diminui a pressão observada.

A variação de rpm e umidade, conforme a Figura 28 é direta para temperatura e, segundo a Figura 29, inversa para a pressão. Neste caso o aumento da rotação do helicóide tem uma contribuição superior para o aumento de energia mecânica específica do que a possível redução paralela de viscosidade dada pela adição de umidade.

Finalmente, o aumento da rotação do helicóide aumenta o valor de energia mecânica específica, mas o aumento da vazão de farinha diminui o valor desta variável. Assim, certamente espera-se um aumento de temperatura de saída pela influência direta dos dois efeitos isolados, conforme a Figura 30. Para a pressão de saída a relação de efeito do maior enchimento do extrusor é superior a redução de pressão dada pelo aumento de velocidade do helicóide, conforme mostrado na Figura 31.

Associado ao aumento da rotação do helicóide, é diminuído o tempo de residência do produto no extrusor e para adições de vapor na camisa do extrusor o calor transferido por convecção é reduzido, o que em algumas situações pode reduzir a taxa de aumento de temperatura de saída.

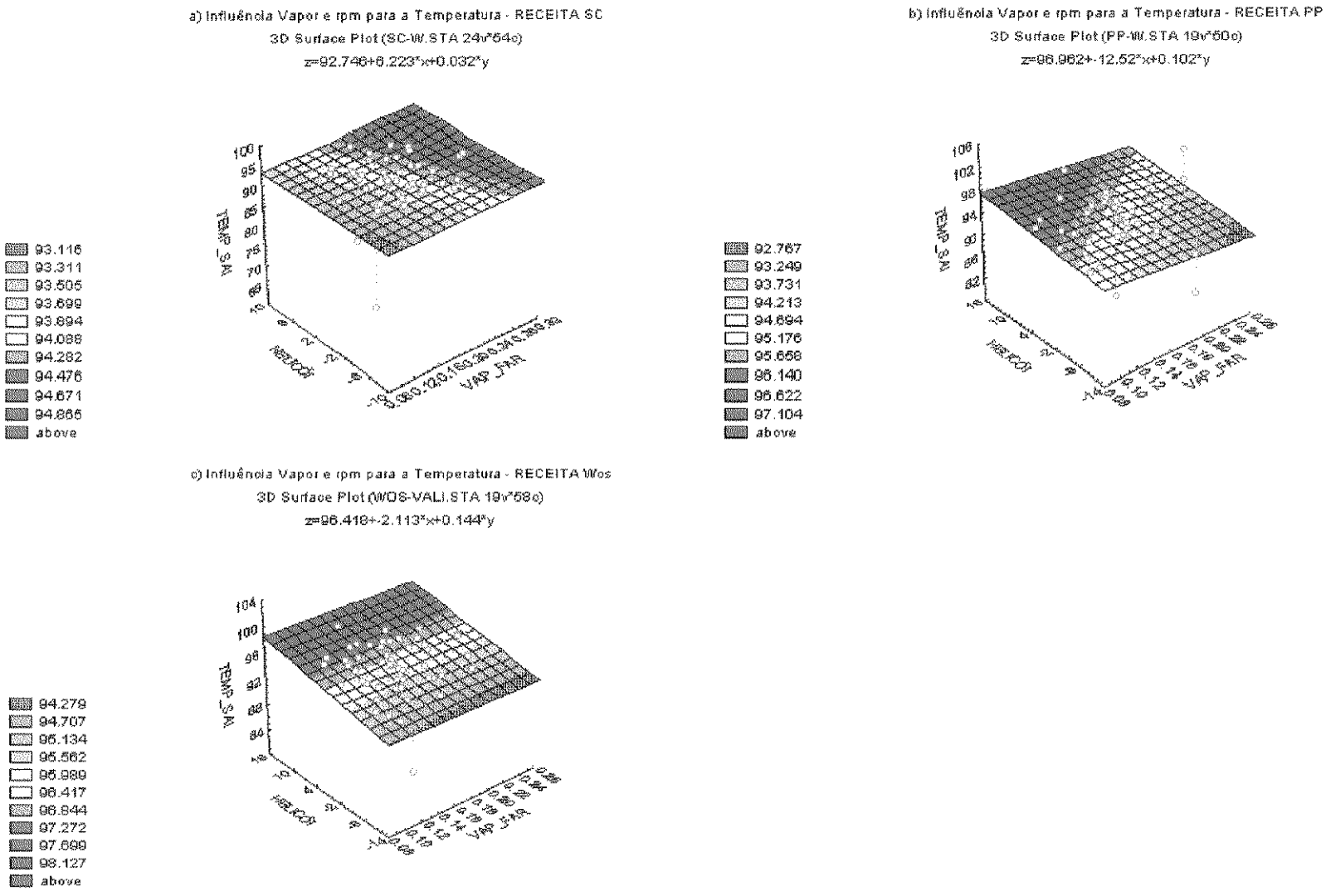


Figura 26: Influência da Vazão de Vapor em e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^{0}C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

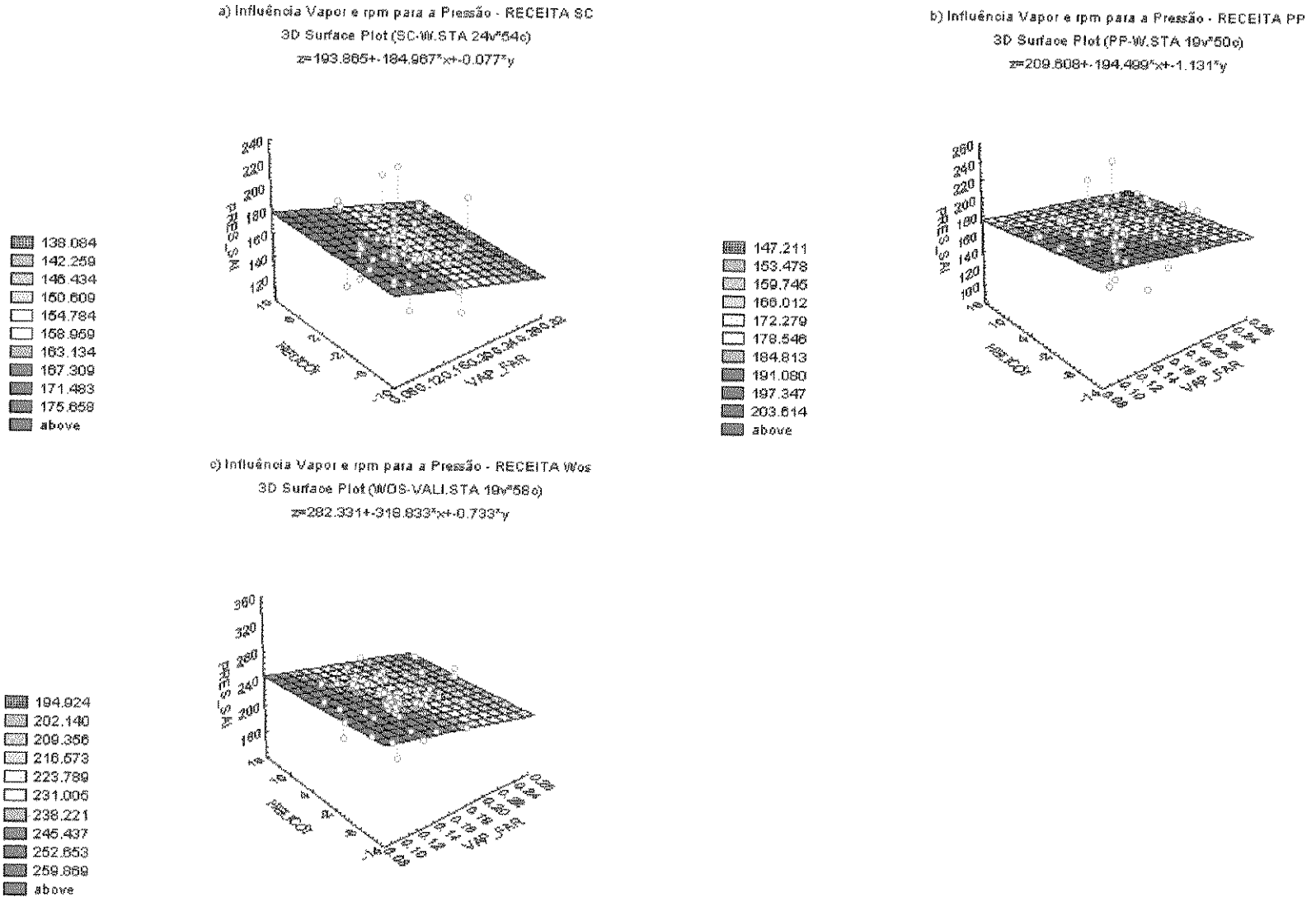


Figura 27: Influência da Vazão de Vapor e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

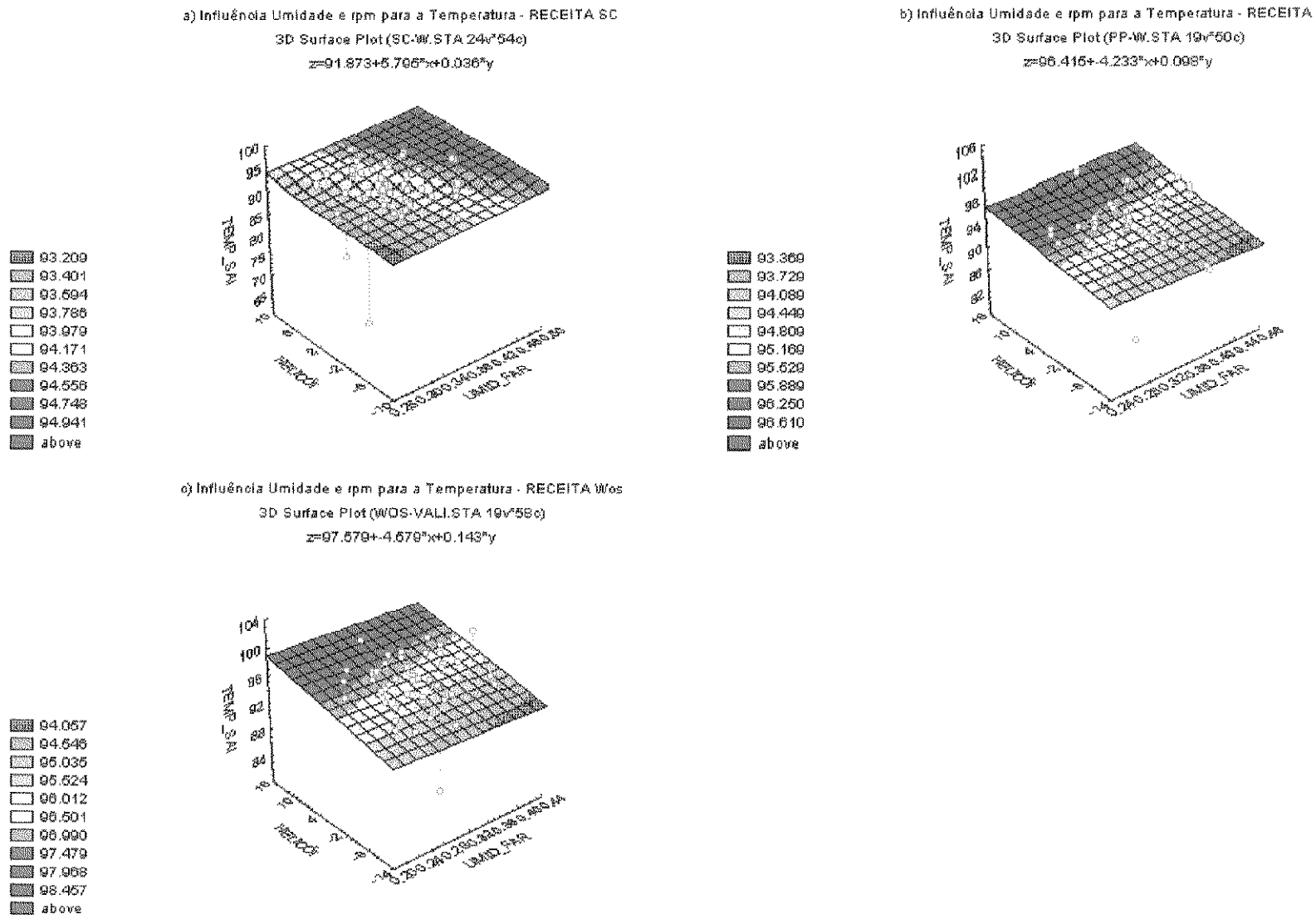


Figura 28: Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^0C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

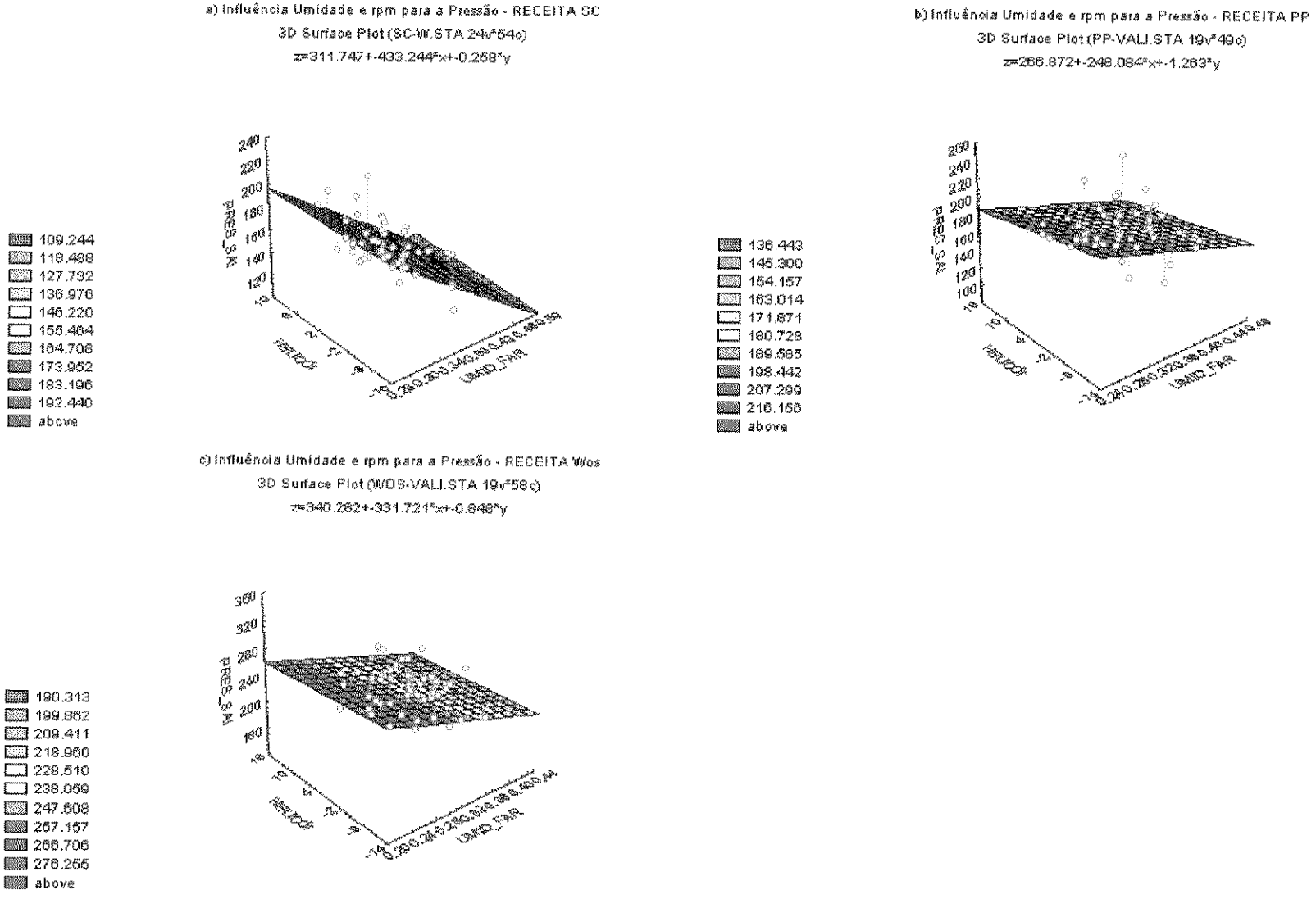


Figura 29: Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

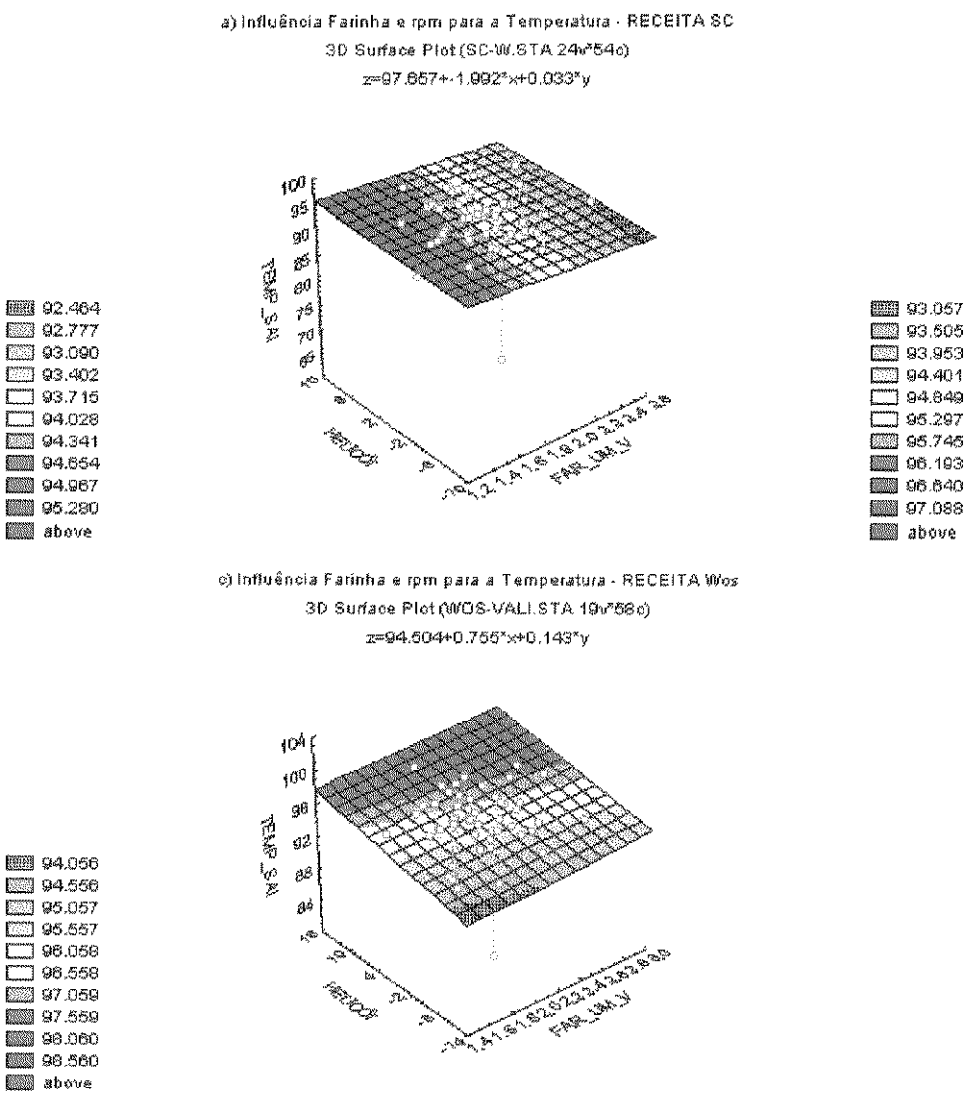


Figura 30: Influência da Vazão de Farinha e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^{0}C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

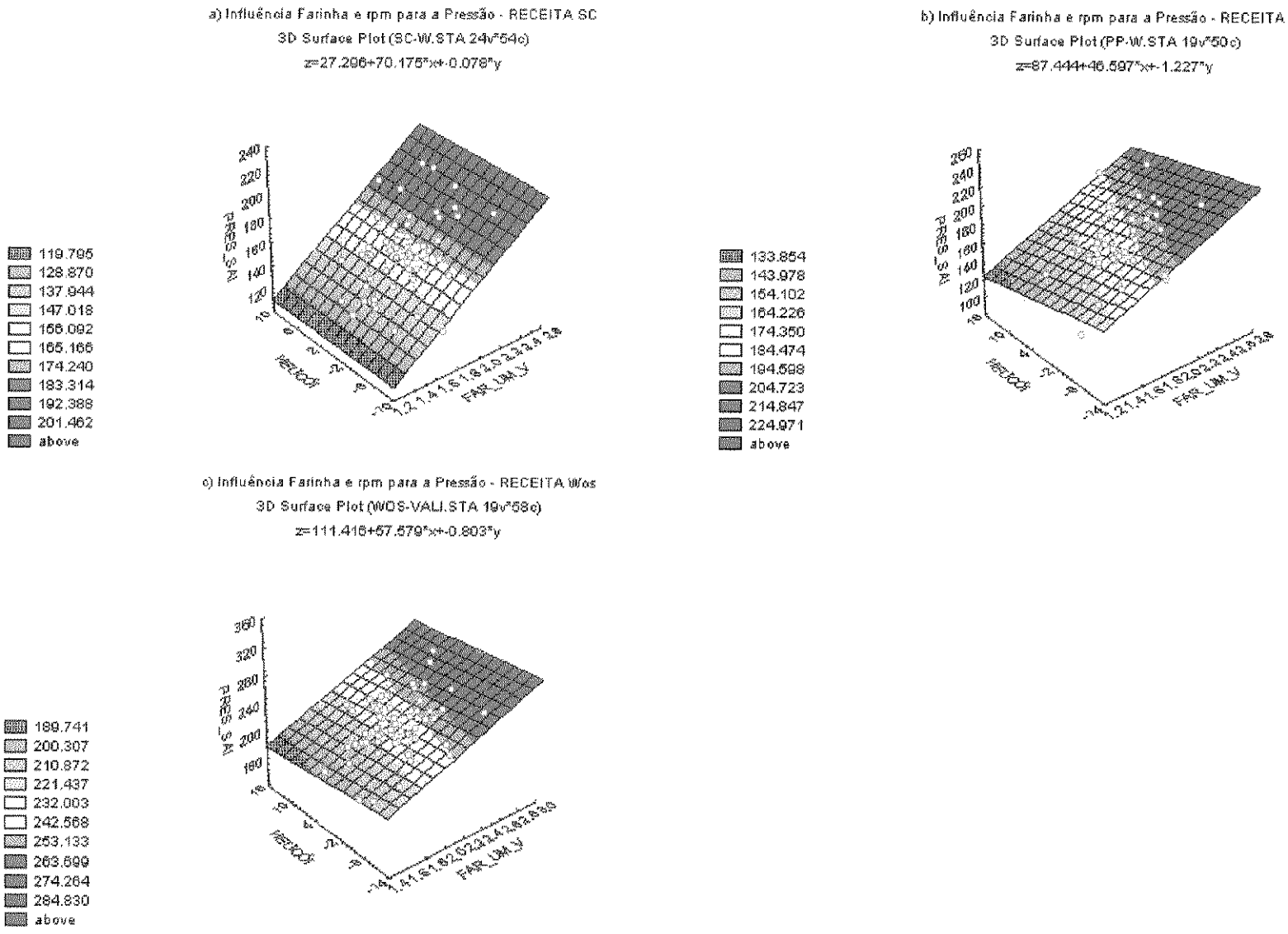


Figura 31: Influência da Vazão de Farinha e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

III.1.4.6) Efeitos para a Camisa do Extrusor

Mesmo sem avaliação direta neste experimento, o efeito da adição de vapor ao eixo do extrusor ou resfriamento da camisa do extrusor é um processo comumente empregado para extrusores comerciais. Genericamente a sua influência pode ser traduzida com o mesmo efeito introduzido pela variação de vapor a massa a ser extrusada, uma vez que a adição de vapor a massa extrusada contribui para o aumento de temperatura, reduzindo a viscosidade e assim provocando um efeito inverso para o torque e pressão de saída no extrusor. Observa-se que a redução no valor de torque provoca uma redução na energia específica mecânica do extrusor. Para o resfriamento da camisa do extrusor é observado um aumento na viscosidade, baixando-se a temperatura e aumentando-se o valor relacionado à pressão de saída. Entretanto, caso a redução seja muito elevada, ocorre um aumento de torque do motor, reduzindo a viscosidade e aumentando-se a temperatura, e reduzindo-se a pressão de saída, o que elevará o estado estacionário do processo a um segundo estado estacionário, intermediário entre o que seria observado para um resfriamento normal e o observado durante a adição de vapor.

Resultados similares ao descrito acima são observados nos trabalhos experimentais de Lu et al. (1992) e Lu et al. (1993) para a adição de vapor e resfriamento da camisa do extrusor sem contato direto com a massa extrusada.

O Quadro 12 sumariza os efeitos múltiplos de forma qualitativa segundo o processo de extrusão baseado nas receitas empregadas no teste Piloto.

Quadro 12: Resumo dos Principais Efeitos Qualitativos para Pertubações Múltiplas

		Efeito Qualitativo	
Parte do Processo Analisada	Variável Múltipla	TEMPERATURA de Saída	PRESSAO de Saída
Pré - Condicionador	Vapor e Umidade	Pequena Amplitude de Variação	INVERSO forte
	Vapor e Prop. Vapor / Umidade	DIRETO variável	DIRETO variável
	Vapor e Farinha	DIRETO forte	DIRETO médio
	Umidade e Farinha	INVERSO fraco	DIRETO médio
Rotação do Helicóide	Vapor	INVERSO médio	INVERSO forte
	Umidade	DIRETO fraco	INVERSO médio
	Farinha	DIRETO médio	DIRETO médio
Camisa do Extrusor	Vapor	DIRETO médio	INVERSO médio
	Água	INVERSO médio	DIRETO médio

A análise do Quadro 12 mostra que todos os efeitos classificados como médio ou fracos evidenciam uma competição de efeitos em sentidos opostos, a análise é resultado da somatória não linear dos efeitos individuais. Sem dúvida o mais importante resultado obtido desta análise é o efeito resultante da adição conjugada de vapor e umidade ao pré-condicionador, a uma dada proporção que apresenta um efeito forte e inverso para a pressão e equilíbrio para a variação de temperatura de saída. Portanto, uma vez que o sistema de controle será dimensionado para um módulo *MIMO 2 X 2*, pode-se agregar duas variáveis em uma entrada. A outra variável certamente tem que apresentar um efeito pronunciado direto para a pressão de saída, o que da interpretação dos efeitos isolados adiciona como resposta à vazão de farinha. Como será gerado um certo desequilíbrio em relação a variável temperatura de saída, uma pequena adição em controle 'ratio' de maior proporção de água a

vazões de farinha mais elevadas consegue manter o equilíbrio da variável de processo temperatura de saída.

Este equilíbrio será rompido quando os valores de temperatura e pressão de saída não puderem mais ser mantidos, o que evidencia uma provável variação inaceitável na qualidade do produto extrusado (densidade, umidade, textura e dimensões do produto extrusado úmido), conforme já foi discutido na seção (III.1.2.1).

III.1.5) Análise de Energias Específicas Envolvidas no Processo de Extrusão

O processo de extrusão possui características peculiares que possibilitam a análise da influência das variáveis manipulativas baseadas em dois parâmetros de energia: a energia mecânica específica (*SME*) e a energia térmica específica (*STE*), equacionalmente já definidas na seção (III.1.1). O termo específico está relacionado ao fato dessas energias serem calculadas com relação à vazão de farinha de alimentação ao pré-condicionador.

Para a avaliação das influências relacionadas para a *SME* e *STE* foram utilizadas as variáveis em base úmida, a fim de adequar-se a definição dessas variáveis conforme a literatura. Basicamente o emprego da *SME* e *STE* sob a ótica de controle apresentaria vantagens significativas para a construção de um algorítmo mais simplificado, visto a *SME* apresentar intrinsecamente a relação entre a variável vazão de farinha e a rotação do helicóide associados com o torque relacionando ao processo. Da mesma forma a *STE* relaciona a adição de vapor e água para o pré-condicionador; e a adição de vapor e utilização de água de resfriamento para extrusora, bem como a capacidade térmica dos ingredientes da receita. Por isso o algoritmo de controle poderia relacionar diretamente a *SME* e *STE* com a densidade e umidade do produto extrusado úmido, seguindo a mesma lógica apresentada para a relação entre a temperatura e pressão de saída descrita na seção (III.1.2.1).

Entretanto os resultados demonstrados neste trabalho evidenciam a necessidade de estudos mais aprofundados para que seja assumida a relação direta das duas variáveis de energia para a qualidade do produto em termos de densidade e umidade além de outros itens essenciais descritos no decorrer dessa análise. A relação para as variáveis de qualidade do produto é observada através do *Diagrama de Pareto* na Figura 70 para a densidade e na Figura 71 para a umidade do produto extrusado úmido no Anexo V. Os quadros relativos

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL

aos valores da tabela *ANOVA* são mostrados respectivamente para a densidade das receitas *SC*, *PP* e *Wos* nos quadros 36, 37 e 38; no Anexo V respectivamente e para a umidade do produto extrusado úmido nos quadros 39, 40 e 41 no Anexo V respectivamente. Pode-se observar nestes quadros que a correlação R^2 fica em torno de 5, 27 e 33 % para a densidade nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente e 37, 46 e 34 % para a umidade nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente.

As equações significativas resultantes para a variável densidade são mostradas abaixo onde (*Z*) representa a densidade do produto extrusado úmido e (*X*) a *SME*:

Receita *SC*: sem parâmetros significativos

Receita *PP*: $Z = 47{,}0753 + 0{,}0134X$ (III.1.5.1)

Receita *Wos*: $Z = 47{,}6295 + 0{,}0125X$ (III.1.5.2)

Embora não tenha sido determinado uma equação significativa para a densidade do produto extrusado úmido na receita *SC*, as relações similares identificadas para as equações (III.1.5.1) e (III.1.5.2) contribuem claramente para identificar a energia mecânica específica como fator determinante para o valor de densidade. A receita *SC* provavelmente não apresentou relação significativa para a densidade por duas possíveis razões: somatório de erros experimentais ou necessidade de mudança mais drástica nos valores de energia mecânica específica para efetivamente mudar os valores de densidade.O trabalho de Onwulata et al. (1994), que discute extensivamente a influência da *SME* para a variação da densidade do produto extrusado a base de farinha de milho, concorda com a influência significativa dada pela *SME*.

As equações significativas resultantes para a variável umidade são mostradas abaixo onde (*Z*) representa a umidade do produto extrusado úmido, (*X*) a *SME* e (*Y*) a *STE*:

Receita *SC*: $Z = 30{,}5386 - 0{,}0168X + 0{,}0070Y$ (III.1.5.3)

Receita *PP*: $Z = 28{,}000 - 0{,}0125X + 0{,}0084Y$ (III.1.5.4)

Receita *Wos*: $Z = 27{,}57 - 0{,}0108X + 0{,}0068Y$ (III.1.5.5)

Para a umidade do produto extrusado úmido, as equações (III.1.5.3), (III.1.5.4) e (III.1.5.5) identificam boa relação para a dependência para as variáveis *SME* (*X*) e *STE* (*Y*), uma vez que embora existam diferenças entre os valores da regressão linear, as tendências são as mesmas. Esta variação, assim como já foi discutido para a variação de temperatura e pressão de saída na seção (III.1.2.1) define mais uma vez a especificidade do processo e necessidade da manutenção da receita a valores definidos.

As relações discutidas para a densidade do produto extrusado são claramente observadas nas Figuras 73.c e Figura 73.d para a receita *PP* e Figuras 74.c e Figura 74.d para a receita *Wos* no Anexo V como:

- EFEITO INVERSO DA *SME* PARA A DENSIDADE DO PRODUTO EXTRUSADO ÚMIDO;

Este efeito é bastante previsível qualitativamente, visto o incremento de energia ao extrusor desenvolver maior atrito interno e portanto atribuindo maior expansão para o produto processado. No processo industrial é necessário novamente conhecer-se um valor ideal para que seja mantido ao produto as características aceitáveis também de textura e dentro das dimensões especificadas.

As relações discutidas para a umidade do produto extrusado são claramente observadas nas Figuras 72.a e Figura 72.b para a receita *SC*, nas Figuras 73.a e 73.b e nas Figuras 74.a e Figura 74.b para a receita *Wos* no Anexo V como:

- EFEITO INVERSO DA *SME* PARA A UMIDADE DO PRODUTO EXTRUSADO ÚMIDO;
- EFEITO DIRETO DA *STE* PARA A UMIDADE DO PRODUTO EXTRUSADO ÚMIDO.

Este resultado também apresenta bastante coerência, uma vez que a maior energia mecânica no extrusor promove a maior expansão para o produto extrusado, aumentando a possibilidade de evaporação de água na saída do extrusor, o que reduz a umidade do extrusado úmido. A energia térmica específica apresenta uma correlação bem definida, mas de explicação um pouco mais complexa. Visto a energia térmica específica estar intimamente relacionada com a relação vapor e água necessária para a hidratação da massa a ser extrusada, bem como pelo perfil de viscosidade; um aumento de energia térmica pode ser gerado por um certo excesso de água e vapor, o que promove a extrusão de um produto mais úmido. Por outro lado, a redução da energia térmica que pode ser somente devido à

retirada de vapor ou de água, por um raciocínio elementar de balanço de massa, irá diminuir o conteúdo de umidade do extrusado.

Assim, como foi discutido para a densidade, *SME* e *STE* devem ser bem ajustadas para a obtenção de um perfil de umidade adequado para o produto extrusado úmido. Mesmo assim este fator não é tão crítico para a densidade, umidade e dimensões do produto final, visto o teor de umidade do extrusado seco ser obtido após a passagem por um secador industrial, que possibilita ajustes posteriores. Salienta-se que quanto mais uniforme for o teor de umidade do extrusado, associado a um ótimo ajuste do secador, menor será a diferença na retração das dimensões do produto (encolhimento), assegurando a manutenção da qualidade final.

Contudo, embora seja alternativamente possível a instalação de um sistema de controle baseado nas energia mecânica específica e energia térmica específica como variáveis manipulativas, é mais preciso utilizar-se o dueto temperatura e pressão de saída baseado na boa relação significativa para densidade e umidade do produto final. O uso das duas energias não é um método com chances imediatas de aplicação no cenário industrial visto:

1) dificuldade de medidores 'in line' de densidade e umidade do produto extrusado úmido com precisão e tempo de resposta adequados que possibilitem a instalação efetiva do controlador;

2) dificuldade de interpretação desses valores pelos operadores e ou necessidade de alto grau de qualificação dos mesmos;

3) provável necessidade de uma malha de controle interno específica para a *SME* e outra específica para a *STE*, visto serem o conjunto de variáveis manipulativas primárias do processo como já foi descrito;

4) necessidade de instalação de um medidor 'in line' que determine as características de constituição química da farinha de alimentação do pré-condicionador, para a avaliação do balanço de energia;

5) dificuldade para avaliação das perdas térmicas;

6) baixa correlação com a temperatura e a pressão de saída (discutida a seguir).

O item (4) pode ser dispensado desde que seja assumido uma mínima variação no conteúdo da receita, o que em campo industrial é praticamente inviável.

De qualquer forma é principalmente evidenciado pelos resultados deste trabalho a comprovação do item (6) através do diagrama de Pareto nas Figuras 76.a, 76.b e 76.c para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente no Anexo V, que demonstra uma difícil correlação entre a *STE* e *SME* para a temperatura de saída do extrusor. Os coeficientes de correlação R^2, bem como os valores de p são mostrados nos quadros 42, 43 e 44 no Anexo V para a variável temperatura de saída nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente; e quadros 45, 46 e 47 no Anexo V para a variável pressão de saída nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente. Pode-se observar nestes quadros que a correlação R^2 fica em torno de 13, 16 e 8 % para a temperatura de saída nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente e 27, 20 e 17 % para a pressão de saída nas receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente.

Essas relações são expressas nas equações (III.1.5.6) e (III.1.5.7) que apresentam uma indefinição para a real influência entre a *SME* (*X*) e a *STE* (*Y*) para a temperatura (*Z*) de saída do produto extrusado úmido.

Receita *SC*: $Z = 97.,626 - 0,00001X^2$ (III.1.5.6)

Receita *PP*: $Z = 97.,817 - 0,00001XY$ (III.1.5.7)

Receita *Wos*: sem parâmetros significativos

A observação das equações (III.1.5.8), (III.1.5.9) e (III.1.5.10) identifica novamente uma grande variabilidade de tendências, assim como quantitativa. Estes resultados podem ser também observados nas Figuras 77.a, 77.b e 77.c no Anexo V para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente.

Receita *SC*: $Z = 97,629 + 0,2066X - 0,0882Y$ (III.1.5.8)

Receita *PP*: $Z = 98,1189 + 0,1361X$ (III.1.5.9)

Receita *Wos*: $Z = 277,1166 - 0,1349Y$ (III.1.5.10)

A análise da Figura 75 no Anexo V evidencia o item discutido com respeito a relação estatística entre a temperatura e pressão de saída com a *SME* e *STE*, o que impossibilita, baseado nesse estudo, a utilização de um controlador baseado nas variáveis manipulativas *SME* e *STE* para o controle de temperatura e pressão de saída no extrusor. Este ponto é confirmado pela dificuldade de medida 'in line' das variáveis de qualidade quando na aplicação direta dessas energias com a densidade e umidade do extrusado úmido.

III.1.5.1) Definição de Energia Mecânica Específica (*SME*)

A definição de energia mecânica específica é extremamente importante para o processo de extrusão por englobar duas das principais variáveis manipulativas: vazão de alimentação de farinha e rotação do eixo do extrusor.

A análise da Figura 66 no Anexo V evidencia que a *SME* apresenta clara relação direta para a rotação do helicóide, mas de efeito mais complexo para a vazão de farinha que a princípio promove um leve aumento da *SME*. Este último efeito é certamente uma característica da energia mecânica específica que a uma rotação de eixo constante permanece praticamente inalterada para uma considerável faixa de aumento de vazão de farinha, visto a soma dos efeitos de rotação do helicóide e torque equilibrarem o aumento de vazão do extrusor conforme mostrado na equação (III.1.1.1.a).

Baseado na definição de *SME*, tanto a vazão de farinha quanto à rotação de helicóide são variáveis que podem ser compreendidas como manipulativas dentro da definição de energia mecânica, na qual, pelo mesmo raciocínio, o torque pode ser internamente considerado uma variável de processo, de extrema importância. Pela análise da Figura 67 no Anexo V é marcadamente descrito que o aumento de vazão de farinha, pelo simples efeito do maior grau de empacotamento do extrusor, provoca um aumento de torque. Assim a *SME* tem relação direta para o aumento de torque, como também é observado na Figura 68 no Anexo V que descreve a relação com a rotação do helicóide. A vazão de farinha, por sua vez tem efeito inverso para a SME visto na Figura 67 do Anexo V, o que define que a influência da vazão de farinha quando comparada com o torque a uma rotação de helicóide constante é maior que o incremento dado pelo aumento do torque.

A Figura 68 no Anexo V mostra que a rotação do helicóide tem uma contribuição mais efetiva para o aumento da *SME* do que o torque, pelo fato da variação do valor da

SME ser superior na ordenada do que na abscissa. O que explica a observação já discutida na Figura 66 do Anexo V. A análise da Figura 69 no Anexo V confirma a discussão acima, uma vez que descreve a influência conjugada de farinha e rotação do helicóide para o torque em um extrusor. As duas variáveis têm efeito direto para o aumento do torque, conforme já discutido para a farinha e para a rotação do helicóide; simplesmente como uma função do aumento da potência elétrica da operação, uma vez que o aumento de rotação tende a aumentar o valor da corrente elétrica empregada no processo. Mesmo assim, o efeito de 'derretimento' da massa extrusada durante esse processo e as transformações no perfil pseudoplástico da sua viscosidade fazem com que o efeito de aumento de torque pelo aumento da vazão de farinha seja menos pronunciado do que o oriundo do aumento da rotação do helicóide, ratificando o que já havia sido comentado para a análise da Figura 67 do Anexo V.

Embora a análise da *SME* seja bastante consistente para esse trabalho, observa-se que essa relação é dependente do torque gerado na massa processada e dessa forma os valores de *SME* serão fortemente relacionados com:

- distribuição granulométrica da farinha de alimentação;
- tempo de residência e configuração do pré-condicionador;
- perfil de mistura no pré-condicionador;
- receita a ser extrusada;
- teor de umidade da farinha (incluindo a vazão de água) após o pré-condicionador;
- adição de vapor direta ao extrusor;
- resfriamento da camisa no extrusor;
- adição de vazão de óleo e /ou gordura para o pré-condicionador;
- adição de microingredientes e emulsificantes para a receita;
- configuração do eixo do extrusor;
- configuração da camisa do extrusor;
- configuração da placa de saída do extrusor;
- potência dos motores instalados para o pré-condiconador e extrusor.

III.1.5.2) Relações das Variáveis Manipulativas com a Energia Mecânica Específica (*SME*)

Aos efeitos qualitativos observados para as variáveis manipulativas empregadas neste estudo e a *SME* são mostrados no Quadro 13:

Quadro 13: Efeitos Relacionados para a SME.

Variável Manipulativa	*Efeito Qualitativo para a SME*	Figuras Analisadas no Anexo V
Vazão de Água	INVERSO médio	78, 80, 83
Vazão de Farinha	INVERSO fraco	78, 79, 84
Vazão de Água e Farinha	INVERSO médio	78
Vazão de Vapor	INVERSO fraco	79, 80, 82
Vazão de Vapor e Farinha	INVERSO fraco	79
Vazão de Vapor e Água	INVERSO médio	80
Proporção Vapor / Umidade	DIRETO médio	81
Rotação do Helicóide	DIRETO forte	82
Vazão de Vapor e Rotação do Helicóide	DIRETO forte	82
Vazão de Água e Rotação do Helicóide	DIRETO médio	83
Vazão de Farinha e Rotação do Helicóide	DIRETO forte	84

O Quadro 13 considera, à exceção teor de umidade após o pré-condicionador, constantes os itens listados na seção (III.1.5.1) para a análise da *SME*. Quando as variáveis são analisadas como influência conjunta às demais variáveis são mantidas constantes.

A análise do Quadro 13 demonstra a relação *INVERSA* para a *SME* com a vazão de vazão de vapor, farinha e água, sendo as duas primeiras de natureza mais fraca que a

última. O efeito inverso do aumento de farinha é claramente explicado pela equação (III.1.1.1.a), enquanto a adição de água diminui a viscosidade, reduzindo o valor de torque; a adição de vapor aumenta a temperatura da massa, diminuindo a viscosidade e provocando efeito similar ao descrito pela vazão de água. Entretanto a adição de vapor tende a aumentar o grau de cozimento do amido e portanto opondo-se a redução de viscosidade pelo aumento da temperatura, observando-se um certo aumento de torque pelo maior inchamento dos grãos de amidos. Esse efeito é compensatório e por vezes pode superar o efeito de redução relacionado ao aumento de temperatura, como pode ser observado na Figura 79.a do Anexo V para a receita *SC*, a qual detém a maior concentração de amido.

Pela mesma linha de raciocínio, a vazão de vapor e água conjugadas apresenta um efeito inverso médio, reforçado em relação à adição de vapor isoladamente pelo efeito da vazão de água. Entretanto a proporção vapor / umidade que determina um aumento proporcional de vapor para a vazão de umidade revela um efeito *DIRETO* para a *SME*, o que certamente pode ser atribuído pelo excessivo cozimento do amido e significativo aumento de fricção da massa a ser extrusada, visto a redução da vazão de água. Observa-se aqui que embora a umidade total permaneça a mesma, a natureza do processo de mistura e gelatinização é extremamente dependente da hidratação (vazão de água) e aquecimento (vazão de vapor). Finalmente quando é considerada a vazão de água e farinha, o efeito *INVERSO* é acrescido de fraco para a vazão de farinha a médio pelo efeito adicional de redução do torque quando é adicionada água (mantido constante a vazão de vapor), visto a redução de viscosidade.

A rotação do helicóide como já foi discutido em detalhes na seção (III.1.5.1) basicamente atribui um efeito *DIRETO* forte para a *SME*, uma vez que embora reduza a viscosidade pelo aumento da temperatura da massa, o efeito de redução de torque não é tão pronunciado visto a redução de viscosidade tender a diminuir a temperatura, o que em última análise tende a elevar o valor da viscosidade novamente, conforme observado também no trabalho de Q. Lu et al (1992). Esta relação da rotação do helicóide quando avaliada em conjunto com as vazões de farinha, vapor e água apresenta redução nesta tendência mais pronunciadamente para a vazão de água, visto esta última ter um efeito realmente diferenciado na redução do valor de torque.

III.1.5.3) Relações das Variáveis Manipulativas com a Energia Térmica Específica (*STE*)

Os efeitos qualitativos observados para as variáveis manipulativas empregadas neste estudo e a *STE* são mostradas no Quadro 14:

Quadro 14: Efeitos Relacionados para a STE.

Variável Manipulativa	*Efeito Qualitativo para a STE*	Figuras analisadas no Anexo V
Vazão de Água	Pequena Amplitude de Variação DIRETA	85, 87
Vazão de Farinha	INVERSO médio	85, 86
Vazão de Água e Farinha	INVERSO médio	85
Vazão de Vapor	DIRETO forte	86, 87, 88
Vazão de Vapor e Farinha	DIRETO forte	86
Vazão de Vapor e Água	DIRETO forte	87
Proporção Vapor / Umidade	DIRETO fraco	88

A energia térmica específica (*STE*), conforme já foi descrito previamente neste estudo é composta por um somatório de energias relacionadas aos ingredientes constituintes da farinha de alimentação, considerados constantes, adição de vapor e água ao pré-condicionador. Por outro lado não consideram-se as perdas térmicas relacionadas tanto ao pré-condicionador quanto ao extrusor, em adição a não utilização de vapor diretamente ao extrusor e resfriamento da camisa do mesmo.

Assim, os efeitos observados no Quadro 14 evidenciam a forte dependência *DIRETA* da energia térmica com a vazão de vapor devido ao valor de entalpia adicionado e uma forte dependência *INDIRETA* para a vazão de vapor, uma vez que o seu aumento mantém constantes as outras variáveis e portanto como a farinha está presente no denominador da equação (III.1.1.3), o seu aumento reduz a proporção entre numerador e denominador. O efeito relativo à vazão de água tem pequena influência, por representar um pequeno

acréscimo de energia o sistema. A proporção vapor / umidade tem um efeito direto fraco devido a maior contribuição entálpica da vazão de vapor do que a referente à adição de água.

A influência conjugada para a vazão de farinha e água quando associadas com a vazão de vapor, uma a uma, têm efeito direto forte novamente explicado pela maior entalpia do vapor. A influência entre a vazão de água e farinha apresenta o efeito inverso médio, basicamente determinando pelo comportamento relacionado para a vazão de farinha. A rotação do helicóide não é avaliada na equação de energia térmica e portanto os seus gráficos não são mostrados.

A fim de ratificar o emprego da *STE* somente como variável manipulativa resume-se que a mesma:

- considera apenas a contribuição quantitativa das vazões de água, vapor e constituintes da farinha de alimentação;
- não considera os efeitos relativos a rotação do helicóide;
- não considera os efeitos relacionados com as mudanças de viscosidade da massa extrusada.

Outro ponto não abordado neste estudo é o consumo de energia, provida pela fonte de energia mecânica ou térmica para as reações de gelatinização e desnaturação protéica ao longo do extrusor, que devem ser considerados para a avaliação energética. Mas que de sobremaneira é medido nas variações de temperatura e pressão de saída do extrusor.

III.1.6) Modelo Multivariável para a Temperatura e a Pressão de Saída

Depois da análise de todos os efeitos observados por este trabalho nas três (3) receitas, é necessário a construção de um modelo estatístico de acordo com as observações vistas para que possa ser verificado o efeito múltiplo significativo de todas as variáveis manipulativas. Os efeitos das variáveis manipulativas para a temperatura e pressão de saída podem ser observados no *Diagrama de Pareto*, conforme as Figuras 89, 90 e 91 no Anexo VI para as receitas *SC*, *PP* e *Wos*, respectivamente. Observa-se que devido às variações discutidas a respeito de temperatura e pressão de saída para os efeitos de umidade e vapor,

o modelo considera uma margem de erro acima do normal, aceitando para a validação dos efeitos $p < 0,075$, o que representa um grau de erro de até 25%. Esta escolha é baseada no fato de que sejam definidas tendências genéricas para a aplicação do controle experimental.

O Quadro 15 apresenta um resumo das variáveis manipulativas significativas para a variação de temperatura e pressão de saída nas três receitas utilizadas.

Quadro 15: Efeitos Significativos para a Temperatura e Pressão nas Receitas SC, PP e Wos.

Receitas	Temperatura (^{0}C) de Saída	Pressão (psi) de Saída
SC	- Combinação da vazão de vapor e proporção vapor/umidade	- Proporção vapor / umidade
	- Combinação da vazão de vapor e umidade	- Rotação do helicóide
	- Vazão de vapor	- Combinação vapor e proporção vapor/umidade
	- Proporção vapor / umidade	- Vazão de umidade
		- Combinação da vazão de vapor e umidade
PP	- Vazão de vapor	- Combinação da vazão de lipídio e farinha
	- Combinação da vazão de vapor e proporção vapor / umidade	- Combinação da vazão de proteína e rotação do helicóide
	- Combinação da vazão de umidade e rotação do helicóide	- Combinação da vazão de lipídio umidade
	- Combinação da vazão de farinha e rotação do helicóide	- Vazão de lipídio
		- Combinação da Vazão de lipídio e proteína
Wos	- Combinação de vazão de lipídio e farinha	- Combinação da Vazão de lipídio e umidade
	- Vazão de lipídio	- Combinação vazão de lipídio e farinha
		- Vazão de lipídio
		- Combinação vazão de farinha e rotação do helicóide

Observa-se que para o cálculo do Quadro 15 acima foram incluídos nas relações, para pressão na receita *PP* e para temperatura e pressão de saída na receita *Wos*, a influência da vazão de lipídios e proteínas, visto o menor teor de carboidratos no primeiro é esperada maior influência do alto teor de lipídios no segundo, determinado diferenças no comportamento de temperatura e pressão de saída.

A avaliação da influência nas três receitas acima demonstra que a temperatura é significativamente influenciada pelas vazões de vapor, proporção vapor / umidade e pela vazão de lipídio, bem como pelas combinações vapor e umidade, vapor e proporção vapor / umidade, combinação vazão de farinha com a rotação do helicóide e vazão de lipídio.

Para a variação de pressão de saída observa-se a influência significativa da rotação do helicóide, umidade, proporção vapor umidade e diversas combinações entre vapor, umidade, farinha, proporção vapor / umidade, rotação do helicóide, vazão de lipídios e proteínas. A avaliação de todas as combinações e efeitos já foi vista de forma qualitativa nas seções (III.1.3) e (III.1.4) e seguem a mesmas bases de raciocínio já discutidas.

As influências significativas para a temperatura de saída para a receita *SC* são observadas nas Figuras 92 e 93 e para a pressão de saída nas Figuras 94, 95 e 96 do Anexo VI.

As influências significativas para a temperatura de saída para a receita *PP* são observadas nas Figuras 97, 98, 99, 100 e 101 e para a pressão de saída nas Figuras 102, 103, 104, 105 e 106 do Anexo VI.

As influências significativas para a temperatura de saída para a receita *Wos* são observadas na Figura 107 e para a pressão de saída nas Figuras 108, 109 e 110 do Anexo VI.

III.1.6.1) Principais Influências para a Temperatura e a Pressão de Saída

O Quadro 16 descreve os efeitos significativos apresentados no Quadro 15 para a temperatura e pressão de saída do extrusor, no qual a numeração mostrada no primeiro corresponde aos números mostrados no segundo respectivamente.

Quadro 16: Comparação dos Efeitos Isolados e Múltiplos para a Temperatura e Pressão de Saída.

EFEITO SIGNIFICATIVO	RECEITA	Influência para a TEMPERATURA de Saída	Figuras do ANEXO VI	Influência para a PRESSÃO de Saída	Figuras do ANEXO VI
Combinação da vazão de vapor e proporção vapor/umidade	SC	Estável com perfil de temperatura alto	92.c, 92.d	Estável com adequada proporção de vapor para a farinha, aumento de temp. com maior 'ratio' para vapor e redução com o aumento de umidade	95.a, 95.b
	PP	Leve aumento de temperatura	98.c, 98.d		
Combinação da vazão de vapor e umidade	SC	Tende a cair com o aumento de umidade	92.a, 92.b	Forte tendência INVERSA com o aumento das duas variaveis	94.a, 94.b
Vazão de vapor	SC	Tende ao aumento de temperatura	92.a, 92.b	Forte tendência para diminuir a pressão	94.c, 94.d
	PP	Redução de temperatura Redução de temperatura	97.a, 97.b 97.c, 97.d 98.a, 98.b		
Proporção vapor/umidade	SC	Tende a manter-se em alto perfil de temperatura com tendência de leve queda quando aumenta-se a adição de umidade	92.c, 92.d 93.a e 93.b	Efeito Direto médio e quando aumentado com a vazão de água, mantém fraco efeito Direto	95.a, 95.b 95.c, 95.d
Combinação da vazão de umidade e rotação do helicóide	PP	Efeito complexo, pois com o aumento de rotação de eixo, o aumento de umidade tem efeito Direto para a temperatura; com a redução da rotação de eixo o efeito é Inverso. Vazão de umidade quando variada com a prop. vapor/umidade têm efeito Direto.	99.c, 99.d 100.a, 100.b		
Combinação da vazão de farinha e rotação do helicóide	PP	O mesmo efeito observado quando a rotação do helicóide é variada com a vazão de umidade Vazão de farinha quando variada com a umidade têm efeito Direto leve Vazão de umidade quando variada com a prop. vapor/umidade têm efeito Direto. Rotação do helicóide quando variada com a prop. vapor/umidade têm efeito Direto.	100.c, 100.d 100.a, 100.b 101.a, 101.b 101.c, 101.d		
	Wos			Bastante equilibrado, sem tendência bem definida Rotação do helicóide tem efeito Inverso a vazão de umidade constante vazão de lipídio constante Aumento de umidade e vazão de farinha não apresenta efeito significativo	110.c, 110.d 109.c, 109.d 109.a, 109.b 110.a, 110.b
Combinação de vazão de lipídio e farinha	PP			Aumento promove um aumento de pressão Aumento de farinha promove um aumento de pressão para a vazão de lipídio constante vazão de proteína constante umidade constante e rotação do helicóide constante	103.a, 103.b 103.a, 103.b 104.c, 104.d 105.c, 105.d 106.c, 106.d
	Wos	Aumento tem efeito Inverso Vazão de lipídio com forte efeito Inverso	107.a, 107.b	Efeito inverso pela forte contribuição de vazão de lipídio	108.c, 108.d
Vazão de lipídio	PP			Diminui a pressão a constante rotação de eixo Estável com a constante vazão de farinha Estável com a constante vazão de proteína Redução com a constante vazão de umidade	103.c, 103.d 103.a, 103.b 102.a, 102.b 102.c, 102.d
	Wos			Efeito inverso a vazão de umidade constante vazão de farinha constante e rotação de eixo constante	108.a, 108.b 108.c, 108.d 109.a, 109.b
Rotação do helicóide	SC			O aumento tende a reduzir a pressão e a redução tem mesma tendência em perfil parabólico Efeito bastante similar ao avaliado na adição conjunta com vapor Efeito com mesma tendência, mas fraco, quando usado a mudança do 'ratio' vapor/umidade	94.c, 94.d 96.a, 96.b 96.c, 96.d
Combinação da vazão de proteína e rotação do helicóide	PP			Efeito Inverso, promovido pelas duas variáveis Efeito inverso a constante vazão de umidade Umidade a vazãods proteína constante tem efeito inverso.	105.a, 105.b 104.a, 104.b 104.a, 104.b
Combinação da Vazão de lipídio e proteína	PP			Inverso mais pronunciado pelo efeito inverso da vazão de umidade	102.a, 102.b
Combinação da Vazão de lipídio e proteína	PP			Inverso mais pronunciado pelo efeito Inverso da vazão de umidade A vazão de umidade mantém efeito Inverso quando aumentada a rotação de eixo constante, vazão de farinha constante vazão de proteína cosntante e vazão de lipídio constante.	102.c, 102.d 106.a, 106.b 105.a, 105.b 104.a, 104.b 102.c, 102.d
	Wos			Aumento tem efeito Inverso	108.a, 108.b

Em resumo, a análise das Figuras 92 até 110 demonstra a influência das variáveis que relacionam o teor de umidade e a quantidade de vapor adicionada a farinha, conjugada a variação da farinha de alimentação e rotação de eixo do extrusor para temperatura e pressão de saída. Pelos dados experimentais a variação de umidade representa um comportamento desuniforme para a variação de temperatura de saída, uma vez que a redução de viscosidade pelo aumento de umidade é contra-balanceada pela adição de vapor. Este último elemento

que contribui para o aumento da umidade do extrusado, por sua vez, aumenta a temperatura da massa a ser extrusada, o que promove uma redução no torque empregado pelo extrusor.

Do efeito de redução de temperatura de saída pela adição de água e decréscimo no valor de torque de operação contra o aumento de viscosidade pela adição de vapor e conseqüente aumento de torque, é obtido a tendência parcial para a temperatura do estado de equilíbrio. A outra parte é determinada pela mudança na energia mecânica específica, que envolve as mudanças de rotação de eixo e variação de vazão de farinha, balanceadas pelo torque gerado ao eixo do extrusor. Por um lado o aumento de vazão de farinha base seca determina um acréscimo de viscosidade e o aumento de rotação do helicóide tende a aumentar a fricção interna, relacionando um efeito final direto para a temperatura de saída de produto. Mas, por outro lado, a redução no valor dessas variáveis reduz a viscosidade, tendendo a uma redução na temperatura de saída. Dessa forma um aumento de farinha de alimentação e rotação de eixo tende a um aumento leve a médio de temperatura e pressão no extrusor, embora o efeito isolado de aumento de rotação do helicóide tenda a uma diminuição da pressão.

Pelo conjunto de dados estudados, a vazão de umidade desempenha efeito principal na redução de temperatura e pressão, e a energia suprida pela adição de farinha, rotação do helicóide e a adição de vapor irão em conjunto com a constituição química da farinha de alimentação determinar o perfil de viscosidade da massa a ser extrusada. Este perfil usualmente corresponde a um acréscimo de temperatura e de pressão de saída caso a alimentação de farinha a base seca seja aumentada, com pouca dependência para a rotação do helicóide e adição de vapor. Por outro lado uma redução no valor de temperatura de saída pode ser conseguida quando a rotação do helicóide e alimentação de farinha são reduzidas, podendo ou não ser influenciada pela a adição de vapor, dependendo da proporção entre vapor e umidade. A redução no valor de pressão é um fator que também pode ser observado no aumento de fricção interna no extrusor, seja dado por uma excessiva gelatinização do amido pela maior adição de vapor ou pelo aumento de rotação do helicóide. O aumento da vazão de umidade irá também reduzir a pressão de saída.

A análise desses dados demonstra que o controle da extrusão deve ser baseado no conjunto de transformações físicas e químicas, que acontecem durante o processo de extrusão, responsáveis pela formação da estrutura biopolimérica na qual a vazão de farinha e o teor de umidade, conjugados aos balanços de energia mecânica e térmica ao extrusor,

controlados pelas variações de temperatura e pressão de saída do extrusor, associam-se diretamente à qualidade do produto final.

III.1.7) Análise do Comportamento da Temperatura e Pressão nas Zonas do Extrusor

Embora as análises realizadas para as variáveis na saída do extrusor: temperatura e pressão de saída tenham definido as principais tendências para a aplicação de um controle lógico neural, o estudo dos perfis de temperatura e pressão nas zonas do extrusor é incluído a fim de contribuir para o entendimento das transformações ao longo do extrusor sob o perfil qualitativo para as perturbações individuais para as receitas *SC*, *PP* e *Wos*. Esta simples análise não tem por objetivo a avaliação precisa do perfil de viscosidade, visto a sua complexa relação pseudoplástica com as variáveis temperatura e pressão de saída.

III.1.7.1) Temperatura ao Longo do Extrusor

O perfil transiente de temperatura ao longo do extrusor, avaliado para a vazão de farinha, é observado nas Figuras 111, 112 e 113 do Anexo VII para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente. As Figuras 114, 115 e 116 do Anexo VII mostram a influência da vazão de vapor para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente. A influência da vazão de água é observada nas Figuras 117, 118 e 119 do Anexo VII para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente.

A vazão de farinha apresenta influência bastante definida ao longo do extrusor, visto o crescimento praticamente linear dos valores de temperatura ao longo das zonas do extrusor de forma quase paralela para todas as receitas. Entretanto a não uniformidade do perfil de temperatura pode ser verificada através da linha azul referente à temperatura medida na segunda zona do extrusor com perfis superiores as zonas 3 e 4 (linha vermelha) e 5 (linha verde) do extrusor. Este efeito pode ser compreendido pelo maior acúmulo de farinha nesta região do extrusor, logo após a saída do pré-condicionador, iniciando bruscamente o derretimento da massa inicialmente sólida. Este efeito é comprovado pelo fato de em todas figuras da perturbação de farinha a medida da temperatura na próxima

zona: a zona 3 e 4 ser significantemente inferior à zona 2, confirmando que após o derretimento a redução da viscosidade da massa produz uma queda na temperatura.

Outro ponto para ser observado reside na maior intensidade de temperatura observada nas zonas 6 (linha cor-de-rosa) e de saída (linha preta) após a passagem por uma zona de redução progressiva representada pelas zonas 3 e 4 e 5. Este efeito é provavelmente pela proximidade da zona de saída do extrusor, onde há uma redução abrupta de área; mesmo que o eixo do extrusor tenha normalmente uma função de transporte. Para produtos com alta taxa de expansão pode-se adicionar extra cisalhamento na zona de saída. A redução na vazão de farinha tem um perfil bastante uniforme para as temperaturas observadas nas zonas do extrusor, observado nas Figuras 111.c, 112.c e 113.c; justificado pelos efeitos opostos do menor empacotamento do extrusor (tendência à redução) e menor redução no valor da viscosidade da massa no extrusor (tendência ao aumento). Observa-se ainda que a vazão de farinha na perturbação 210 kg/h na Figura 112.b apresenta menor aumento de temperatura quando comparada com a vazão a 190kg/h na Figura 112.a do Anexo VII, que pode ser justificado pelo maior derretimento da massa na maior vazão e portanto justificando uma maior tendência à redução da temperatura final, associado ao menor tempo de residência no extrusor.

A vazão de vapor avaliada apresenta comportamento bastante semelhante quando a distribuição das zonas de temperatura, novamente com a sobreposição da zona 2 as zonas 3 e 4; e 5 do extrusor, explicado pelo mesmo efeito principal de derretimento da massa extrusada descrito acima. Entretanto as tendências levemente diretas relacionadas com o aumento de vazão de vapor (Figuras 114.b e 114.c; 115.b e 115.c e 116.b e 116c do Anexo VII) e levemente indireta relacionadas com a redução da vazão de vapor (Figuras 114.a, 115.a e 116.a do Anexo VII) apresentam maior mudança nas zonas internas do que na zona de saída, visto embora a vazão de vapor aumentar a temperatura pelo aumento da energia térmica adicionada ao processo, essa energia é grandemente consumida no pré-condicionador no processo de pré-gelatinização, reduzindo a sua influência direta ao longo do processo. Como já foi discutida neste trabalho, esta variável passa a ter grande efeito quando alterada em conjunto com a vazão de água (ou teor total de umidade).

A análise das Figuras 117.a, 118.a e 119.b do Anexo VII, que representam a redução na vazão de água, apresentam o mesmo fenômeno para o derretimento da massa, também observado nas Figuras 117.b e 117.c; 118.b e 118.c e 119.b e 119.c que mostram o aumento da vazão de água. O efeito isolado da variação da vazão de água provoca pequenas

variações no valor final de temperatura (ajudado pela escala não muito reduzida dos gráficos nas figuras citadas), o que não elimina o efeito lubrificante e de hidratação que esta variável exerce ao processo de extrusão. Novamente, a variação dessa variável em conjunto com a vazão de vapor produz efeitos mais pronunciados.

A vazão de umidade tende a ter uma relação inversa com a temperatura, mas de efeito complexo, visto a sua adição reduzir inicialmente a viscosidade da temperatura da massa extrusada, mas pela queda da viscosidade há um aumento na fricção interna do extrusor, o que torna a promover um aumento de temperatura. A sua redução inicialmente aumenta a fricção do helicóide com maior tendência ao aumento de temperatura, mas que novamente é decrescida, visto a fricção promover uma redução na viscosidade, o que tende a reduzir a temperatura.

III.1.7.2) Pressão ao Longo do Extrusor

A análise da pressão ao longo do extrusor pela sua maior sensibilidade visual (avaliada em psi) do que a temperatura (avaliada em graus Celsius) ajuda para a compreensão dos efeitos ao longo do extrusor.

O perfil transiente de pressão ao longo do extrusor, avaliado para a vazão de farinha, é observado nas Figuras 120, 121 e 122 do Anexo VII para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente. As Figuras 123, 124 e 125 do Anexo VII mostram a influência da vazão de vapor para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente. A influência da vazão de água é observada nas Figuras 126, 127 e 128 do Anexo VII para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente.

A análise da variação de pressão demonstra que existe considerável diferença entre a pressão da zona de saída (linha verde) para as pressões medidas nas zonas 5 (linha azul) e zona 6 (linha vermelha). Basicamente o efeito de pressão é concentrado na saída do extrusor pela restrição de área, visto ser um processo de transporte contínuo semelhante a uma bomba transportadora para fluidos viscosos. Os efeitos observados para a vazão de farinha seguem a mesma tendência do efeito observado para a temperatura de saída do extrusor, mas com variação menos pronunciada. A variação da vazão de farinha tem um efeito direto para a pressão de saída basicamente explicada pelo maior ou menor grau de enchimento do extrusor.

As variações observadas para a variação da vazão de vapor e de vazão de água seguem a mesma tendência descrita para o perfil de farinha em relação à concentração do efeito de pressão na saída do extrusor. O efeito inverso da adição de vapor é favorecido pelo aquecimento da massa e redução no valor de viscosidade, o qual é, quando aumentado à vazão de água, favorecido pelo aumento de lubrificação do sistema e redução de viscosidade, reduzindo a fricção total do processo.

III.1.8) Importância do Estudo do Processo de Extrusão para o Projeto do Controlador

A análise conduzida nas seções (III.1.1 até III.1.7) define a completa análise para o processo de extrusão segundo três objetivos básicos:

- comprovar a dependência estatística entre a temperatura e pressão de saída para a densidade e umidade do produto extrusado úmido, o que as define como variáveis de processo;
- determinar as possíveis variações para a construção do algorítmo de controle, principalmente os efeitos:

$\Rightarrow$*DIRETO* forte para a Temperatura de Saída e *DIRETO* médio para a Pressão de Saída para a variável Vazão de Farinha;

$\Rightarrow$*VARIÁVEL* para a Temperatura de Saída e *INVERSO* forte para a Pressão de Saída para a variável vazão de vapor e umidade com proporção ('ratio') definida.

- Confirmação do perfil de viscosidade irregular baseado na variação de temperatura ao longo do extrusor, indicando provável não linearidade para o processo.

Entretanto a análise realizada até este ponto ainda não é suficiente para a instalação do controlador *MFA* com elemento neural, uma vez que o mesmo necessita de uma estimativa dos parâmetros da análise da curva resposta: ganho, tempo morto e tempo de subida, a fim de que possa ser completada a definição do algorítmo empregado. Por este motivo a seção (III.1.8) desenvolve a metodologia da análise da curva resposta de característica sigmoidal para as perturbações das vazões de farinha, vapor e água para o pré-condicionador.

III.1.9) Análise da Curva Resposta

A análise do comportamento deste sistema, segundo a curva resposta define as necessidades práticas para a aplicação do controlador no teste industrial. Também nesta etapa pode ser confirmada a natureza do processo de extrusão, tal qual a velocidade de resposta para as duas diferentes variáveis de processo: temperatura e pressão de saída. O conjunto de variáveis manipulativas abrangeu a vazão de alimentação de farinha, vazão de alimentação de vapor e vazão de alimentação de água. A rotação de helicóide, discutida nas perturbações simultânea na seção (III.1.4), não foi avaliada nesta etapa, visto o controlador no teste industrial ser projetado para as três variáveis manipulativas citadas.

A curva resposta experimental é avaliada com ajustes para sistemas de segunda ordem sem zeros com fatores de amortecimento de ζ = 0,95; 0,98; 1,0; 1,02; 1,05; 1,2; 1,35; 1,5 e 3, além do processo de primeira ordem e primeira ordem com tempo morto. A escolha destes processos foi baseada na prévia observação da forma da curva de resposta para o processo de extrusão e pelos valores obtidos por diversos autores para as variáveis de controle, conforme Singh (1994). Dessa forma, foi avaliada para a curva resposta a tentativa de aproximação para uma das possibilidades propostas acima. Após isso, foram calculados os valores característicos aproximados para a curva resposta para sistemas lineares: o ganho k_E, o tempo de subida, definido como t_r e o tempo morto t_D.

O ganho estacionário k_E é calculado em '^{0}C / vazão em kg/h de farinha, vapor ou água' para a temperatura de saída e 'psi / vazão em kg/h de farinha, vapor ou água' para a pressão de saída; enquanto o tempo de subida, t_r, e o tempo morto t_D em segundos (s). Esses parâmetros, quando possível foram determinados para todas as curvas respostas através do método da curva tangente, considerando que o processo apresentou, em sua maioria, a curva em forma sigmoidal 'S'.

Esse procedimento possibilitou a análise para as perturbações individuais e simultâneas, a avaliação dos parâmetros característicos do comportamento transiente do processo, específico por perturbação, para cada receita.

III.1.9.1) Perturbações Individuais

A análise das perturbações individuais foi conduzida, segundo as três diferentes receitas empregadas neste estudo. Observa-se que os valores analisados referentes ao ajuste da curva de forma sigmoidal estão grifados nos Quadros 48 a 56 do Anexo VIII, mostrando o melhor ajuste para as variáveis temperatura e pressão de saída, a cada perturbação, para cada receita, segundo a precisão quadrática e valor de resíduos.

III.1.9.1.1) Curva Resposta para a Receita *SC*

O Quadro 48 no Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *SC* para a variável vazão de farinha, onde a condição de primeiro regime estacionário, denominado nível zero, é de 185 kg/h.

A análise dos resultados obtidos para a variável de processo temperatura de saída no Quadro 48 do Anexo VIII segundo o valor absoluto do erro quadrado R^2, apresenta ótimos coeficientes de correlação, definindo o processo como um sistema super amortecido, visto a melhor correlação ser observada para o valor de ζ = 1,2. Entretanto, o cálculo dos parâmetros da curva de reação revela, pela observação das perturbações ajustadas para ζ = 1,2, como já se esperava pelos estudos dos efeitos das variáveis no processo de extrusão, valores que são dependentes do degrau da perturbação aplicada. De qualquer forma, observa-se um valor de k_E relativamente pequeno entre 0,02 e 0,4 ^{0}C / kg/h , com valores correspondentes de tempo morto de 4 s a 10 s e tempo de subida de 98 s a 163 s. Observa-se que o valor de tempo morto é relativamente pequeno.

Para a análise da variável pressão de saída somente a correlação calculada para a terceira perturbação degrau apresenta uma boa aproximação, novamente, aproximando o sistema a um sistema linear de segunda ordem super amortecido com ζ = 1,2. Observa-se aqui que a pressão de saída também é representada por um valor de ζ = 1,35 e um sistema sub amortecido com ζ = 0,95. Embora o valor de erro quadrado para essas duas últimas aproximações fique em torno de 55%, atesta a tendência de variabilidade da forma da curva resposta, que pode ser atribuído a dois fatores, o primeiro, a não linearidade para a perturbação e o segundo a natureza não – linear da extrusão como um todo. Os valores de

ganho variam de 0,26 a 1,65 psi / kg/h, de tempo morto de 23 s a 61 s e tempo de subida 135 s a 164 s. Mesmo com a variação observada, pode-se concluir que para essa receita a variável pressão de saída apresenta um valor superior de ganho, um considerável tempo morto e um tempo de subida mais ou menos similar a variável temperatura de saída.

O Quadro 49 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *SC* para a variável vazão de vapor onde a condição de primeiro regime permanente, denominado nível zero, é de 30 kg/h.

A análise deste quadro revela que os resultados obtidos para a temperatura de saída na vazão de farinha são igualmente obtidos para a vazão de vapor, resultando com aproximação razoável para segunda ordem com $\zeta = 1,2$. Embora haja uma variação em relação ao ganho medido para a temperatura de saída na variável vazão de farinha, o ganho medido para a variável vazão de vapor é também reduzido, entre 0,07 e 0,16 ^{0}C / kg/h. Os tempos mortos também são reduzidos, de cerca de 2 s a 10 s, mas o tempo de subida é relativamente maior, de 54 s a 168 s, significando maior tempo para o alcance do estado estacionário. Para a variável pressão de saída, repete-se o quadro descrito para a influência da vazão de farinha, no qual é também observada a alternância do sistema entre sub amortecido e super amortecido. Os valores de ganho variam desde 0,4 a cerca de 2,6 psi / kg/h; entretanto, observa-se uma redução para o valor de tempo morto (7 s a 17 s), o que poderia ser aproximado por processos de primeira ordem sem tempo morto, conforme os resultados, mas a mesma variabilidade para o tempo de subida quando comparados com a variável vazão de farinha. O tempo de subida fica entre 84 s e 160 s.

O Quadro 50 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *SC* para a variável vazão de água, onde a condição de primeiro regime estacionário, denominado nível zero, é de 40 kg/h.

Finalmente, a variação na perturbação da vazão de água tem maior influência no valor de umidade da massa a ser extrusada, e conforme já foi identificado na análise dos efeitos no processo, apresenta comportamento de difícil identificação. Realmente, para a variável temperatura de saída tem–se uma boa relação identificada apenas para a segunda perturbação (77%), identificando o sistema como sub amortecido, de ganho aproximado 0,05 ^{0}C / kg/h, reduzido tempo morto (em torno de 4 s) e um tempo de subida também pequeno (34 s). Neste ponto, não se deve assumir o tempo de subida como genérico, mas sim entender que este apresenta significativa variação para a variável vazão de água. Para a

variável pressão de saída, somente para a terceira perturbação é conseguido um bom coeficiente de correlação (87%), novamente definindo o sistema como sub amortecido, de ganho relativamente alto de 1,6 psi / kg/h, significativo tempo morto (entre 5 s e 52 s), e tempo de subida entre 58 s e 170 s. Novamente, esses resultados são pontuais, e devido à variabilidade das outras duas perturbações para essa variável não podem ser generalizados.

Assim, de uma forma geral, obteve-se resultados bastante significativos para aproximar a perturbação em vazão de farinha para a variável temperatura de saída como um processo linear de segunda ordem com $\zeta = 1,2$, com certa não linearidade, mas passível de correções para sistemas lineares. Para a variável pressão, embora o sistema apresente maior variação devido a não linearidade em relação aos parâmetros da curva de reação, ainda pode ser aproximado a um sistema de segunda ordem linear com $\zeta = 1,2$.

Para as demais variáveis, variação na vazão de vapor e vazão de água, tanto para a variável temperatura quanto à pressão de saída, o processo caracterizou-se por comportamento entre sub e super amortecido, com valores que representam a variação não linear para essas duas variáveis do processo.

As Figuras 129 até 146 do Anexo IX apresentam as curvas sigmoidais experimentadas com o respectivo ajuste e reta tangente referente ao melhor ajuste, cujo os valores estão representados nos Quadros 48, 49 e 50 do Anexo VIII, referentes as variáveis vazão de farinha, vapor e água respectivamente para as variáveis de processo temperatura e pressão de saída. Além das observações já discutidas na análise anterior observa-se nas em alguns dos gráficos do conjunto de figuras citado anteriormente patamares com o mesmo valor de temperatura de saída, , principalmente, o que pode ser explicado através da natureza físico – química da extrusão, pois o perfil de viscosidade por não ser constante provoca diferentes graus de escoamento interno dentro do extrusor, o que pode provocar constância em um determinado período de avaliação, bem como saltos ou decréscimo abruptos (este último mais observado para a variável pressão de saída).

III.1.9.1.2) Curva Resposta para a Receita *PP*

O Quadro 51 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *PP* para a variável vazão de farinha, onde a condição de primeiro regime estacionário, denominado nível zero, é de 170 kg/h.

A análise do Quadro 51 do Anexo VIII demonstra uma boa correlação para a variável temperatura de saída para a variação da vazão de farinha, obtendo-se a melhor aproximação para um sistema linear de segunda ordem com valor de $\zeta = 1,2$. Os valores de ganho ficam entre 0,04 e 0,21 ^{0}C / kg/h, sendo que o sistema demonstra baixos valores de tempo morto em torno de 6 s a 12 s e relativamente altos valores de tempo de subida, variando de 153 s a 233 s. Esses pontos atribuem instabilidade, mas não necessariamente não linearidade, em função das proximidades do valor de ganho experimental medido. Para a variável pressão de saída, tem-se correlações consideradas boas, entretanto, o sistema navega entre sub amortecido e super amortecido. Os ganhos são distintos entre si, variando entre 0,7 e 2 psi / kg/h, com tempo morto bastante variável de 15 s a 140 s e tempo de subida de 133 s a 203 s. Portanto, a curva de reação para pressão certamente identifica um grau não linear para este sistema.

O Quadro 52 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *PP* para a variável vazão de vapor, onde a condição de primeiro regime estacionário, denominado nível zero, é de 25 kg/h.

A variação de vapor, segundo a análise do Quadro 52 do Anexo VIII, demonstra razoável aproximação dos modelos relacionados e significativa variabilidade. Para a temperatura de saída, os valores aproximados correspondem ao sistema sub amortecido (ζ = 0,95) e super amortecido (ζ = 1,02 e 1,5). Os valores de ganho estacionário são pequenos, ficando entre 0,02 e 0,06 ^{0}C / kg/h, com tempo morto entre 19 s e 34 s e tempo de subida de 157 s a 186 s. Os resultados de ganho atestam a possibilidade de aproximação para um sistema linear para essa receita na variação da temperatura de saída para a variável vazão de vapor.

Para a variação de pressão de saída, o sistema apresenta um comportamento na sua maioria sub amortecido com $\zeta = 0,95$, entretanto apresentando boa aproximação para um sistema super amortecido de $\zeta = 3$ para uma das perturbações. Os valores de ganho podem ser considerados próximos em torno de 1,4 psi / kg/h, atestando possibilidade de

aproximação dessas variações por modelos lineares, com grande variação de tempo morto (0,8 s a 100 s) e tempo de subida (43 s a 160 s), o que atesta a instabilidade do sistema para a resposta a perturbação dessa variável.

O Quadro 53 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *PP* para a variável vazão de água, onde a condição de primeiro regime estacionário, denominado nível zero, é de 40 kg/h.

A variação de vazão de água, conforme o Quadro 53 do Anexo VIII, demonstra boa aproximação para duas perturbações (primeira e terceira) com relação temperatura de saída e apenas para uma perturbação (primeira) na variável pressão de saída, embora os outros dois resultados possam ser avaliados.

A temperatura de saída varia entre um sistema sub amortecido (ζ = 0,95) para um sistema super amortecido (ζ = 1,2), com valores de ganho estacionário entre 0,05 e 0,07 ^{0}C / kg/h, bem próximos aos observados para a vazão de vapor e vazão de farinha para a temperatura de saída. , tempo morto entre 11 s e 36 s e tempo de subida em torno de 186 s. O valor bem próximo do tempo de subida parece identificar uma repetibilidade na resposta do sistema, o que só não pode ser generalizado pela fraca correlação obtida na segunda correlação (16%), o que mais uma vez demonstra a variabilidade do sistema.

A análise para a pressão de saída parece concentrar o sistema como sub-amortecido, embora, seja observada a melhor correlação para a curva de correlação ao sistema super amortecido com ζ = 1,2. Os valores de ganho são bastante variáveis de 0,8 a 1,5 psi / kg/h, mas certamente bem maiores que os relativos a temperatura, o tempo morto é muito variável, com valores entre 1,3 s e 103 s e o tempo de subida demonstra também uma considerável variação de cerca de 12 s a 189 s. Esses pontos colocam o sistema como não linear e bastante instável para a pressão de saída e vazão de água.

Em suma, a receita *PP* apresentou relações que podem ser aproximadas para modelos lineares de segunda ordem com ζ = 1,2 para a vazão de farinha na variável temperatura de saída, mas que definem uma não linearidade para a variável pressão de saída e certa instabilidade. Para as variáveis, vazão de vapor e vazão de água, o sistema apresenta comportamento variável para o comportamento, mas que pode ser aproximado por modelos lineares na variável temperatura de saída. Já para os valores referentes à pressão de saída, a não linearidade e a instabilidade do sistema são confirmadas pelos dados obtidos.

As Figuras 147 até 164 do Anexo IX apresentam as curvas sigmoidais experimentadas com o respectivo ajuste e reta tangente referente ao melhor ajuste, cujo os valores estão representados nos Quadros 51, 52 e 53 do Anexo VIII, referentes as variáveis vazão de farinha, vapor e água respectivamente para as variáveis de processo temperatura e pressão de saída.

III.1.9.1.3) Curva Resposta para a Receita *Wos*

O Quadro 54 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *Wos* para a variável vazão de farinha, onde a condição de primeiro regime estacionário, denominado nível zero, é de 170 kg/h.

A análise do Quadro 54 do Anexo VIII demonstra a boa aproximação para a variação de temperatura de saída para as três perturbações e para duas perturbações (primeira e segunda) na variável pressão de saída para a variação de vazão de farinha. A temperatura de saída pode ser representada por sistemas sub amortecidos de ζ = 1,2 e 1,02, com valores de ganho de 0,02 a 0,19 ^{0}C / kg/h, com possibilidade de aproximação para um sistema linear. Os valores de tempo morto variam de 10 s a 31 s e o valor de tempo de subida fica aproximadamente entre 186 s e 193 s, indicando baixa instabilidade para essa condição.

A pressão de saída, parece concentrar-se como um sistema super amortecido de ζ = 1,2 e 3, no qual os valores de ganho variam enormemente de 0,02 a 1,7 psi / kg/h, de tempo morto entre 1,6 s e 41 s e tempo de subida de 74 s a 194 s. Os resultados atestam não linearidade e instabilidade para essa variável.

O Quadro 55 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *Wos* para a variável vazão de vapor, onde a condição de primeiro regime estacionário, denominado nível zero, é de 25 kg/h.

A análise do Quadro 55 do Anexo VIII apresenta bons coeficientes de correlação para as três perturbações na variável temperatura e para duas perturbações na variável pressão de saída. Para os dois casos o sistema demonstra um comportamento sub amortecido com ζ = 0,95. Para a temperatura de saída os valores de ganho são reduzidos e ficam entre 0,02 e 0,1 ^{0}C / kg/h, de tempo morto entre 15 s e 38 s e tempo de subida podendo entre 130 s e 178 s.

Estes dados atestam boa estabilidade para este sistema e possibilidade de aproximação para modelos lineares.

Para a variável pressão de saída, os valores de ganho variam de cerca de 0,6 a 5,5 psi / kg/h, com grande variação no tempo morto entre 0,8 s e 52s e tempo de subida entre 7 s e 182 s. Novamente estes valores atestam a possível não linearidade deste sistema para esta variável e respectiva instabilidade.

O Quadro 56 do Anexo VIII apresenta os resultados obtidos para a receita *Wos* para a variável vazão de água, onde a condição de primeiro regime permanente, denominado nível zero é de 40 kg/h.

A análise do Quadro 56 do Anexo VIII demonstra bons coeficientes de correlação apenas para a segunda perturbação (89%) para a variável temperatura, mas com boa correlação para todas as perturbações para a variável pressão de saída. Estes valores confirmam a instabilidade do sistema para a variação de umidade, associado a sua não linearidade. Os valores de ganho ficam em torno de 0,05 ^{0}C / kg/h, o tempo morto é bastante reduzido (0,3 s a 7,8 s) e o tempo de subida entre 10 s e 165 s para a temperatura de saída.

A variável pressão de saída, para este sistema, apresenta tendência ao sistema sub amortecido, com ganhos que variam de 0,8 a 3 psi / kg/h, tempo morto entre de 0 s a 38s e tempo de subida entre 2 s e 178s. Este sistema é marcadamente não linear e instável.

Em suma para a receita *Wos*, a variação de farinha apresenta a maior estabilidade para a variável temperatura de saída, podendo ser conduzida a uma aproximação linear. Também são apresentadas boas possibilidades de aproximação linear para vazão de vapor e água, mas com baixa estabilidade. A variação de pressão para todas as variáveis demonstra instabilidade e perfil não linear.

As Figuras 165 até 182 do Anexo IX apresentam as curvas sigmoidais experimentadas com o respectivo ajuste e reta tangente referente ao melhor ajuste, cujo os valores estão representados nos Quadros 54, 55 e 56 do Anexo VIII, referentes as variáveis vazão de farinha, vapor e água respectivamente para as variáveis de processo temperatura e pressão de saída.

III.1.9.1.4) Parâmetros PID Segundo o Método de Ziegler-Nichols

Os Quadro 17 e Quadro 18 demonstram o cálculo orientativo dos parâmetros de um controlador PID baseado na análise das curvas de resposta para a temperatura e pressão de saída respectivamente nas receitas estudadas no teste Piloto. Esta avaliação segue a metodologia de sintonia proposta por Ziegler – Nichols, conforme foi visto no Quadro 1 da seção (I.3.2.1), empregando os melhores ajustes, grifados, presentes nos Quadros 48 a 56 no Anexo VIII.

Quadro 17: Parâmetros PID segundo Ziegler Nichols para a Temperatura de Saída.

TEMPERATURA DE SAÍDA — *ZIEGLER - NICHOLS 'Stability Margin Controller Tuning Parameters'*

RECEITA SC					*RECEITA PP*					*RECEITA Wos*				
		Parâmetros					Parâmetros					Parâmetros		
FARINHA	Controlador	P	I	D	FARINHA	Controlador	P	I	D	FARINHA	Controlador	P	I	D
125	P	1383,14			150	P	591,81			150	P	90,56		
205		41,25			190		69,31			190		135,60		
245		559,90			210		332,65			210		382,89		
125	PI	1244,83	105,79		150	PI	532,63	24,70		150	PI	89,97	2,75	
205		37,13	1,13		190		60,36	1,94		190		122,04	2,57	
245		503,91	24,34		210		299,39	10,16		210		344,56	4,46	
125	PID	1659,77	235,10	2929,50	150	PID	710,17	64,88	2297,40	150	PID	119,83	6,12	666,53
205		49,51	2,51	244,07	190		107,11	4,30	667,11	190		162,72	5,71	1158,60
245		671,88	54,10	2086,20	210		399,19	22,58	1764,40	210		459,40	9,92	5317,50
VAPOR	Controlador	P	I	D	VAPOR	Controlador	P	I	D	VAPOR	Controlador	P	I	D
22,5	P	418,33			17,5	P	410,06			17,5	P	82,22		
37,5		104,58			32,5		91,37			32,5		97,31		
52,5		496,42			40		770,03			40		432,83		
22,5	PI	376,50	60,40		17,5	PI	369,06	5,79		17,5	PI	74,00	1,27	
37,5		94,53	7,54		32,5		82,24	0,72		32,5		88,57	0,63	
52,5		445,88	15,72		40		693,03	31,55		40		389,55	7,79	
22,5	PID	502,00	134,23	469,37	17,5	PID	492,08	12,86	51,45	17,5	PID	98,66	2,82	864,30
37,5		125,64	6,51	504,31	32,5		109,65	1,62	5,46	32,5		80,77	1,97	16,29,31
52,5		594,60	34,90	2529,60	40		924,04	70,11	280,44	40		519,40	17,31	5896,50
ÁGUA	Controlador	P	I	D	ÁGUA	Controlador	P	I	D	ÁGUA	Controlador	P	I	D
34	P	97,36			32	P	341,01			32	P	161,74		
46		162,90			46A		556,22			46A		300,57		
58		4005,77			46B		2,511			46B		3251,61		
34	PI	876,92	337,28		32	PI	306,90	8,42		32	PI	153,57	22,16	
46		164,51	73,24		46A		500,60	224,15		46A		270,51	10,36	
58		3605,20	249,78		46B		65,71	0,64		46B		2926,46	2632,05	
34	PID	1169,23	749,51	456,00	32	PID	409,21	16,70	2238,36	32	PID	219,09	55,93	212,64
46		219,47	24,42	409,32	46A		667,46	499,11	223,06	46A		360,68	23,03	1412,06
58		4806,93	555,07	10407,00	46B		87,61	1,30	1224,69	46B		3901,94	6293,44	604,80

A análise do Quadro 17 evidencia o item discutido quando a variabilidade do comportamento da resposta do processo de extrusão para diferentes perturbações nas variáveis manipulativas para a temperatura de saída. A vazão de farinha apresenta um valor proporcional 'P' que varia de 49,51 para a receita *SC* até 119,83 para a receita *Wos* no controlador *PID*. Os valores da variável integrativa 'I' vão de 2,51 a 6,12 resultando em uma perspectiva mais estável para a integral do erro. Entretanto os valores observados para a variável derivativa 'D' são bastante distintos: 244,07 para a receita *SC*, 667,11 para a

receita *PP* e 586,58 para a receita *Wos*. Além desses valores serem bastante distintos, a variável derivativa com valores elevados tendência o controlador a efetuar a ação antecipativa muito rapidamente, o que pode seguir um perfil inadequado por uma perturbação momentânea do processo.

A análise para a vazão de vapor apresenta grande variação internamente para os valores de para as três receitas, apresentando tendência a maiores valores da variável proporcional e extrema variação para a variável derivativa. A variável proporcional assume valores que ficam em torno de 125 para a receita *SC*, 110 para a receita *PP* e 80,77 para a receita *Wos*. Os valores integrativos ficam em torno de 6,5 para *SC*, 1,6 para a *PP* e 1,1 para a *Wos*. Entretanto, os valores da variável derivativa decrescem de 604 para 6,48 e crescem para 1529 respectivamente para *SC*, *PP* e *Wos*. Especificamente baseado nestes resultados, para o controle da temperatura quando baseado somente na variável vazão de vapor, o melhor controle seria um modelo *PI*, pois a variável derivativa além de bastante variável, em duas receitas é extremamente alta. Assim como foi observado para a vazão de farinha, somente um valor por receita apresentou resultados mais prováveis para esse processo.

A análise da vazão de água apresenta resultados para a variável proporcional de 219 para a receita *SC*, 87 para a receita *PP* e 218 para a receita *Wos*, o que define um aumento da variável proporcional em relação às vazões de farinha e vapor. Esse resultado embora não deva ser contabilizado quantitativamente tem sentido qualitativo, uma vez que o controle de água é essencial na determinação do perfil de temperatura, atribuindo o maior valor a variável proporcional. Este efeito é mais pronunciado na variável com maior teor de carboidratos: *SC* e variável com maior teor de gordura: *PP*, visto os processos de gelatinização e emulsificação respectivamente envolvidos. Os valores para a variável integrativa apresentam maior variação do que avaliado para as vazões de farinha e vapor, apresentando valores de 29 para a receita *SC*, 1,2 para a PP e 56 para *Wos*, o que pode ser atribuído à complexa influência da umidade para o perfil de viscosidade e característica da massa ao longo do extrusor. Os valores da variável derivativa novamente apresentam significante variação o que indica, baseado, nesses dados a provável indicação de um controlador tipo *PI*.

Embora os resultados tenham sido discutidos sob a ótica de controle convencional, observa-se claramente que os valores são oriundos de apenas uma das perturbações para cada vazão e que estes ainda podem apresentar valores diferenciados dentro do grupo

dependendo da relação entre tempo morto e de subida com o ganho estacionário. A diferença de valores entre os grupos já era positivamente esperada, uma vez que foi observado que estas variáveis avaliadas isoladamente apresentam grau de influência diferenciado para a temperatura de saída. Portanto, quanto à avaliação de um ganho múltiplo, sistema real a ser controlado, a predição de um ganho 'múltiplo' dado pela combinação linear das variáveis isoladamente não terá efeito prático, visto a não-linearidade observada já para a perturbação isolada. Este item é apresentado na seção (III.1.8.2).

Quadro 18: Parâmetros PID segundo Ziegler Nichols para a Pressão de Saída .

PRESSÃO DE SAÍDA — *ZIEGLER - NICHOLS 'Stability Margin Controller Tuning Parameters'*

RECEITA SC		Parâmetros		
FARINHA	Controlador	P	I	D
125	P	10,10		
205		4,40		
245		8,58		
125	PI	9,09	0,12	
205		3,96	0,05	
245		7,72	0,04	
125	PID	12,12	0,26	141,57
205		5,28	0,12	59,73
245		10,30	0,08	312,30
	MÉDIA PID	9,23	0,15	171,20
VAPOR	Controlador	P	I	D
22,5	P	3,61		
37,5		9,10		
52,5		21,17		
22,5	PI	3,24	0,06	
37,5		7,29	0,29	
52,5		19,06	0,62	
22,5	PID	4,33	0,13	36,41
37,5		9,72	0,65	36,12
52,5		25,41	1,38	116,75
	MÉDIA PID	13,15	0,72	63,09
ÁGUA	Controlador	P	I	D
34	P	11,07		
46		10,58		
58		2,06		
34	PI	9,96	0,62	
46		9,52	0,30	
58		1,86	0,01	
34	PID	13,26	1,38	32,00
46		12,69	0,66	61,37
58		2,48	0,02	64,45
	MÉDIA PID	9,48	0,69	52,61

RECEITA PP		Parâmetros		
FARINHA	Controlador	P	I	D
150	P	4,21		
190		0,55		
210		2,31		
150	PI	3,79	0,07	
190		0,50	0,001	
210		2,08	0,01	
150	PID	5,05	0,16	38,86
190		0,66	0,002	46,35
210		2,77	0,01	171,32
		2,83	0,06	85,51
VAPOR	Controlador	P	I	D
17,5	P	0,84		
32,5		38,89		
40		1,37		
17,5	PI	0,75	0,002	
32,5		35,00	11,68	
40		1,24	0,005	
17,5	PID	1,01	0,001	50,52
32,5		46,67	26,93	21,00
40		1,65	0,01	64,37
		16,44	8,65	45,30
ÁGUA	Controlador	P	I	D
32	P	8,28		
48A		0,64		
48B		8,62		
32	PI	7,45	0,08	
48A		0,75	0,002	
48B		7,75	1,62	
32	PID	9,93	0,17	147,63
48A		1,00	0,005	61,56
48B		10,34	4,04	8,62
		7,09	1,40	88,60

RECEITA Wos		Parâmetros		
FARINHA	Controlador	P	I	D
150	P	2,61		
190		45,70		
210		1076,44		
150	PI	2,63	0,02	
190		41,13	7,62	
210		968,80	35,70	
150	PID	3,37	0,04	69,22
190		54,84	16,93	44,42
210		1291,73	79,25	5263,80
		29,11	8,48	66,82
VAPOR	Controlador	P	I	D
17,5	P	16,88		
32,5		0,58		
40		4,17		
17,5	PI	15,19	5,93	
32,5		0,53	0,003	
40		3,76	0,04	
17,5	PID	20,26	13,16	7,80
32,5		0,70	0,01	19,29
40		5,00	0,09	79,55
		8,65	4,41	95,22
ÁGUA	Controlador	P	I	D
32	P	1,59		
48A		6,83		
48B		3226,67		
32	PI	1,43	0,01	
48A		6,15	0,18	
48B		2904,00	872672,07	
32	PID	1,91	0,03	36,93
48A		8,20	0,40	42,11
48B		3872,00	1936000	1,94
		5,05	0,21	39,02

A vazão de vapor apresenta valor da variável proporcional média de 13,15 para a receita *SC*, 16,44 para a receita *PP* e 8,65 para a receita *Wos*, identificando valores com certa proximidade, mas obtidos de um conjunto de dados muito variável, principalmente para as receitas *PP* e *Wos*. A variável integrativa apresenta valores variáveis para todas as receitas, mas com boa proximidade entre as medidas internas para o valor médio de 0,72 para a receita *SC*, maior variação e valor médio de 8,65 para a receita *PP* e também grande

variação e valor médio de 4.41 para a receita *Wos*. Os valores médios da variável derivativa correspondem a 63,09; 45,30 e 35,22 para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente, o que pode ser interpretado como um resultado passível de sintonia. O efeito de vapor demonstra grau de grandeza comparativo a variável proporcional e integrativa calculadas para a vazão de farinha, mas com menor efeito derivativo, o que pode ser diretamente associado com a menor efeito atribuído da variável vazão de vapor para a pressão de saída, possibilitando a antecipação do controle em valores mais suaves.

A vazão de água apresenta valores médios para a constante proporcional de 9,48; 7,09 e 5,05 para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente, que estão no mesmo grau de grandeza das variáveis médias calculadas para as vazões de farinha e vapor. Os valores médios das variáveis integrativas são de 0,69; 1,40 e 0,21 para as receitas *SC*, *PP* e *Wos* respectivamente, no mesmo grau de grandeza quando comparado com as variáveis vazão de farinha e vapor. A variável derivativa é de 52,61; 68,60 e 39,02, evidenciando similaridade com os valores derivativos calculados para a variável vazão de vapor. Esse resultado pode ser associado novamente com a influência menor da vazão de água em relação à vazão de farinha; embora ainda marcadamente superior à influência exercida pela vazão de vapor.

Em conjunto a variável pressão de saída apresenta possibilidade de avaliação para o controle *PID*, mas novamente com variações que são evidenciadas por receitas, na comparação das receitas para a mesma variável e evidentemente quando são comparadas diferentes variáveis manipulativas. A mesma conclusão para a impossibilidade na predição dos efeitos múltiplos pode ser utilizada para a variável pressão de saída, bem como a não linearidade do sistema, que marcadamente apresenta um grau 'mais controlável'quando comparado com a temperatura de saída.

III.1.9.2) Perturbações Simultâneas

Para a caracterização da linearidade do processo é necessário que as perturbações simultâneas promovam uma curva de reação que represente um modelo somatório dos ganhos para as perturbações isoladas. Uma vez que a análise das perturbações isoladas sobre o sistema apresenta comportamento não linear instável, então a soma linear dos efeitos isolados impossibilita a predição do ganho estacionário múltiplo final. Os valores do

controlador *PID* calculados na seção (III.1.8.1.4), provenientes dos ganhos estacionários avaliados experimentalmente evidenciaram este efeito.

Neste estudo não foi realizada uma avaliação específica para o cálculo do ganho para os efeitos múltiplos, isto é a determinação dos valores da constante de ganho e parâmetros de um suposto controlador *PID* para as variáveis manipulativas empregadas na análise de extrusão. Portanto aqui é introduzido um conceito que pode ser empregado para avaliações posteriores, mas que neste trabalho contribui como uma visão qualitativa.

De qualquer forma, para confirmar este efeito observa-se as Figuras 32 e 33 que representam respectivamente o ensaio estatístico *R1(SC)D22* para a temperatura de saída e *R1(SC)D23* para o efeito pressão de saída. Nessas duas figuras os efeitos múltiplos de temperatura, na Figuras 32, e pressão, na Figura 33, são preditos baseado no conhecimento dos efeitos isolados e comparados com o valor real. Como já foi mencionada anteriormente a não linearidade do sistema não permite a predição dos valores de ganho por esta análise. Esta é, aliás, a confirmação de que no processo de extrusão, além dos parâmetros de controle, a análise dos efeitos é igualmente importante, devido a não-linearidade deste processo.

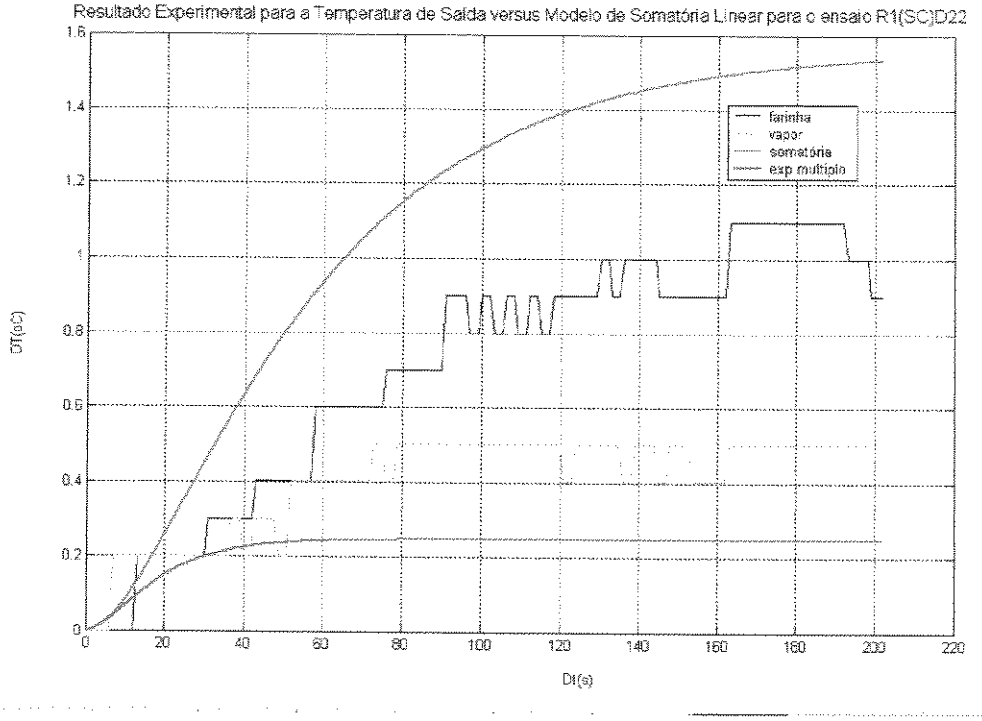


Figura 32: Curva de Reação Predita de Temperatura de Saída para o Ensaio R1(SC)D22.

A Figura 32 mostra que o efeito predito de temperatura de saída (linha azul) pela redução de vazão de farinha (pequena variação na temperatura de saída) e redução de vapor (redução da temperatura de saída) é bem maior do que o efeito observado experimentalmente (linha vermelha). Este fenômeno pode ser explicado, devido à reação química discutida na análise de extrusão, na qual a redução de vazão de farinha reduz a fricção interna no extrusor, auxiliado ao menor inchamento dos grânulos de amido pela menor vazão de vapor o que produz um pequeno aumento estável na temperatura.

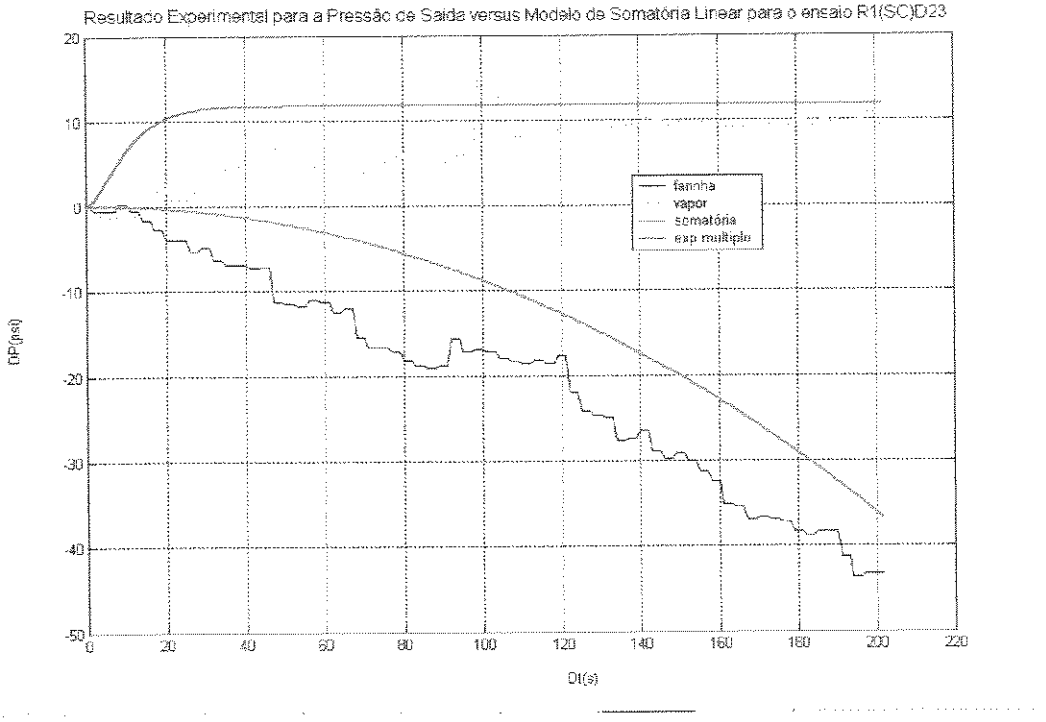


Figura 33: Curva de Reação Predita de Pressão de Saída para o Ensaio R1(SC)D23.

A análise da Figura 33 para a pressão de saída mostra que o somatório da redução da vazão de farinha (redução do valor de pressão de saída) e aumento na vazão de vapor (tendência para a estabilização e leve redução) resultam em um valor positivo e constante para o valor de pressão de saída. Observa-se que a curva que representa a função predita soma linear (linha azul) segue a tendência do maior efeito: a vazão de farinha. Mas o

fenômeno real pode ser explicado pelo excessivo inchamento e gelatinização dos grânulos de amido, o que produz um aumento de viscosidade e portanto de pressão do extrusor, que é balanceado pela redução do grau de enchimento do mesmo, devido à redução da vazão de farinha. Novamente a característica não linear é evidenciada, com possibilidade de reversão dos efeitos isolados.

Da análise dessas das Figuras 32 e 33 o par de variáveis vapor e farinha não é uma boa escolha para o controle de temperatura e pressão conjuntamente. Dessa forma o vapor é associado com a vazão de água e a vazão de farinha colocada como influência isolada no projeto do algorítmo de controle discutido na seção (III.2).

III.1.10) Importância da Análise da Curva Resposta para o Projeto do Controlador

A importância do estudo da curva resposta sob a ótica de controle é determinante para o entendimento do processo para a aplicação da modelagem de controle mais adequada. A temperatura de saída apresentou maior dificuldade para a avaliação dos parâmetros de controle do que para a pressão de saída. A avaliação da vazão de vapor e umidade, tanto para a temperatura quanto para a pressão de saída demonstraram maior dificuldade de análise quando comparadas com a vazão de farinha, evidenciando a maior complexidade dos teores de umidade e energia térmica associados ao processo de extrusão.

Mesmo assim, a análise da curva resposta experimental apresentou extrema importância para o projeto do controlador devido a:

- resultados médios orientativos para os valores de ganho estacionário, tempo morto e tempo de subida, bem como natureza da resposta conforme o sumário apresentado no Quadro 19;

Quadro 19: Resumo das Variáveis para a Curva Sigmoidal Experimental do Teste Piloto

Variável Manipulativa	*Natureza mais provável da resposta*	***Temperatura de Saída***		
		K_E (^{0}C / kg/h)	t_D (s)	tr (s)
Vazão de Farinha	super - amortecido	0,12	10,50	168,74
Vazão de Vapor	indefinido	0,06	16,66	143,43
Vazão de Água	indefinido	0,04	7,44	76,38
Variável Manipulativa	*Natureza mais provável da resposta*	***Pressão de Saída***		
		K_E (psi / kg/h)	t_D (s)	tr (s)
Vazão de Farinha	super - amortecido	1,12	48,46	155,51
Vazão de Vapor	sub - amortecido	1,84	33,07	115,29
Vazão de Água	sub - amortecido	1,38	27,59	105,72

- identificação da não linearidade do sistema através da dos valores apresentados no Quadro 19, dos parâmetros discutidos nos Quadros 17 e 18 e , qualitativamente, pelas Figuras 32 e 33 para as perturbações simultâneas;
- baixa viabilidade do sucesso de um controlador *PID* para este processo, baseado nas observações discutidas na seção (III.1.8.1.4).

O Quadro 19 foi obtido através da média dos valores grifados nos Quadros 41 a 49 do Anexo VIII. Observa-se a indefinição da natureza da curva resposta experimental para as vazões de vapor e água para a variável temperatura de saída; enquanto estas se adequam a um sistema sub – amortecido para a pressão de saída, o que justifica os seus menores valores relativos ao controlador *PID*, a fim de minimizar o valor de ultrapassagem máxima e assegurar um controle mais suave, conforme os valores indicativos das variáveis proporcional, integrativa e derivativa. A variável vazão de farinha apresenta o comportamento super-amortecido, identificando a sua natureza de transformação mais estável.

Os valores médios de ganho estacionário certamente classificam a variável temperatura de alta inércia, com ganho bastante reduzido, pelo menos em torno de 10 vezes menor que o ganho associado a variável pressão de saída. O tempo morto relacionado à pressão é pelo menos 2 vezes maior que o identificado para a temperatura e o tempo de subida um pouco menor. Estes dois últimos parâmetros identificam que a temperatura de saída inicia a responder antes da variável pressão de saída, mas esta última alcança o estado estacionário mais rapidamente. Estes valores conduzem ao raciocínio que a mudança no sistema começa por uma alteração nos valores de temperatura de saída, promovendo a

subseqüente variação nos valores de pressão de saída, que após iniciado tem velocidade superior à temperatura de saída, provavelmente pela sua inércia intrínseca. A relação entre temperatura e pressão de saída no extrusor com a viscosidade da massa do extrusor além de um sistema complexo, de solução algébrica bastante complicada, não é necessária para a aplicação do controlador preliminarmente avaliado neste trabalho.

III.2) TESTE INDUSTRIAL

O teste industrial foi conduzido em um extrusor *Wenger X 185* industrial para operação normal para as receitas *SC* e *PP*. Para a composição do sistema de controle foram utilizados os resultados obtidos neste trabalho no teste industrial: efeitos para o processo de extrusão e resultados obtidos na análise da curva resposta experimental. O teste industrial pode ser dividido em duas partes principais:

- Estudo do Processo;
- Projeto do Controlador.

Trabalhos conduzidos na literatura para sistemas acoplados *MIMO* com *PID's* convencionais como o de Singh e Mulvaney (1994) têm demonstrado limitações na aplicação do controle quando o sistema atravessa perturbações mais drásticas. Dessa forma o controle, baseado em um elemento neural adaptativo, tem como proposta apresentar resultados preliminares que orientem a sua potencial aplicabilidade para o controle de temperatura e pressão de saída do extrusor. Alguns estudos na literatura substituem o uso da pressão de saída pelo torque medido ao extrusor, o que embora altere as unidades de medida segue a mesma tendência associada à pressão de saída, visto o torque ser diretamente proporcional a pressão exercida internamente no extrusor. Este trabalho determinou a escolha da pressão por uma maior sensibilidade desta medida para as variações observadas no extrusor.

III.2.1) Estudo do Processo

O teste industrial baseou-se na disponibilidade da planta para a escolha das variáveis manipulativas, orientado para o modelo o mais simples possível, ao mesmo tempo que se apresenta resultados preliminares. Nesta etapa foram confirmados as tendências do processo de extrusão determinadas no teste piloto, a fim de que fosse reconhecida as faixas de temperatura e pressão de saída adequadas para a densidade desejada. Para esse estudo preliminar não foi considerado a variação de umidade do produto final e teve-se como objetivo básico demonstrar-se a viabilidade do controle de temperatura e pressão de saída do processo, o que conforme já foi determinado relaciona-se com as variáveis que identificam a qualidade do produto final.

III.2.1.1) Proposição dos Ensaios

Assim, inicialmente foi verificada a influência em um sistema industrial das variáveis manipulativas empregadas para esse controlador neural adaptativo: vazão de farinha, vazão de vapor e vazão de água no pré-condicionador. Basicamente as perturbações foram divididas em Isoladas e Simultâneas. O primeiro grupo utilizou um aumento e redução na vazão de vapor, uma redução e depois um aumento na vazão de água e um aumento e depois redução na vazão de farinha.

O grupo referente às variações simultâneas promoveu um aumento das vazões de vapor de 470 para 485 kg/h e de água de 540 para 578 kg/h; seguido de uma redução de 485 para 470 kg/h para a vazão de vapor e 578 para 540 kg/h para a vazão de água. Novamente foi aumentado a vazão de farinha de 8200 para 8400 kg/h. Paralelamente, foram mantidas constantes, conforme a operação daquele dia, as variáveis relativas à injeção de vapor ao extrusor, à camisa de resfriamento e à rotação do helicóide, pela simples facilidade da observação dos resultados, uma vez que para essas variáveis não foram calculados os parâmetros para a curva de reação e pela dificuldade de mudanças no processo sob o ponto de vista operacional e produtivo. Os resultados para as perturbações foram observados em função de temperatura e pressão de saída, e densidade do produto extrusado seco. Os ensaios são demonstrados no Quadro 20.

III.2.1.2) Resultados

O Quadro 20 demonstra os resultados obtidos para o conjunto de perturbações.

Quadro 20: Perturbações SISO para o Teste Industrial.

				VARIAVEIS DE PROCESSO		
Receita		Estado Estacionário		Temperatura (º C) 113	Pressão (psi) 260,7	Densidade Seca (kg/hL)* 41,1
	ENSAIO	Vazões Pertubadas (kg/h)				
PP	1	vapor	335 para 385	113,7	264,3	40,7 e depois 38,3
	2		385 para 360	112,8	264,1 depois 260,3	41,9
	3	água	580 para 530	114,4	270 depois 282	40,9
Pertubações	4		530 para 580	114	depois 270	41,25
ISOLADAS	5	farinha	4400 para 4600	113	266	41,5
	6		4400 parqa 4200	114	310	44,3
				113,8	278,8	40,5

* Valor empregado para relacionar a região ótima de controle.

				VARIAVEIS DE PROCESSO		
		Estado Estacionário		Temperatura (º C) 76	Pressão (psig) 490	Densidade Seca (kg/hL)* 37
	ENSAIO	Vazões Pertubadas (kg/h)				
SC **	7	vapor e	470 para 485	constante 76	488 para 480	37 a 38
	8	água	540 para 578			
Pertubações	9	vapor e	485 para 470	constante 76	480 para 490	37 a 38
SIMULTÂNEAS	10	água	578 para 540			
	11	farinha	8200 para 8400	76,4	492	39

** Utizado camisa de refrigeração e vazão de vapor na extrusora de 175 kg/h

As variáveis temperatura e pressão de saída foram relacionadas aos valores de densidade do produto, neste caso após o processo de secagem, aceitável para a produção da receita *PP* e *SC*. Estes valores definem a região estacionária, correspondendo os parâmetros para o qual o controlador irá receber como 'set–point' especificamente para receita, visto a dependência da faixa ótima de temperatura e pressão de saída conforme a receita empregada.

As perturbações número '2' , referente a uma redução da vazão de vapor e 3, referente a vazão de água, apresenta valores intermediários para a pressão de saída, antes de alcançarem o resultado final. O mesmo ponto é observado na avaliação para a densidade na perturbação número '1'. Os valores observados são comparados com os valores estacionários, grifados no Quadro 20.

III.2.1.3) Análises

Observa-se pelas respostas verificadas no Quadro 20 que o aumento da vazão de vapor isoladamente tem um efeito direto para a temperatura e inverso para a pressão de saída, reduzindo o valor de densidade basicamente pela redução no valor de viscosidade final da massa após o aumento inicial de fricção pelo maior inchamento dos grânulos de amido no canhão de extrusão. Observa-se que o valor de pressão diminui em função da redução final de viscosidade. A variação de densidade foi observada como efeito inverso à vazão de vapor, provavelmente pela maior associação com a mudança de viscosidade relacionada a essa variável. Este efeito pode ser observado na Figura 34, onde confirma-se a influência analisada acima.

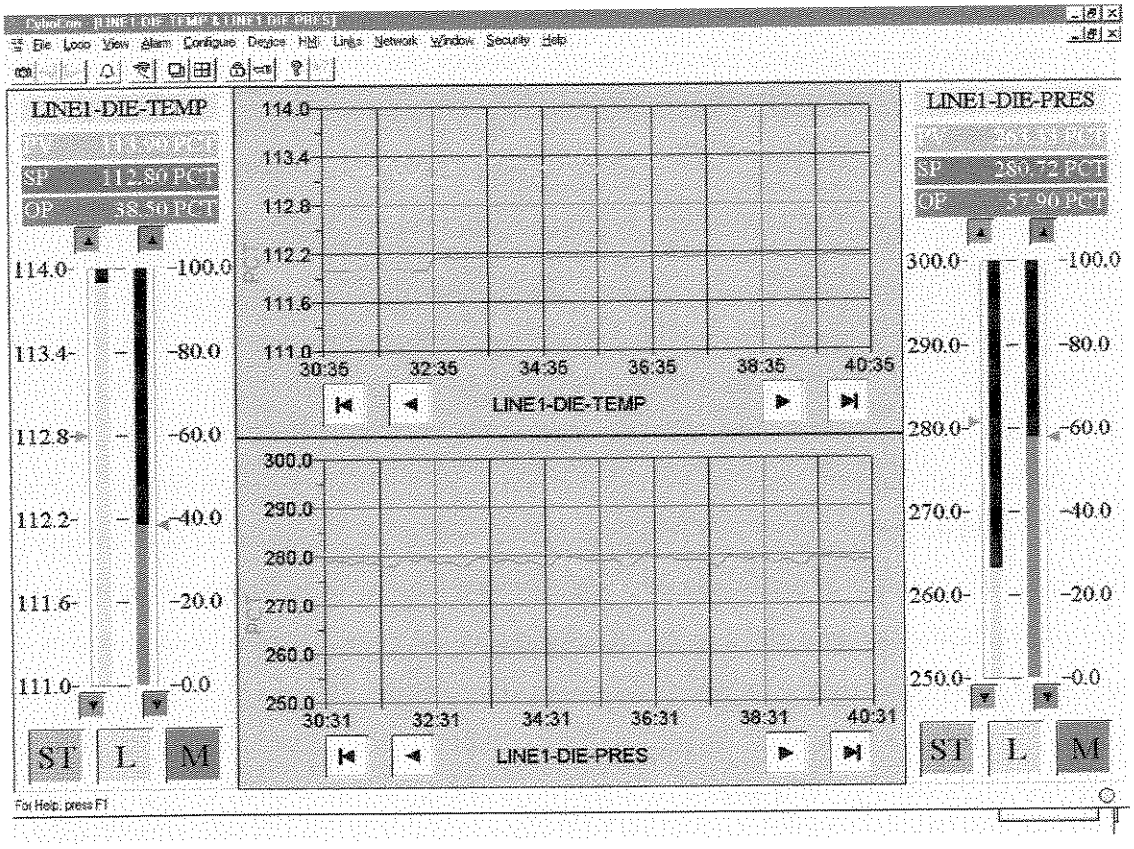


Figura 34: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a Adição de Vapor em kg/h para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial.

A Figura 34 mostra no gráfico superior a relação entre a ordenda em temperatura de saída e abscissa que mede o tempo real em segundos. No gráfico inferior a única deferença

é a avaliação da variável pressão de saída. Neste caso a linha verde representa o comportamento do sistema em malha aberta.

A vazão de alimentação de água apresentou efeito inverso para a variação de temperatura e efeito inverso para a pressão de saída, entretanto com um aumento mais pronunciado da pressão para a redução de água e depois a obtenção de um estado estacionário menor que o inicial observado, provavelmente pelo maior aumento de viscosidade inicial, seguido pelo aumento de torque, o que reduziu a viscosidade e a temperatura, bem como um pouco a pressão de saída.

De qualquer forma, o importante desse efeito é a complexidade associada à umidade do sistema. A redução de alimentação de água pelo efeito explicado acima de redução de viscosidade, diminui a densidade; enquanto o aumento da vazão de água provoca um decréscimo de pressão de saída, o que diminui a expansão ao produto, contrinuindo para o aumento do valor de densidade. Mesmo com a redução inicial de viscosidade pela adição de água observado no ensaio '3' do Quadro 20, a densidade não é diminuída e sim aumentada porque a densidade não é uma função única da viscosidade, devendo ser considerados fatores como a específica energia mecânica associada ao sistema (Singh e Mulvaney, 1994).

A vazão de alimentação de farinha demonstrou um resultado direto para pressão e temperatura, uma vez que para esse controlador foi empregada a adição de farinha sem a adição paralela de vapor e umidade, a fim de representar os resultados dos efeitos estudados no teste piloto. Basicamente esse efeito pode ser explicado pelo maior enchimento atribuído ao extrusor, aumentando a fricção e pressão interna medidas. A vazão de farinha apresentou uma relação direta para a densidade medida, provavelmente pela maior deformação do produto na saída do extrusor do que variações associadas a viscosidade, uma vez que não foi verificado expansão para o produto. O efeito relacionado para a temperatura de saída pode ser observado na Figura 35, na qual o gráfico superior tem representado na ordenada a temperatura de saída e na abscissa o tempo em segundos; enquanto o gráfico inferior representa na abscissa o valor do aumento percentual da vazão de farinha. A linha verde apresenta o comportamento do sistema em malha aberta para a temperatura de saída e o valor da vazão de farinha.

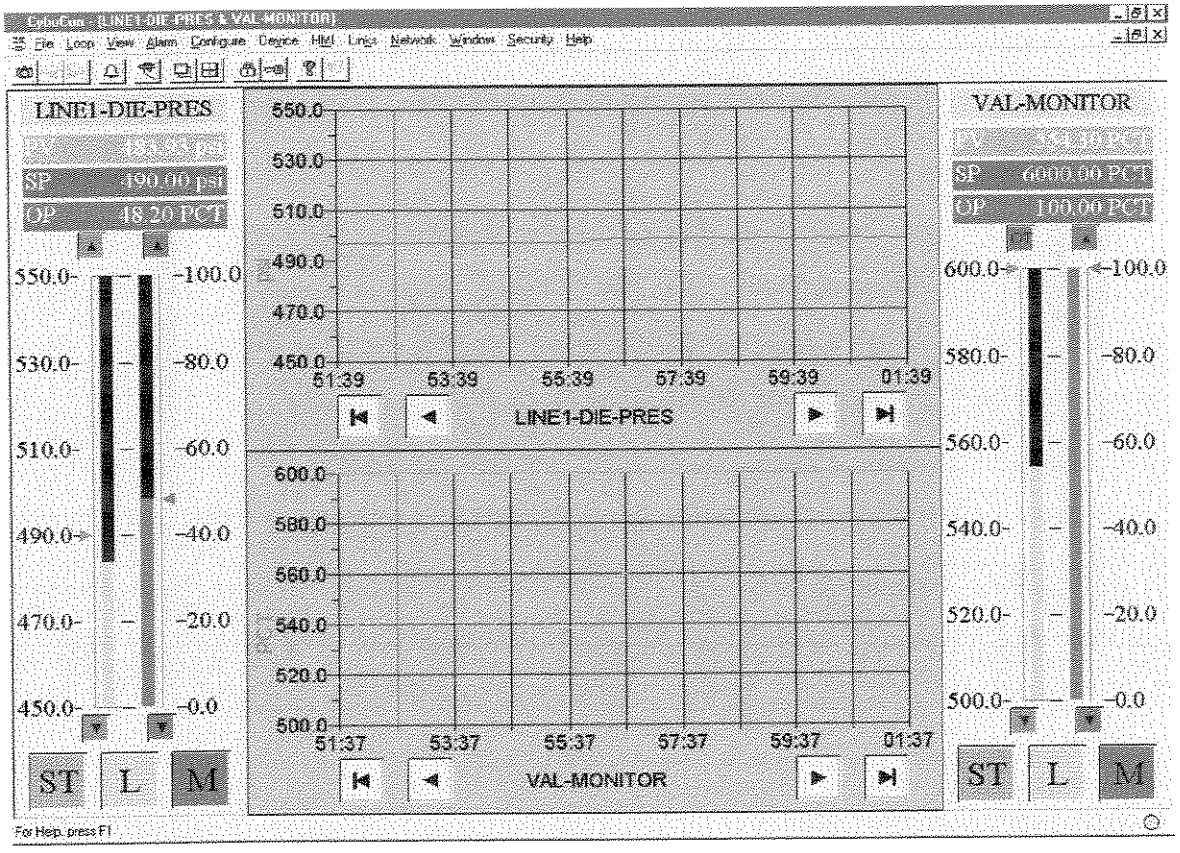


Figura 35: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a Adição de Farinha em ton/h para a Variável Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial.

A adição conjugada de vapor e água na receita *SC* apresentou um resultado com pouca variação para a temperatura de saída, provavelmente verificada pela influência oposta entre esses dois efeitos e inverso para a variação de pressão de saída, conforme esperado pela análise dos efeitos individuais. A variação de densidade teve um leve acréscimo, provavelmente impulsionado pela adição de água ao sistema.

O efeito para a pressão de saída é mostrado na Figura 36, na qual o gráfico superior mostra a relação entre a pressão de saída na ordenada e o tempo real em segundos na abscissa. No gráfico, inferior a única diferença é a avaliação da redução da vazão de vapor e água, que neste caso devido a proporcionalidade entre água representa somente a vazão de vapor. A linha verde apresenta o comportamento do sistema em malha aberta para a pressão de saída e o valor da vazão de vapor.

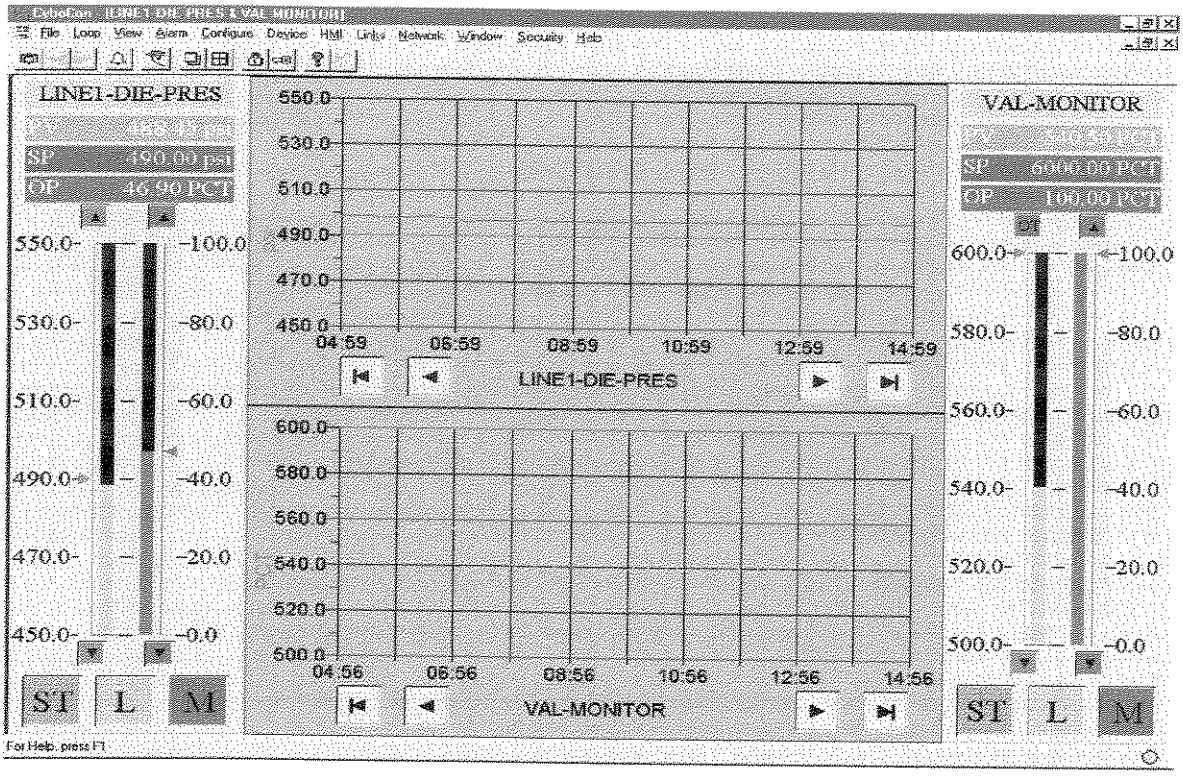


Figura 36: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a redução de Vapor e Água em kg/h para a Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial.

Observa-se que foi criado no controlador *MFA* a variável vapor e água, que na verdade associa a qualquer aumento de vapor ou redução, o mesmo efeito proporcional para a vazão de água, como será abordado na discussão do projeto do controlador na seção (III.2.2).

A adição de farinha para esta mesma receita apresentou resultados similares aos discutidos para a receita *PP*. O resultado para a pressão de saída é apresentado de forma gráfica na Figura 37, onde no gráfico superior a ordenada representa a pressão de saída e a abscissa o valor de tempo em segundos. No gráfico inferior a ordenda representa a linha de estabilização após o aumento da vazão de farinha. A linha verde representa a variação do sistema para a pressão de saída e os valores de vazão de farinha.

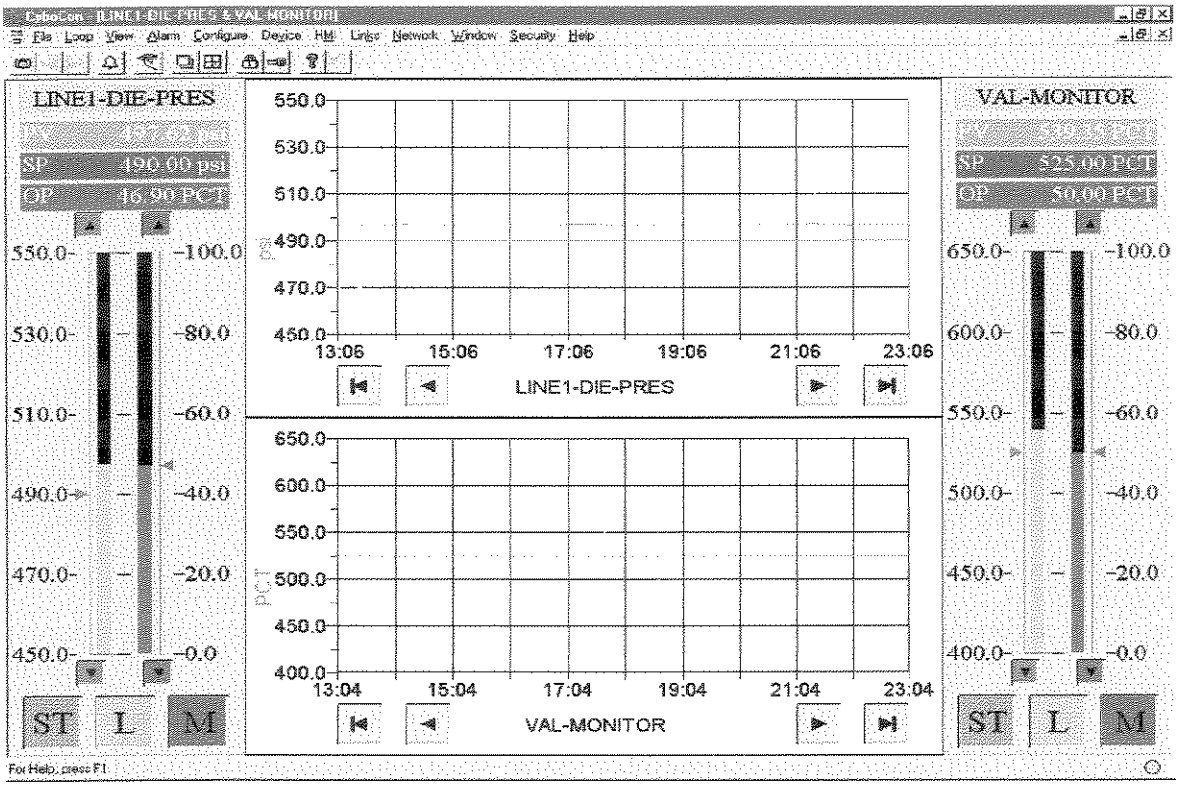


Figura 37: Curva de Reação do Processo em Malha Aberta para a adição Vapor e Água em kg/h para a Pressão (psi) de Saída no Teste Industrial.

O Quadro 20 aplica os valores apenas indicativos das variáveis manipulativas, para a observação das variáveis temperatura e pressão para o sistema sem acoplamento e sem qualquer aplicação de controle efetivamente. Portanto para esta análise foi apenas observado o sistema em malha aberta para a confirmação do provável projeto do algorítmo, discutido na seção seginte.

As Figuras 34, 35 , 36 e 37 confirmam a operação do sistema em malha aberta pela indicação do terceiro botão a direita do lado inferior esquerdo referente ao gráfico superior e do lado inferior direito referente ao gráfico superior, 'M', que indica controlador em módulo manual.

III.2.2) Projeto do Controlador

O projeto do controlador foi baseado na interpretação de todos os resultados experimentais obtidos no Teste Piloto e o resultado obtido nos ensaios experimentais para o teste Industrial relacionados à variável densidade do produto.

III.2.2.1) Bases para a Definição do Algorítmo de Controle

Os resultados avaliados nas seções (III.1 até III.1.7) e os efeitos discutidos na seção (III.2.1) empregados para o projeto do algorítmo de controle foram:

1- dependência significativa da temperatura e pressão de saída para a densidade do produto extrusado úmido;

2- emprego da variável vazão de farinha com efeito *DIRETO* forte para a temperatura de saída e *DIRETO* médio para a pressão de saída;

3- emprego da vazão de vapor e água com efeito *VARIÁVEL* fraco para a temperatura de saída e forte *INVERSO* para a pressão de saída;

4- confirmação do perfil de viscosidade através da análise de temperatura ao longo do extrusor.

A análise do item (1) basicamente atribui a avaliação da densidade do produto extrusado aos valores de temperatura e pressão de saída, que são definidos como 'set points' para o controlador *MFA*. Assim como para quaisquer controladores, os valores de 'set point'podem ser alterados por modificações devido a:

- mudança nos valores de especificação;
- alteração na tecnologia ou equipamento para o processamento;
- mudança da matéria – prima a ser processada.

Segundo a interpretação dos itens acima entende-se que tanto temperatura quanto à pressão de saída podem sofrer alterações nos valores que definem a faixa ótima (faixa especificada pelo fabricante para o produto final) quando houver mudanças significativas nas:

- receita a ser extrusada;
- tamanho de partícula a ser extrusado;
- tipo de pré-condicionador
- configuração mecânica do extrusor como tipo de helicóide e 'sulcos' internos da camisa do extrusor;
- área total de abertura para o produto extrusado;
- tamanho do orifício do produto a ser extrusado;
- modelo do extrusor;
- vazões de farinha aproximadamente constantes.

Para os itens listados acima, apenas a receita é normalmente alterada nos processos de produção industrial, visto a maximização da vazão de farinha, que é mantida constante, com baixa variabilidade, ser essencial para a viabilidade comercial do produto produzido. Além dessas duas alterações, a utilização de injeção de vapor na camisa do extrusor, resfriamento da camisa e mudança de eixo da rotação de eixo do extrusor são fatores comumente empregados pela maioria dos operadores nos processos produtivos. Entretanto estes operadores apresentam a clara tendência a não alterar estes valores, especialmente a rotação de eixo após a partida do processo.

Então, a proposta deste conjunto de variáveis dependentes (temperatura e pressão de saída) emana também da experiência operacional, onde após a partida do processo procura-se alterar-se o mínimo possível variáveis exceção feita às vazões de farinha, vapor e água para o pré-condicionador, sendo necessário:

- Estabelecer a região correspondente de temperatura e pressão de saída para a receita empregada e condições de processo descritas anteriormente, o que com certeza é um processo de contínua otimização.

O estabelecimento de uma região de controle é baseado - ao inverso de controles convencionais, onde a curva dos dados controlados em relação ao 'set – point' deve apresentar erros bastante pequenos, baseado na característica que faixas específicas (pequenas) de temperatura e pressão de saída irão produzir densidade aceitável (dentro dos limites de especificação) para o produto extrusado.

A análise dos itens (2) e (3) complementa o raciocínio iniciado para a análise do item (1), onde basicamente demonstra-se através do estudo desenvolvido para as principais variáveis empregadas na extrusão a forte importância da vazão de farinha para a temperatura de saída e da vazão de água e vapor para a pressão de saída do extrusor. Associado a isso o efeito contributivo positivo da vazão de farinha para a pressão de saída e variável para a vazão de vapor e umidade.

Tanto a temperatura quanto à pressão de saída tendem a aumentar quando o processo aumenta os valores de vazões de farinha para o extrusor. Mas a taxas definidas operacionalmente existe a tendência ao equilíbrio entre os efeitos listados para as variáveis vazão de farinha e vazões de farinha e água, o que ainda permite certo ganho nos valores médios de vazões operacionais, mantendo o controle de densidade do produto final.

A vazão de farinha é o principal fator para a extrusão, por ser o material que sofre o processamento apresentar a incomparável vantagem de exercer adição de energia (térmica e mecânica) para um reduzido tamanho de partícula da farinha, justificando a enorme eficiência da extrusão, baseado no baixo tempo de residência para transformar altas taxas volumétricas de material seco em produto processado. Portanto, quanto maior o aumento da vazão de farinha ou grau de enchimento do extrusor, melhor o rendimento do processo, tendo-se como objetivo básico manter-se o equilíbrio para a vazão de farinha e as vazões de água e vapor ao pré-condcionador (bem como rotação de eixo, injeção de vapor à camisa e resfriamento da mesma para o extrusor).

Esse conjunto de interações apresenta dois limites bastante definidos:

- manutenção da especificação dos parâmetros de qualidade;
- máximo torque para a potência instalada do motor do extrusor.

O controlador desenvolvido nesta análise visa a solução para o controle de densidade, que também é influenciada pelo segundo item, uma vez a forte relação entre energia mecânica específica e densidade do produto. Esta relação é validada pelo valor de torque que é proveniente da reação de gelatinização de carboidratos e desnaturação protéica responsáveis pela formação bio–polimérica ao longo do extrusor, definindo o perfil viscoelástico deste material.

Assim o item (4) analisado é a conseqüência dos itens (2) e (3), uma vez que este perfil de viscosidade ao longo do extrusor é responsável pelo torque a ser fornecido pela instalação elétrica. E, devido à avaliação das curvas de temperatura, a não linearidade do

processo constitui-se em fator complexo para a aplicação de controladores convencionais tipo *PID*.

Uma forma complementar de se avaliar o processo de extrusão, associando o conceito de otimização energética pode ser sumarizada na mínima utilização de torque possível para a máxima vazão produtiva, mantendo-se a qualidade final do produto extrusado.

III.2.2.2) Controlador *MIMO 2 X 2*

De acordo com os resultados discutidos na seção (III.2.2.2) foi proposto o algoritmo de controle definido na Figura 38.

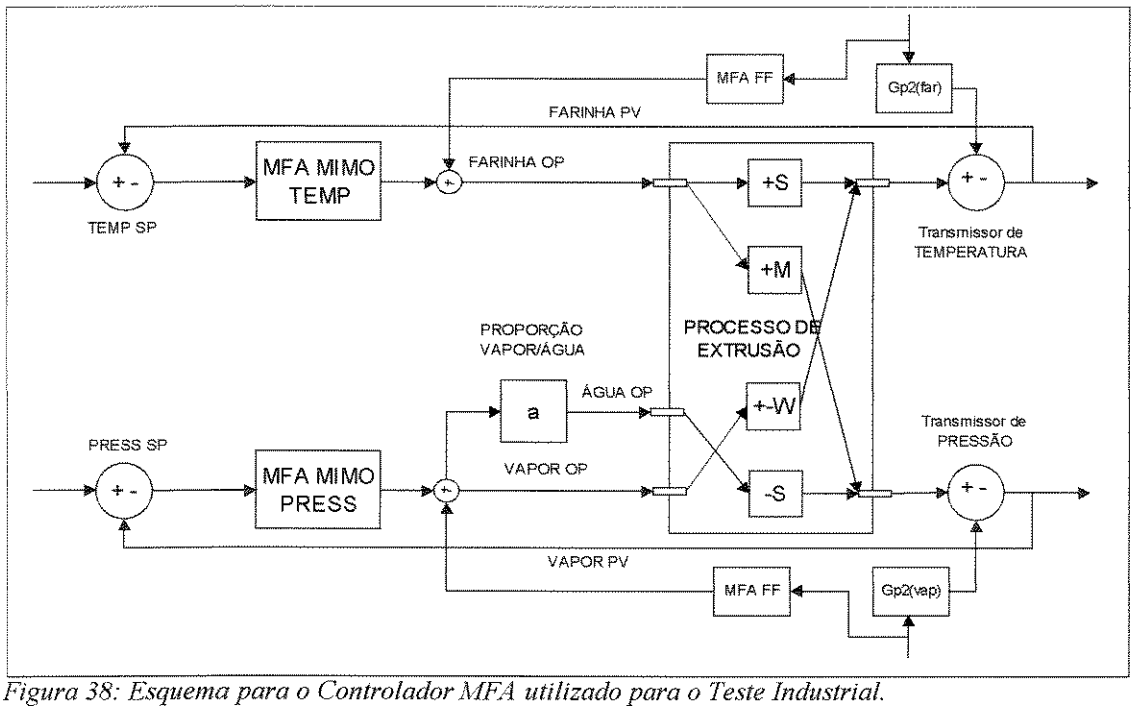


Figura 38: Esquema para o Controlador MFA utilizado para o Teste Industrial.

A análise da Figura 38 demonstra o projeto completo do controlador empregado, que baseado nos resultados experimentais e na Figura 39, confirma a pequena variação para temperatura de saída para a adição conjugada de água e vapor. Assim pode-se definir a variável proporção entre vazão de vapor e umidade com fraco efeito variável para a temperatura e efeito indireto forte para a pressão de saída. Para o algoritmo de controle foi alimentada a variação positiva fraca para a temperatura de saída com relação à vazão de

vapor e água. Salienta-se que a proporção entre vapor e água não foi variada depois de definido o estado estacionário, sendo a variação proporcional dada pelo aumento no valor da vazão de vapor, conforme pode ser observado nos gráficos apresentados na Figura 39.

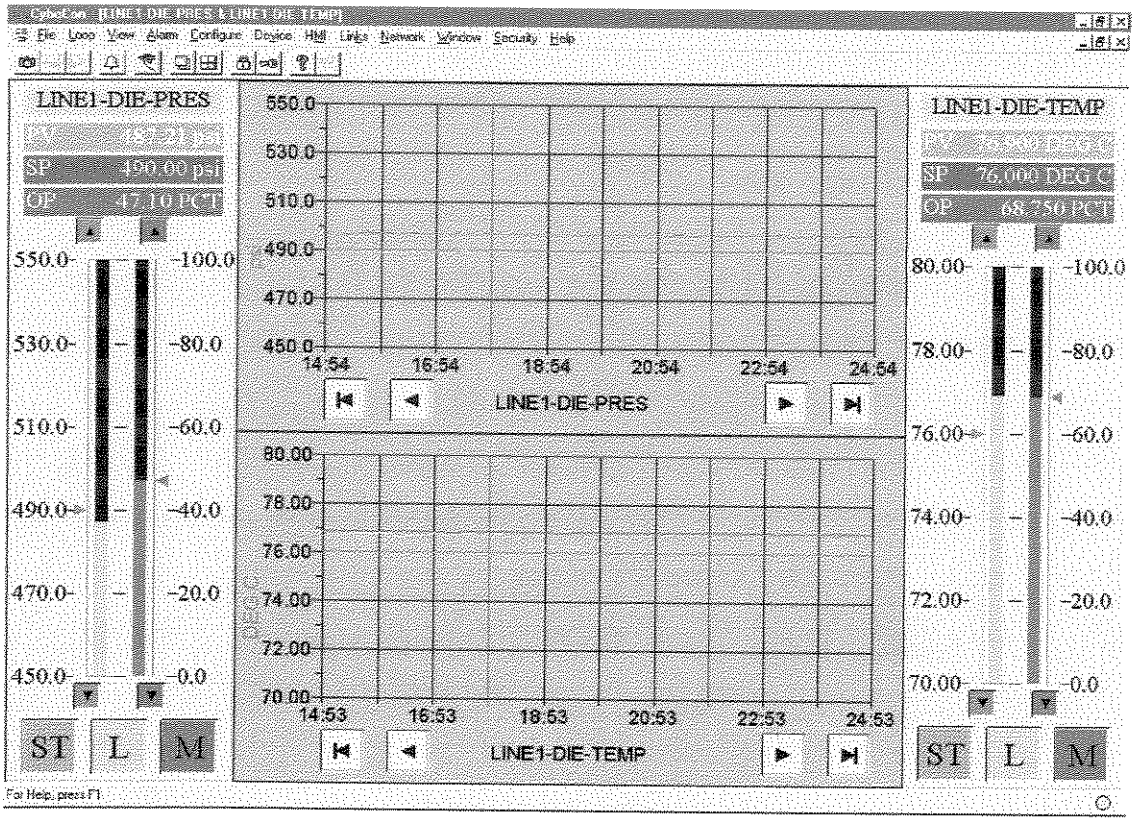


Figura 39: Tendência do Processo em Malha Aberta para a Redução de Vapor e Água em kg/h para a Temperatura (^{0}C) e Pressão de Saída (psi) no Teste Industrial.

A Figura 39 confirma a análise utilizada para a avaliação da influência do teor de umidade do sistema e vazão de vapor. Embora estas duas variáveis tenham efeitos isolados com tendência a instabilidade, a variação conjugada das mesmas promove um efeito compensatório para a temperatura e pressão de saída do sistema. A Figura 39 mostra no gráfico superior a pressão de saída, com leve tendência de queda e no gráfico inferior a temperatura de saída com razoável estabilidade após a redução nos valores de vapor de 485 para 470 kg / h e de vazão de água de 578 para 540 kg / h conforme foi mostrado no Quadro 20 da seção (III.2.1.2).

Esta observação possibilitou a inclusão de vapor como uma única variável manipulativa, colocada com um controle interno de 'ratio'ligado à vazão de água.

A variável vazão de farinha foi desenhada com forte efeito direto para a temperatura e efeito direto médio para a pressão.

Portanto o conjunto das variáveis vazão de farinha e vazão de vapor e água associados à temperatura e pressão de saída com seus efeitos principais e secundários definiram o algorítmo *MIMO (2 X 2)* empregado para o controle do extrusor. Para este sistema foram acoplados dois sistemas 'feedforward', um para a variável vazão de farinha e o outro para a vazão de vapor ao sistema, a fim de compensar possíveis erros associados a bruscas variações no processo, baseado não em um modelo matemático, mas sim no comportamento do controlador linear. Finalmente este módulo de controle linear foi projetado para operar com bloco auxiliar contendo tempo morto e opção para processo não linear.

O funcionamento do controlador *MFA* não é totalmente esclarecido e também não é objetivo deste estudo fazer uma avaliação profunda do mesmo, mas sim a observação da sua aplicação.

A Figura 40 mostra a configuração do algorítmo interno de controle adaptativo neural utilizado no bloco funcional do controlador *MFA*.

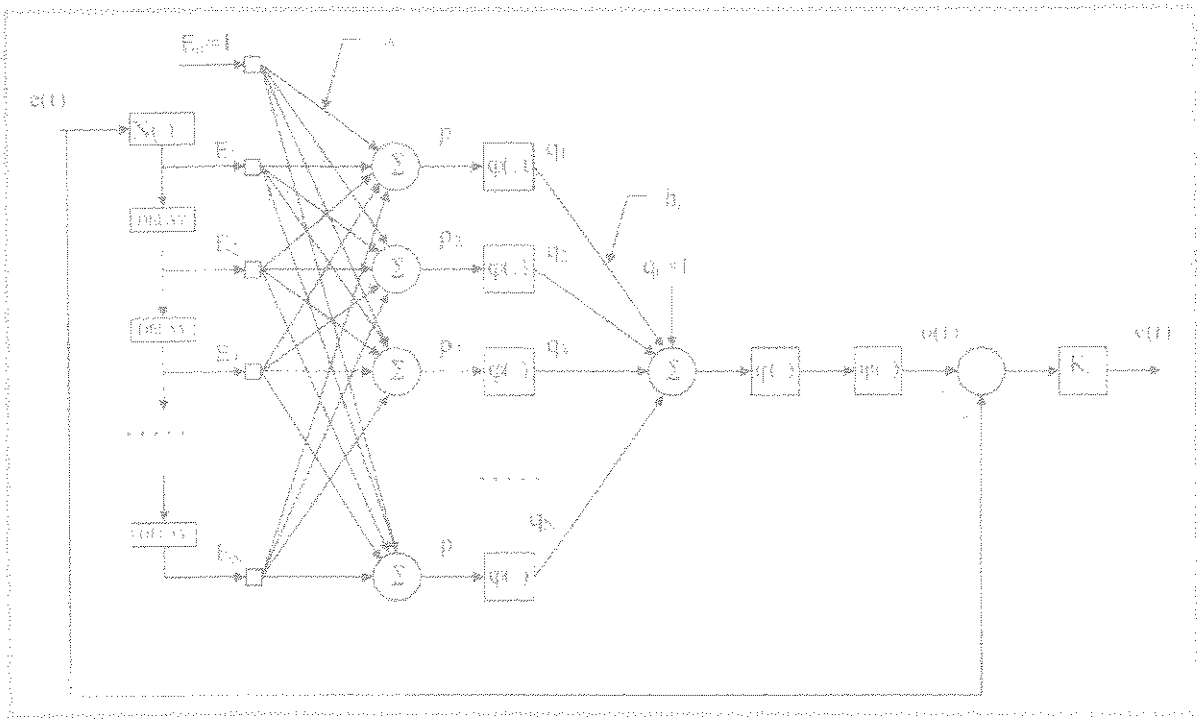


Figura 40: Esquema Interno do Controlador Model Free Adaptative (MFA)

A análise mais detalhada da Figura 40 mostra que o controle *MFA* baseia a sua análise de controle na função erro entre o valor de 'set – point' ($e(t)$) e da variável de processo ($o(t)$). Então, a fim de minimizar o erro, promove-se a manipulação das variáveis independentes ($v(t)$) para garantir a manutenção do valor desejado da variável dependente. Entretanto, ao contrário de controladores *PID*, o módulo neural *MFA* analisa o histórico de dados e erros gerados nos N intervalos analisados anteriormente. Este processo faz com que o controle observe a dinâmica do processo e ao invés de incorporar esta como um modelo fixo, usa a informação 'aprendida' para o próximo ciclo de controle, conforme a malha neural mostrada na Figura 40.

A rede neural mostrada apresenta os parâmetros φ e ψ que desempenham a função de filtros para as diversas funções somatório Σ produzidas a cada ciclo N de controle e relacionadas através do histórico dos erros E gerados com relação ao valor de 'set- point'. A capacidade do sistema de 'aprender' com o valor e tendência dos erros gerados é observada é computada pelos fatores de peso ou distribuição representados pelo símbolo W_{ij}.

A dinâmica sinequanon do controlador pode ser sumarizada na continua avaliação do comportamento do processo pelos fatores de peso, o que explica a natureza adaptativa operacional do controlador para o final de cada ciclo de controle. O mecanismo que possibilita a ação dos fatores de peso é intrinsecamente calculado dentro da rede neural que armazena os dados de erro obtidos nos últimos ciclos de controle através dos blocos 'DELAY' (ver Figura 40), que colocam cada nova medida como a mais recente informação da rede neural, movendo cada um dos ciclos precedentes um nível abaixo na rede. Assim, esses valores são multiplicados pelos fatores de peso, de natureza variável, somados e após passarem pelos filtros, é produzido o sinal de saída 'output' $o(t)$, o qual é adicionado ao corrente erro medido $e(t)$ em relação ao 'set – point', multiplicado pelo ganho estacionário K_c selecionado para o sistema e, finalmente, resultando na ação de controle $v(t)$.

III.2.2.3) Sintonia do Controlador

A módulo empregado do controlador *MFA* para o controlador *MFA* conforme o algorítmo proposto na Figura 38, necessitou a informação de três parâmetros principais para o módulo de temperatura e pressão aplicado as variáveis manipulativas:

- os ganhos estacionários k_E para os efeitos principais e secundários;
- os valores correspondente de tempo morto t_D;
- os valores correspondentes de tempo de subida *tr*.

Assim, através da utilização como referência do Quadro 19 referente aos parâmetros relacionados pela curva experimental de resposta 'sigmoidal', orientou-se para os valores dos efeitos principais. Os efeitos secundários foram estabelecidos com valores de ganho menores, a fim de diminuir a intensidade da perturbação na malha neural.

Depois de algumas tentativas e erros, ajustou-se o valor de ganho estacionário para o efeito direto da vazão de farinha a 0,05 ^{0}C / kg/h para a temperatura de saída e 0,4 psi / kg/h para o efeito reverso de vazão de vapor e água para a pressão de saída. Observa-se o valor do ganho para a pressão é cerca da terça parte dos resultados experimentais, mas foi escolhido a fim de atribuir uma performance mais suave de controle, uma vez que foi acoplado um sistema feedforward para a vazão de vapor, suportado também pelo alto valor da variável derivativa do teórico controle *PID* mostrado no Quadro 18 da seção (III.1.8.1.4).

Os valores do ganho para os efeitos secundários, isto é, o efeito direto da farinha para a pressão de saída e o efeito direto da vazão de vapor para a temperatura foram 0,04 psi / kg/h e 0,1 ^{0}C / kg/h respectivamente. O primeiro valor foi determinado a fim de reduzir o grau de contribuição da vazão de farinha para a pressão, visto a sua mudança não mais isolada como foi determinado no cálculo da curva resposta experimental; e o segundo certamente representa o efeito conjugado levemente positivo (conforme Figura 39) para a temperatura de saída quando são alteradas as vazões de vapor e água no mesmo sentido. O símbolo de efeito variável na Figura 38 para a perturbação secundária da vazão de vapor e água para a temperatura de saída induz o controlador a maior tendência de reavaliação dos fatores de peso na rede neural após a estimativa do erro em relação ao 'set-point'.

Utilizando os parâmetros acima pode-se completar os blocos funcionais do controlador *MFA*:

1) Bloco *MIMO* para a temperatura de saída, conforme a Figura 183 no Anexo X.

A definição do bloco de controle para a temperatura de saída ('LINE1-MIMO-DIETEMP') no algorítmo *MIMO 2 X 2* está baseada nos valores do ganho estacionário para as duas variáveis manipulativas, onde *Kc1* = 0,05 ^{0}C / kg/h e *Kc2* = 0,04 ^{0}C / kg/h referem-se respectivamente aos valores da vazão de farinha e vazão de vapor e água para a temperatura de saída. Na Figura 183 do Anexo X ainda observa-se os valores de tempo morto ('Delay Time') para a temperatura de saída, usado como 20s e cerca de 300s para o tempo de subida ('Time Constant'). Este último foi considerado mais conservativo que o resultado experimental (máximo de 169 s) a fim de promover uma ação de controle mais suave para o equipamento industrial.

Os valores de 'PV' indicam os limites mínimo e máximo usados para a temperatura de saída, que neste caso foram 60 ^{0}C e 115 ^{0}C respectivamente. O valor de set-point 'SP' e alarme 'PV'(Alarm) seguem os mesmos parâmetros.

Este bloco de controle recebe o sinal de temperatura de saída do *CLP* denominado neste algorítmo de 'LINE1-MEAL-PV', visto estar associado com o efeito principal relativo a vazão de farinha.

2) Bloco *MIMO* para a pressão de saída, conforme a Figura 184 no Anexo X.

A estrutura do bloco de controle para a pressão de saída ('LINE1-MIMO-DIEPRESS') segue o mesmo perfil descrito para o controle de temperatura de saída, no qual *Kc1* = 0,4 psi / kg/h e *Kc2* = 0,1 psi / kg/h respectivamente para a vazão de vapor e água e farinha. O tempo morto empregado foi de 50 s, próximo ao máximo tempo morto avaliado experimentalmente (48 s) e o tempo de subida 200 s, que foi um pouco superior ao valor máximo determinado pela avaliação da curva resposta (156 s). A única diferença marcante neste bloco de controle é dada pela ação inversa que relaciona a ação do ganho *Kc1*. Os valores limites inferior e superior para as variáveis 'PV', 'SP'e 'PV(Alarm)' foram 450 e 550 psi respectivamente.

Este bloco recebe o valor de pressão de saída do *CLP* pelo bloco denominado 'LINE1-STEAM-PV', visto o efeito principal da pressão de saída estar associado com a

vazão de vapor. O sinal de entrada deste bloco foi conectado com o sinal de entrada do *CLP* ('LINE1-STEAM-OP'), a fim de que se o sistema for colocado em manual o controle acumule o último sinal para a vazão de vapor enviado. Como o sistema é acoplado, também será usado o último valor de vazão de farinha enviado como sinal de controle.

A Figura 185 do Anexo X mostra o controle 'feedforward' usado para a variável de saída do controlador *MIMO 2 X 2* da vazão de farinha ('LINE1-MEAL-OP') e vazão de vapor ('LINE1-STEAM-OP').

O ciclo de controle utilizado pode ser resumido na seguinte lógica:

- O bloco de controle acoplado de temperatura e pressão de saída MIMO 2 X 2 MFA recebe o sinal de saída de temperatura e pressão de saída, emitido pelo transmissor de 4-20 mA, é convertido em sinal digital pelo *CLP*. Então este sinal é enviado ao bloco de auxiliar de controle no MFA como 'LINE1-MEAL-PV' e 'LINE1-STEAM-PV' para este algorítmo, via endereço eletrônico por uma plataforma qualquer (no caso *Intouch*) denominado *TAG*. O sinal 'PV'é então lido pelo modulo *MIMO 2 X 2* chamado neste algorítmo de 'LINE 1-MIMO-DIETEMP'e 'LINE1-MIMO-DIEPRESS';

- O controlador *MFA* compara os valores lidos com os valores estipulados para 'set-point'e pela lógica presente no algorítmo, envia o sinal da ação de controle percentual (0 – 100%) para as variáveis vazão de farinha e vapor, denominado agora 'OP'. Neste algorítmo foram denominados 'LINE1-MEAL-OP' para a temperatura de saída e 'LINE1-STEAM OP' para a pressão de saída;

- O sinal 'OP' é então enviado do módulo *MFA*, sendo feita as conversões para as unidades de engenharia. Este novo *TAG* criado, é recebido no *CLP* e é enviado, após passar por um conversor digital / analógico, como ação de controle para a célula de carga no caso da vazão de farinha e válvula no caso da vazão de vapor. A vazão de água foi ligada ao sinal de saída *MFA* para o vazão de vapor como um controle proporcional definido por tipo de receita.

- O ciclo se repete para a próxima leitura de temperatura e pressão de saída do extrusor, formando o histórico de controle que possibilita a ação da rede neural e fatores de peso discutidos na seção (III.2.2).

III.2.2.4) Resultados Preliminares do Controle Adaptativo Neural

Mesmo sendo um dos objetivos, a aplicação do controlador *MFA* foi realizada de forma preliminar ao extrusor industrial, a fim de elencar resultados que possam contribuir para avaliações futuras deste modelo adaptativo neural para a extrusão.

A avaliação preliminar pode ser dividida em três fases:

III.2.2.4.1) Fase I

Na primeira fase o sistema *MIMO 2x2* foi testado sem acoplamento, isto é, o resultado para o controlador de temperatura não influenciava o controle de pressão, funcionando como dois sistemas *SISO* isoladamente. O resultado é observado na Figura 41.

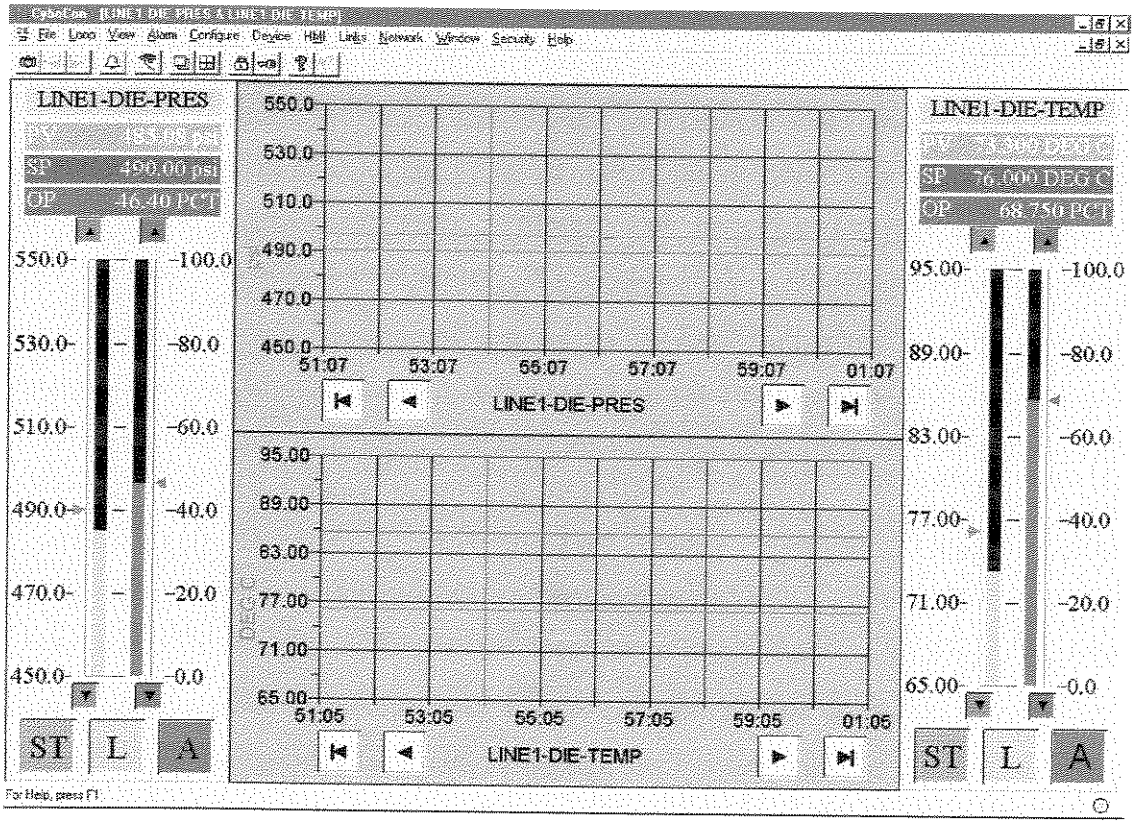


Figura 41: Aplicação do Controle MIMO 2x2 para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída Fase I.

A Figura 41 mostra no gráfico superior a variação relativa à pressão de saída e o gráfico inferior à variação para a temperatura de saída em módulo automático. Observa-se que embora haja uma resposta praticamente constante para a temperatura de saída, a pressão flutua sem uma resposta muito constante a cerca de 490 psi. Este efeito é decorrente do desacoplamento entre os módulos de controle de temperatura e pressão de saída, no qual os efeitos secundários discutidos para a estratégia *MIMO* recebem fraca importância dentro da rede neural por baixos valores associados de fatores de peso. Portanto, o controle responde de forma ainda não-otimizada para a variável pressão de saída.

III.2.2.4.2) Fase II

A segunda fase foi necessária para a tentativa de diminuir a variação no controle para a pressão de saída do extrusor. Este procedimento foi efetuado basicamente pelo acoplamento do sistema *MIMO*, isto é, os efeitos secundários passaram a exercer maior influência para o histórico da ação de controle gerado na rede neural. Entretanto, conforme a observação da Figura 42, o efeito relativo a pressão sofreu uma redução na variabilidade mantendo-se um pouco acima da faixa de 'set-point', mas o valor de temperatura de saída teve um redução em relação ao valor de 'set- point'. A análise dessa resposta demonstra que embora o efeito secundário direto da vazão de farinha para a pressão de saída tenha compensado o problema verificado na fase I, o efeito direto, que foi definido na condição experimental como variável, provocou um desvio com redução na curva de temperatura. Este ponto é certamente o desafio do controlador, pois a variação de umidade é o fator complicador para o desempenho do mesmo.

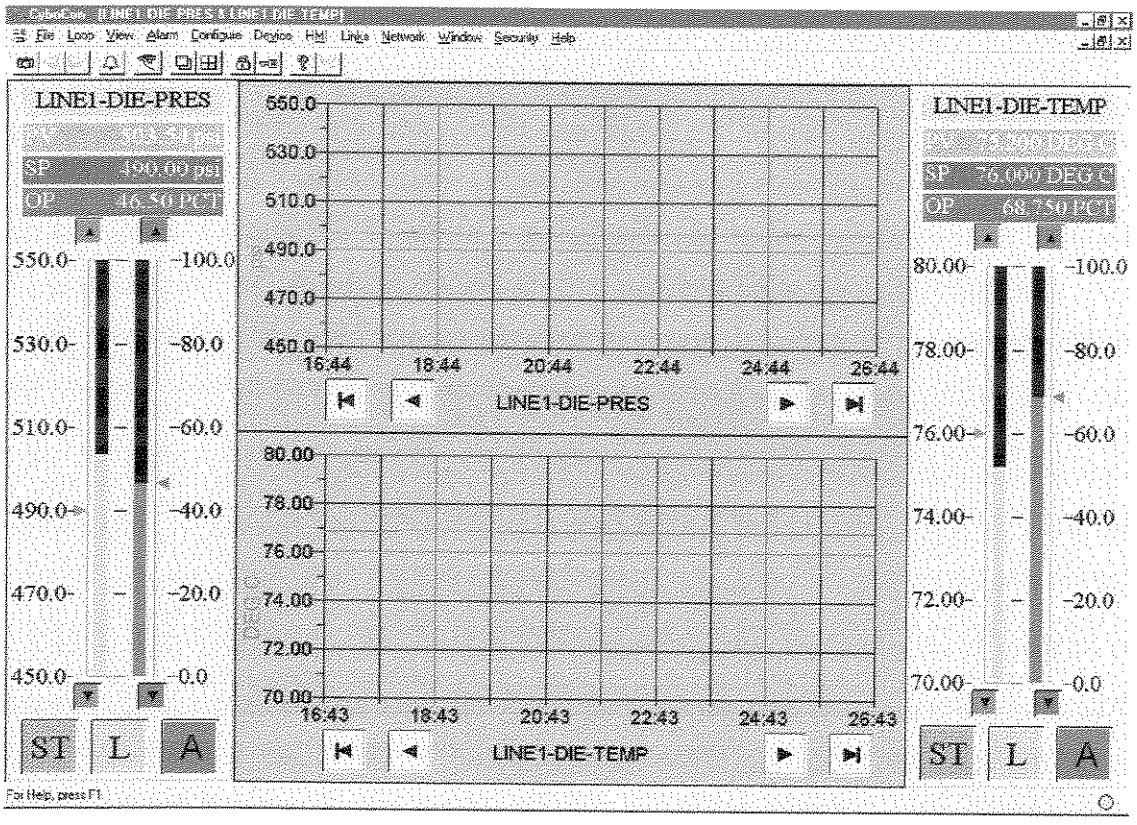


Figura 42: Aplicação do Controle MIMO 2x2 para Temperatura (^{0}C)e Pressão (psi) de Saída Fase II.

III.2.2.4.3) Fase III

Após a fase II poderia retornar-se para a fase I e realizar-se novos ajustes para as variáveis dos módulos do controlador *MFA* ou fazer-se a adição do módulo de controle auxiliar 'feedforward'. O resultado após o uso do sistema 'feedforward' para ambas as variáveis vazão de farinha e vapor pode ser observado na Figura 43.

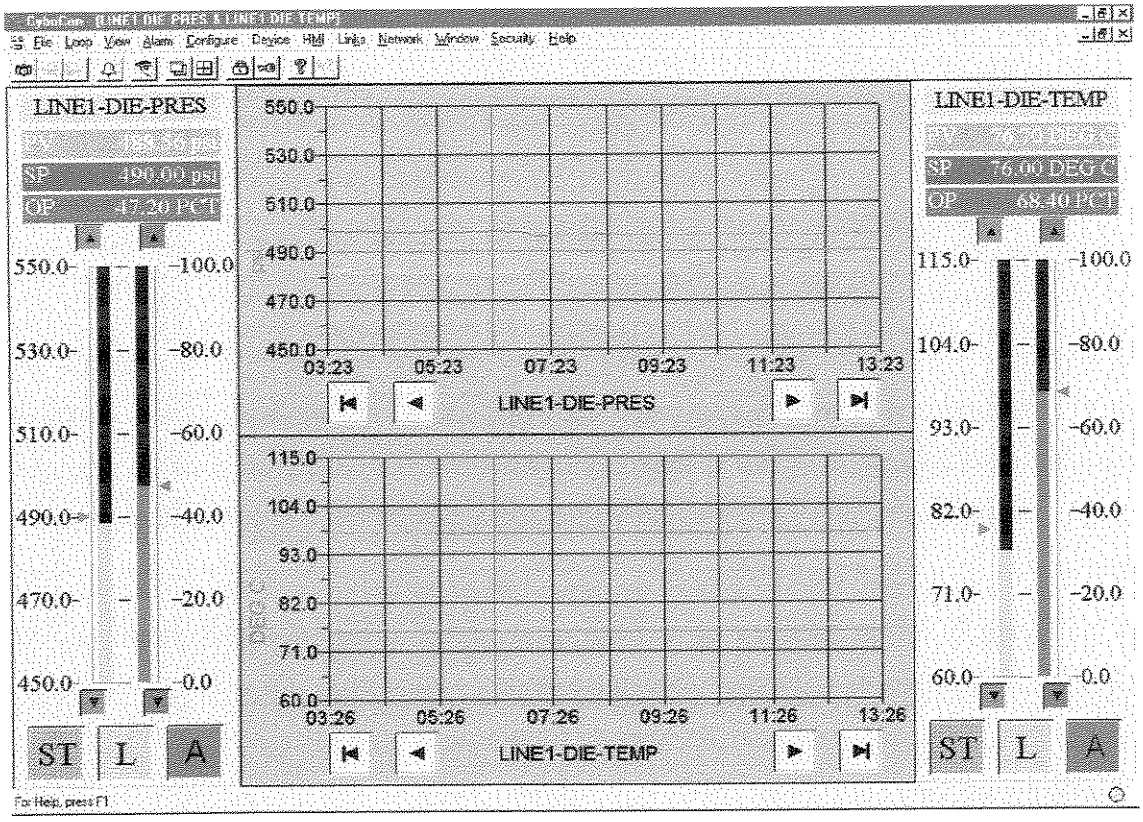


Figura 43: Aplicação do Controle MIMO 2x2 para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saida Fase III.

A observação da Figura 43 mostra que o resultado para a temperatura de saída, no gráfico inferior, foi constante e a variação na pressão de saída, para o gráfico superior, apresentou variação aceitável mantendo-se abaixo do valor do 'set-point'. Observa-se que o compromisso ente a velocidade de controle, dada além dos valores atribuídos para os efeitos, pelo módulo 'feedforward', para a umidade (vazão de vapor e água) parece ser a principal característica para a aplicação deste controlador.

As Figuras 41 , 42 e 43 confirmam a operação do sistema em malha fechada pela indicação do terceiro botão a direita do lado inferior esquerdo referente ao gráfico superior e do lado inferior direito referente ao gráfico superior 'A', que indica controlador em módulo automático.Para a Figura 39 o sistema foi avaliado em malha aberta, indicado pelo botão 'M' (manual).

As fases I, II e III foram obtidas com o processo em condição operacional, no qual a operação foi controlada em módulo automático, com o objetivo principal de verificar-se se o algorítmo elaborado para o possível controle conseguiria manter o processo em estado estacionário. Este objetivo foi certamente alcançado. Adiciona-se aqui que o controlador

MFA conseguiu minimizar o problema relativo a variável vazão de farinha, a qual apresentou problema interno entre a relação da célula de carga e rotação de eixo de alimentação do extrusor no módulo de *CLP*, conforme descrito na seção (II.2.3.1).

A avaliação do controle *MFA* para perturbações induzidas bruscas nas variáveis manipulativas ao controlador não foi possível, devido à natureza do processo industrial, que não permite simulações de avaliação piloto.

O algorítmo *MIMO 2X2* apresentou bons resultados, mas dependendo da receita a ser analisada, podem ser extremamente importantes a avaliação da mudança durante o controle da proporção entre a vazão de vapor e água e a inclusão da velocidade do eixo do extrusor como variáveis manipulativa. Pode-se então aumentar a flexibilidade e controlabilidade do processo.

A variação da proporção vapor e água podem ser incluída como uma variável manipulativa substituindo o 'ratio'constante entre vapor e água utilizado neste controlador. Assim para o caso quando a proporção vale 1, tem-se a mesma estratégia utilizada neste trabalho, isto é, um caso particular onde a proporção adotada para o estado estacionário equivale ao valor 1 e nunca é alterada durante a ação de controle, pois o aumento ou redução da variável vazão de vapor e água é sempre proporcional. Entretanto, baseando-se nos resultados experimentais, a variação no valor da proporção não pode ser muito grande, visto os efeitos isolados de vapor e água contribuírem excessivamente para a instabilidade do processo de extrusão. Implementando este controlador, deve-se garantir a manutenção do mesmo valor total de umidade, representado pela soma do teor de umidade da farinha, vazão de água, vazão de vapor alimentados ao pré-condicionador, bem como a vazão de vapor alimentada a extrusora (caso utilizada).

Para a rotação do helicóide podem ser usados duas formas:

1- um sistema *MIMO 2 X 2* apresentando como variáveis manipulativas: vazão de vazão de vapor e água, e energia mecânica específica (envolve conjuntamente as variáveis vazão de farinha e rotação do helicóide); e variáveis de processo: temperatura de saída, pressão de saída do extrusor.

2- um sistema MIMO *3 X 3* com variáveis manipulativas: vazão de vapor e água, vazão de farinha, rotação do eixo do extrusor e variáveis de processo: temperatura de saída, pressão de saída e torque do extrusor.

O primeiro sistema embora mais compacto apresenta a desvantagem da variável manipulativa *SME* apresentar em sua fórmula o torque, que é uma variável de resposta do sistema, visto a sua associação direta com a viscosidade da massa extrusada. Em adição a isso, as vazões de vapor e farinha irão contribuir também para o valor de torque. Portanto o segundo sistema, que apresenta o torque como variável de processo explícita tem a possibilidade da facilitar o sentido dos efeitos, entretanto com aumento significativo do cálculo de controle, pelo aumento das combinações neurais no sistema *MFA*.

Independente da estratégia empregada, repete-se a importância da definição da região correspondente de temperatura e pressão de saída específicos para a receita empregada. Esta especificidade pode, caso a diferença entre as receitas seja extremamente brusca, alterar as condições iniciais do sistema *MFA* com relação ao parâmetros de ganho estacionário, tempo morto e tempo de subida. De qualquer forma, os resultados experimentais utilizaram três (3) receitas bastante distintas a fim de promover parâmetros mais representativos para o controlador neuro–adaptativo.

IV) CONCLUSÃO

O ensaio experimental conduzido neste estudo empregou a análise multifuncional de diversas áreas de engenharia de controle, estatística e química, a fim de estudar, formular hipóteses, avaliar os resultados e construir um modelo de controle de processo para a extrusão de rações para animais de estimação de aplicação em escala industrial. Este trabalho apenas reflete as etapas elementares do método científico, que além de atribuir excelência na condução de um estudo, possibilita a análise contínua e fundamentada das decisões tomadas em meio ao desenvolvimento experimental.

Os resultados obtidos neste experimento atingiram os objetivos planejados significativamente. Pode-se resumí-los em quatro áreas principais: as relações entre as variáveis de processo quantitativas no extrusor e as variáveis de qualidade do produto extrusado úmido, efeitos principais das variáveis independentes para a extrusão, característica da dinâmica do processo de extrusão e potencialidade do controle *MFA* para o processo de extrusão.

a) as relações entre as variáveis de processo quantitativas no extrusor e as variáveis de qualidade do produto extrusado úmido;

Foi provado estatisticamente a validade estatística da aplicação de um planejamento composto central a fim de comprovar a variação significativa da densidade e umidade do produto final para a temperatura e pressão da saída do extrusor. Este resultado facilita a aplicação de uma estratégia de controle ao extrusor, visto a dificuldade atual de obter-se medidas no campo industrial tanto para densidade quanto para a umidade do produto extrusado úmido em tempo real. Adicionado a isso, a medida dessas duas variáveis após o secador acumula a operação unitária de secagem e portanto, perde-se a especificidade do volume de controle pré-condicionador / extrusor.

Outro ponto concluído avidencia que a relação, embora complexa, que pode ser generalizada em termos de tendências em regiões correspondentes de temperatura e pressão; entretanto a mudança de receita é sem dúvida o principal fator em processos industriais para as alterações das regiões de solução ao determinado conjunto densidade / umidade do produto extrusado úmido.

b) efeitos principais das variáveis independentes para a extrusão;

A avaliação dos efeitos relacionados às principais variáveis manipuladas na extrusão é sem dúvida essencial para a definição das variáveis a se controlar e qual o sentido da influência para a temperatura e pressão. Novamente foram empregados os resultados do planejamento central composto a fim de identificar os efeitos significativos. Dentre estes, mostraram-se muito influentes a variação de vapor e água, associados à variação de farinha e rotação do helicóide. O estudo dos efeitos para a adição de vapor e água isoladamente e conjugada comprovou a vantagem em termos de sentido da influência quando esta variável é perturbada em controle proporcional para a receita empregada. A vazão de farinha demonstrou forte influência para a temperatura de saída e também influência média para a pressão de saída. Finalmente a rotação do helicóide, embora significativa para ambas as variáveis de processo, foi entendida como um efeito adicional para a mudança das mesmas. Assim complementou-se a definição das influências com o efeito direto pronunciado da vazão de vapor e água para a pressão de saída e um certo equilíbrio para a resposta da temperatura de saída, que foi considerado levemente positivo.

Estudou-se ainda o conjunto completo dos efeitos múltiplos a fim de subsidiar a análise completa deste processo. A análise das energias mecânica e térmica específicas definiu-se a importância da energia mecânica específica como variável independente deste processo, visto a inclusão na sua fórmula do torque gerado ao extrusor para a densidade e umidade do produto extrusado úmido; e da energia térmica específica para a umidade do produto extrusado úmido. Entretanto, apresentaram complicadas relações para a temperatura e pressão de saída do extrusor.

c) característica da dinâmica do processo de extrusão;

A dinâmica do processo de extrusão é o fator determinante para a seleção do tipo de controlador, uma vez que da análise no item (b) fica claro a estratégia *MIMO 2 x 2* para os ensaios de controle. Assim, a primeira indicativa a comprovação da não-linearidade do processo foi vista na análise do perfil de temperatura ao longo do extrusor para as perturbações individuais no qual, a temperatura apresentou aumento e decréscimo dependendo da zona do extrusor analisada. Somado a essa importante observação, a determinação da análise da curva resposta definiu a inadequação desta operação para modelos de controle lineares, de primeira ou segunda ordem. Este aspecto foi comprovado quando aplicou-se a teoria de controle linear para a determinação dos

parâmetros de um hipotético controlador *PID* para as perturbações individuais nas receitas empregadas. Foi verificado a variação dos parâmetros, proporcional (*P*), integrativo (*I*) e derivativo (*D*) para cada variável dentro da própria receita e entre as receitas para a mesma variável manipulativa avaliada.

Mesmo com a comprovação da não linearidade pode-se entender mais detalhadamente a natureza da resposta para temperatura e pressão de saída. Para a temperatura o valor de ganho estacionário baixo entre 0,04 e 0,12 ^{0}C / kg/h identificou a necessidade de um controle menos agressivo baseado na inércia do processo. Para a pressão os valores de ganho estacionário foram bem mais superiores, ficando entre 1,12 e 1,38 psi / kg/h identificando a maior variabilidade desta variável. O tempo de subida médio relativo à temperatura foi levemente superior para a temperatura (cerca de 130 s) em relação à pressão de saída (125s), viabilizando a tendência de maior inércia até que se alcance o segundo estado estacionário depois de efetuada uma perturbação. O tempo morto médio relativo à pressão foi cerca de três vezes maior que o determinado para a temperatura de saída, o que provavelmente identifica que o mecanismo de variação entre estas duas variáveis é comandado pela variação de temperatura.

d) potencialidade do controle *MFA* para o processo de extrusão

O projeto do algorítmo do controlador *MFA* utilizou todos os resultados e observações descritos acima, embora não necessite de um modelo, pois não foi fornecido nenhuma equação ao mesmo ou ainda parâmetros de *P*, *I* e *D*. Foi construído um algorítmo *MIMO 2 X 2* para o controle de temperatura e pressão de saída do extrusor, baseado nas vazões de vapor e água com proporção definida e vazão de farinha. Foram informados os ganho médio, tempo morto e tempo de subida para a aplicação do controle em um equipamento industrial.

Os resultados preliminares deste módulo neuro-adaptativo identificaram a controlabilidade da extrusão para temperatura e pressão de saída na estratégia definida. Embora o processo de extrusão envolver a formação de uma estrutura biopolimérica variável, o controlador *MFA*, através da utilização da sua estrutura baseada em histórico de informação e definição de fatores de peso, conseguiu manter os valores de estado estacionário para os testes realizados. As suas vantagens certamente adequam a simplicidade de sua aplicação, instalação e operação sem um modelo de controle restrito, onde variações no processo permitem uma 'adaptação'dos elementos manipulativos.

Associado a isso o 'aprendizado' sugerido pela rede neural faz com que variações do processo sejam computadas na avaliação do erro gerado pela ação de controle para a variável manipulativa, evitando a necessidade de sintonia constante do controlador, a fim de controlar a qualidade do produto extrusado com potencialidade de aumento de produtividade.

Não foram identificadas neste estudo desvantagens para o controlador *MFA*, mas necessita-se realizar uma avaliação mais profunda para perturbações bruscas nas variáveis manipulativas, que devem ser conduzidas em um equipamento piloto, uma vez que estes resultados obtidos no extrusor industrial ainda devem ser considerados pontuais. Por isso, a validação completa deste modelo é ainda objeto de estudos posteriores.

Embora o grande desafio para o controlador seja a manutenção da performance de controle para a mudança grande entre uma receita e outra; pode-se considerar essa condição como um sub processo dentro da própria extrusão, o que em tese mereceria um análise específica. Este ponto não é muito comum em plantas de produção convencional, mas caso ocorra, basta-se associar um módulo junto ao *CLP* que mude os parâmetros iniciais de controle junto ao módulo *MFA*.

O ponto crítico deste estudo é certamente a determinação de específicas regiões referentes de temperatura e pressão de saída que atendam as exigências de densidade e umidade do produto extrusado úmido, enquanto não forem desenvolvidas medidas precisas e em tempo real para de qualidade do produto extrusado úmido. Essa mudança de 'set-point' tem que necessariamente ser feita para qualquer tipo de controlador e portanto não pode ser analisada como desvantagem. Enfim, novamente pode-se desenvolver um banco de dados que alimente os valores de 'set-point'para o controlador que pode ser entendido como uma curva de calibração entre densidade e umidade para temperatura e pressão de saída do extrusor quando são alimentadas diferentes receitas ao mesmo. Da mesma forma, qualquer mudança de projeto ou tipo de extrusor irão afetar o valor dessas regiões.

A viabilidade preliminar determinada por esse estudo credencia estratégias de controle avançado para enfim resolver a necessidade cada vez mais iminente do controle do processo de extrusão para a indústria de produção de rações para animais de estimação.

V) TENDÊNCIAS FUTURAS

Para trabalhos futuros sugere-se a incorporação de um sistema de medida em tempo real para a umidade do produto, que possibilite também a avaliação desta variável de processo para o extrusado úmido. Indubitavelmente a inclusão da rotação do eixo do helicóide como variável manipulativa pode compor um sistema de controle *MIMO 3X3* com a adição da variável torque do extrusor como variável dependente. Outro avanço para o controle deste processo pode ser obtido com a medida em tempo real dos constituintes da farinha a ser alimentada, o que possibilita o controle dos ingredientes associados à vazão de alimentação e aproxima a extrusão alimentícia da extrusão a processos químicos, aumentando o grau de conhecimento do processo e facilitando o entendimento dos efeitos observados, otimizando a aplicação de controle.

O principal ponto a ser avaliado com critério na aplicação do controle avançado reside no treinamento específico dos profissionais que vão operar com o controlador e a acessibilidade ilimitada pelos técnicos responsáveis, a fim de os ajustes e manutenção possam ser realizados quando necessários, desmistificando a definição de caixa preta, usualmente associada a sistemas mais complexos. Associado a isso, a construção deste estudo está fundamentada que na informação para o controlador das regiões ótimas de temperatura e pressão de saída (ou 'set-point'), que inicialmente precisam ser experimentalmente obtidas. Esse trabalho pode ser realizado por operadores experimentados, que pela observação dos resultados medidos de densidade e ou umidade, podem ajustar a faixa de controle. Depois de certo tempo esse parâmetros podem ser automaticamente carregados com as receitas a serem utilizadas. O impacto das mudança bruscas de formulações pode ser minimizado pela análise em tempo real dos ingredientes, o que para o de formulações convencionais é pouco comum. Para variações cotidianas nas formulações os resultados obtidos nesse estudo parecem ser bastante reprodutíveis, embora ainda não devam ser generalizados.

A incidência dos controles avançados é sem dúvida um processo em explosão para a indústria alimentícia e especificamente para a extrusão os possíveis benefícios oriundos do controle de densidade e umidade podem ser definidos abaixo:

- Controle de densidade e umidade para o extrusado;

- Aumento de produção hora do extrusado;
- Redução no consumo de energia por unidade produzida;
- Redução de re-trabalho;
- Ampliação para controles de arrancada e parada, com redução de perdas e ganho real em tempo operacional;
- Redução da geração de finos para o produto final;
- Redução no consumo de embalagens para produtos de baixa densidade;
- Controle dos ingredientes da farinha de alimentação, em especial a variação de proteína, de alto custo para as receitas utilizadas;
- Maior controle de textura e distribuição de cor;
- Desenvolvimento de novas receitas;
- Utilização da operação para análise e interpretação do processo;
- Informação gerencial em tempo real.

Enfim, o controle efetivo do processo de extrusão representa um sólido progresso na indústria alimentícia, necessário não somente para a otimização e flexibilidade do processo, mas principalmente para garantir a sobrevivência e edificar o avanço dos produtos cada vez mais voltados para o dono e para o próprio animal de estimação.

VI) REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

ABERLE, T.; BURCHARD, W.; VORWERG, W. e T., R. Conformational Contributions of Amylose and Amylopectin to the Structural Properties of Starches from Various Sources. **Starch**, v.46, n.9, p.329-335, 1994.

ADA, D. Q. e PISCATAWAY, S. S. W. Modeling Shearing Resistance of Powdery Starch for Simulation Studies of Extrusion Cooking Processes. **Starch**, v.50, n.4, p.147-153, 1998.

BHATTACHARYA, S.; DAS, H. e BOSE, A. N. Rheological Behaviour During Extrusion of Blends of Minced Fish and Wheat Flour. **Journal of Food Engineering**, v.15, p.123-137, 1992.

CAYOT, N.; BOUNIE, D. e BAUSSART, H. Dynamic Modelling for a Twin Screw Food Extruder: Analysis of the Dynamic Behaviour Through Process Variables. **Journal of Food Engineering**, v.25, p.245-260, 1995.

COELHO, C. A. D. Escola federal de Engenharia de Itajuba. **Controle e Reguladores Automaticos Analogicos**. Itajuba, 1995.

CYBOCON. **General Cybernation Group**: User Manual. Inc.California EUA: 1997-1998.

D'AZZO, J. J. e HAUPIS, C. H. **Analise de Projeto de Sistemas de Controle Lineares (English Translation)**. Rio de Janeiro: 1984.

DESRUMAUX, A.; BOUVIER, J. M. e BURRI, J. Effect of Free Fatty Acids Addition on Corn Grits Extrusion Cooking. **Cereal Chemistry**, v.76, n.5, p.699-704, 1999.

DHANASEKHARAN, M. e KOKINI, J. L. Viscoelastic Flow Modeling in the Extrusion of a Dough-Like Fluid. **Journal of Food Process Engineering**, v.23, p.237-247, 2000.

DI QU, A. e WANG, S. S. Modeling Shearing Resistance of Powdery Starch for Simulation Studies of Extrusion Cooking Processes. **Starch**, Piscataway NJ / MI (USA), v.50, n.4, p.147 - 153, 1998.

GALLANT, D. J.; BOUCHET, B. e BALDWIN, P. M. Microscopy of Starch: evidence of a new level of granule organization. **Carbohydrate Polymers**, v.32, p.177-191, 1997.

HALEY, T. A. e MULVANEY, S. J. Advanced Process Techniques for the Food Industry. **Trends in Food Science & Technology**, v.6, p.103 -110, Abril - 1995.

HOLAY, S. H. e HARPER, J. M. Influence of the Extrusion Shear Environment on Plant Protein Texturization. **Journal of Food Science**, v.47, p.1869-1874, 1982.

HUBER, G. R. Pre Conditioning and Related Extrusion Processing Issues. In: Presented at the A.A.C.C. Extrusion Short Course, Fev. -1990, By Wenger Manufacturing. p. 19 - 21, p. 1-12.

JANE, J.; CHEN, Y. Y.; LEE, L. F.; MCPHERSON, A. E.; WONG, K. S.; RADOSAVLJEVIC, M. e KASEMSUWAN, T. Effects of Amylopectin Branch Chain Lenght and Amylose Content on the Gelatinization and pasting Properties of Starch. **Cereal Chemistry**, v.76, n.5, p.629-637, 1999.

JANES, D. A. e GUY, R. C. Metastable States in a Food Extrusion Cooker II: The Effects of Die resistance and Minor Ingredients with Rice Flour. **Elsevier, Applied Science**, v.8, p.161-175, 1994.

KEARNS, J. P.; ROKEY, G. J. e HUBER, G. R. Extrusion of Texturized Proteins. Proceedings of the World Conference On vegetable Protein Utilization in Human Foods and Animal Feedstuffs. 1988, Kansas, p. 353-362.

KOOKOS, I. K. e PERKINS, J. D. An Algorithmic method for the selection of multivariable process control structures. **Journal of Process Control**, v.12, p.85 - 89, 2002.

KULSHRESHTHA, M. K.; ZAROR, C. A. e JUKES, D. J. Simulating the performance of a control system for food extruders using model-based set-point adjustment. **Food Control**, v.6, n.3, p.135-141, 1995.

LU, Q.; HSIEH, F.; MULVANEY, S. J.; TAN, J. e HUFF, H. E. Dynamic Analysis of Process Variables for a Twin - Screw Food Extruder. **Lebensm.-Wiss. U.-Technology**, v.25, p. 261-270, 1992.

MATHEW, J. M.; HOSENEY, R. C. e FAUBION, J. M. Effects of Corn Hybrid and Growth Environment on Corn Curl and pet Food Extrudates. **Cereal Chemistry**, v.76, n.5, p.625-628, 1999a.

MATHEW, J. M.; HOSENEY, R. C. e FAUBION, J. M. Effects of Corn Sample, Mill Type, and Particle Size on Corn Curl and Pet Food Extrudates. **Cereal Chemistry**, v.76, n.5, p. 621-624, 1999b.

MATLAB. **User's guide, the Mathworks**. Inc., Natick, Ma, EUA: 1990.

MERCIER, C.; LINKO, P. e HARPER, J. M. **Extrusion Cooking**. Minessota: Edited by American Association of Cereal Chemists, 1989. p. 1-55, p. 157-200, p. 247-320.p.

MUJOO, R. e ALI, S. Z. Molecular degradation of rice starch during processing to flakes. **Journal Science of Food Agriculture**, v.79, p.941-949, 1999.

MULVANEY, S. e HSIEH, F.-H. Process Control for Extrusion Process. **Cereal Foods World**, v.33, n.12, p.971 - 976, 1988.

NETO, B. D. B.; SCARMINIO, I. S. e BRUNS, R. E. **COMO FAZER EXPERIMENTOS - Pesquiza e Desenvolvimento na ciência e na indústria**. Campinas: Editora da Unicamp, 2001.

OGATA, K. **Modern Control Engineering**. New Jersey: Prentice Hall, 2002. 964p.

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

ONWULATA, C. I.; MULVANEY, S. J. e HSIEH, F. System analysis as the basis for control of density of extruded cornmeal. **Food Control**, v.5, n.1, p.39 - 48, 1994.

PATON, D.; ROBERTSON, G. D.; TIMBRES, G. E. e SPRATT, W. A. Laboratory Food Extrusion-The Design of a Horizontally Split Barrel. **Journal of Food Science**, v.45, p.224-227, 1980.

PIETSCH, W. Granulate Dry Particulate Solids by Compaction and Retain Key Powder Particle Properties. **Chemical Engineering Progress**, p. 24 - 46, Abril - 1997.

QUINTERO-FUENTES, X.; MCDONOUGH, C. M.; ROONEY, L. W. e ALMEIDA-DOMINGUEZ, H. Functionality of Rice and Sorghum Flours in Baked Tortilla and Corn Chips. **Cereal Chemistry**, v.76, n.5, p.705 - 710, 1999.

RENARD, M. e BIMBENET, J. J. Monitoring and Optimisation of the Extrusion Cooking Process. **Automatic Control and Optimization of Food Process**, p.519-531, 1988a.

RENARD, M. e BIMBENET, J. J. Process Control of Cooker-Extruders. **Automatic Control and Optimization of Food Process**, p.201-214, 1988b.

RENARD, M. e BIMBENET, J. J. The Potencial of Fuzzy Logic In Optimization And Control: Fuzzy Reasoning In Extrusion Cooker Control. **Automatic Control and Optimization of Food Process**, p.183-200, 1988c.

RENARD, M. e BIMBENET, J. J. The Use of Ultrasonic probes for the Monitoring of Food Extrusion Systems. **Automatic Control and Optimization of Food Process**, p.19-30, 1988d.

SCHONAUER, S. L. e MOREIRA, R. G. Dynamic analysis of on-line product quality attributes of a food extruder. **Food Science and Technology International**, v.3, p.413-421, 1997.

SERVAIS, C.; JONES, R. e ROBERTS, I. The influence of particle size distribution on the processing food. **Journal of Food Engineering,**, v.51, p.201 - 208, 2002.

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

SHUKLA, T. P. The Dimensions of Food Extrusion Research and Technology. **Cereal Foods World**, v.36, p.581-582, 1991.

SINGH, B. e MULVANEY, S. J. Modeling and Process Control of Twin - Screw Cooking Food Extruders. **Journal of Food Engineering**, v.23, p.403-428, 1994.

SINGH, R. K. e OU-YANG, F. Knowledge-Based fuzzy control of asseptic processing. **Food Technology**, v.48, n.6, p.155-161, 1994.

SOKHEY, A. S.; ALI, Y. e HANNA, M. A. Effects of Die Domensions on Extruder Performance. **Journal of Food Engineering**, v.31, p.251-261, 1997.

SPIEGEL, M. R. **Manual de fórmulas e tabelas matemáticas - Coleção SCHÃUM**. Tradução de Traduzido por Roberto Chioccarello. Editora McGraw-Hill do Brasil Ltda, 1973. 270p.

STEPHANOPOULOS, G. **Chemical Process Control: an Introduction to Theory and Practice**. Englewood Cliffs: Prentice-Hall, 1984. 696p.

SUNDERLAND, R. Continuous Breading Production by Extrusion Cooking. **Cereal Food World**, v.38, n.9, p.685-688,, 1993.

TAN, J. e HOFER, J. M. Self-tuning predictive control of processing temperature for food extrusion. **Journal Process Control**, v.5, n.3, p.183-189, 1995.

YEH, A. I. e HWANG, J. U. The effect of Die Shape on Velocity Profile of Extrudate Using a Single-screw Extruder. **Journal of Food Engineering**, v.25, p.209-222, 1995.

YEH, A. I. e JAW, Y. M. Modeling Residence Time Distributions for Single Screw Extrusion Process. **Journal of Food Engineering**, v.35, p.211-232, 1998.

ZUILICHEM, V. D. J.; SWART, J. G. e BRUEMAN, G. Residence time distribution in an extruder. **Lebensmittel-Wissenschaft Technologie**, v.6, n.4, p.184-188, 1973.

VII) ANEXO I

Este anexo lista as principais figuras referentes aos equipamentos utilizados no teste piloto.

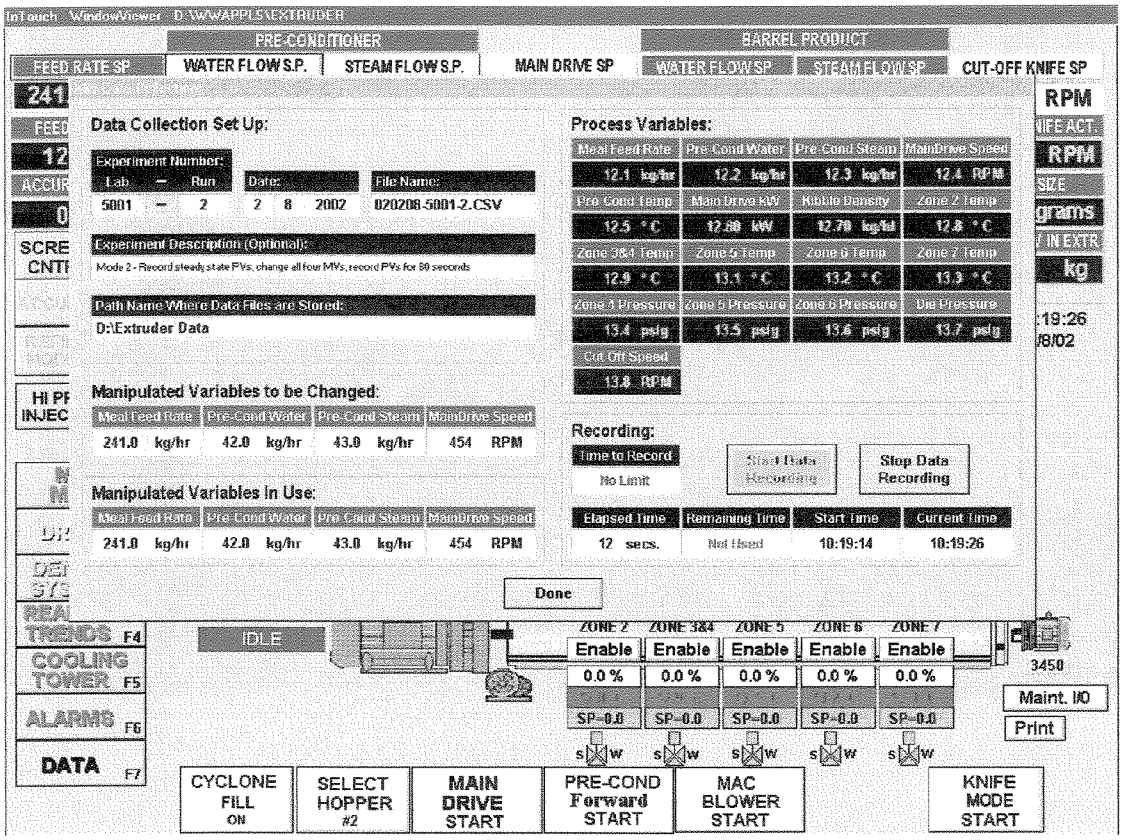


Figura 44: Tela para as Perturbações Simultâneas Empregada no Teste Piloto.

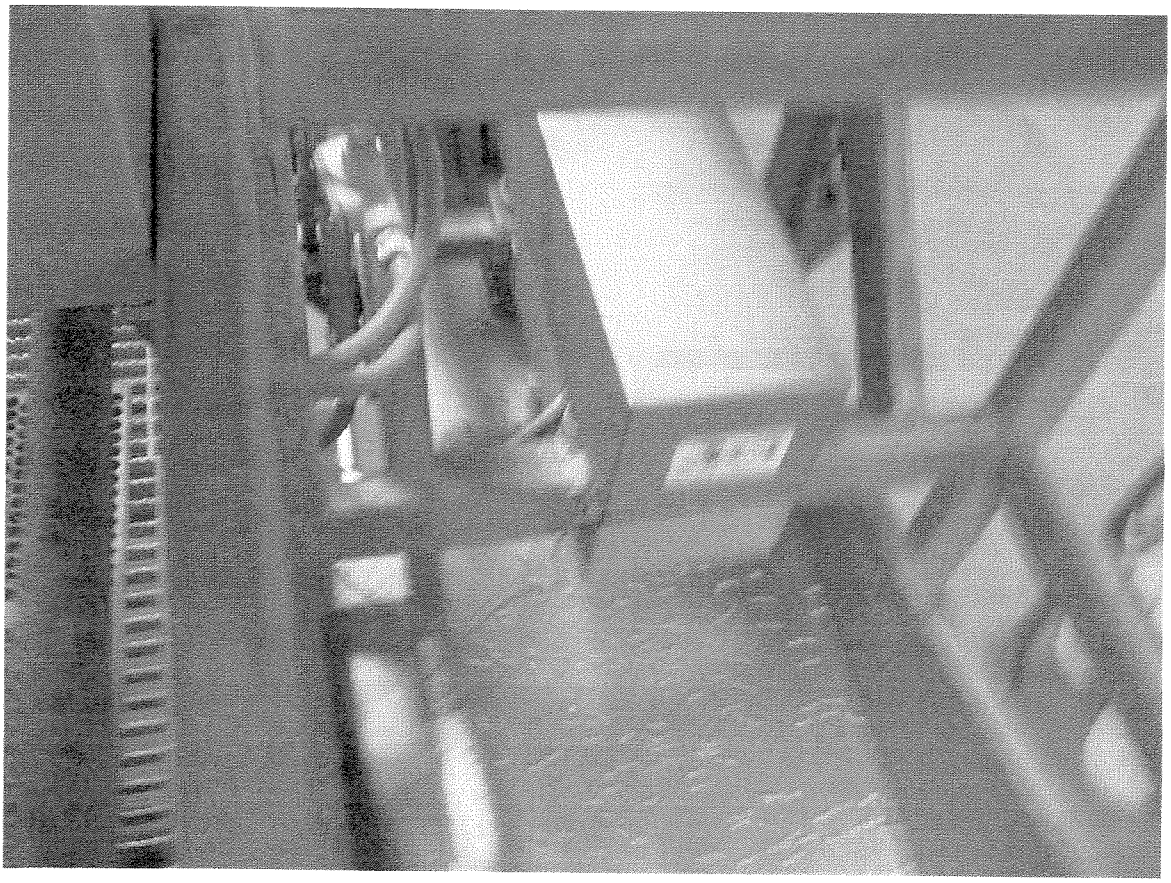


Figura 45: Medidor Volumétrico de Densidade In-line utilizado no Teste Piloto.

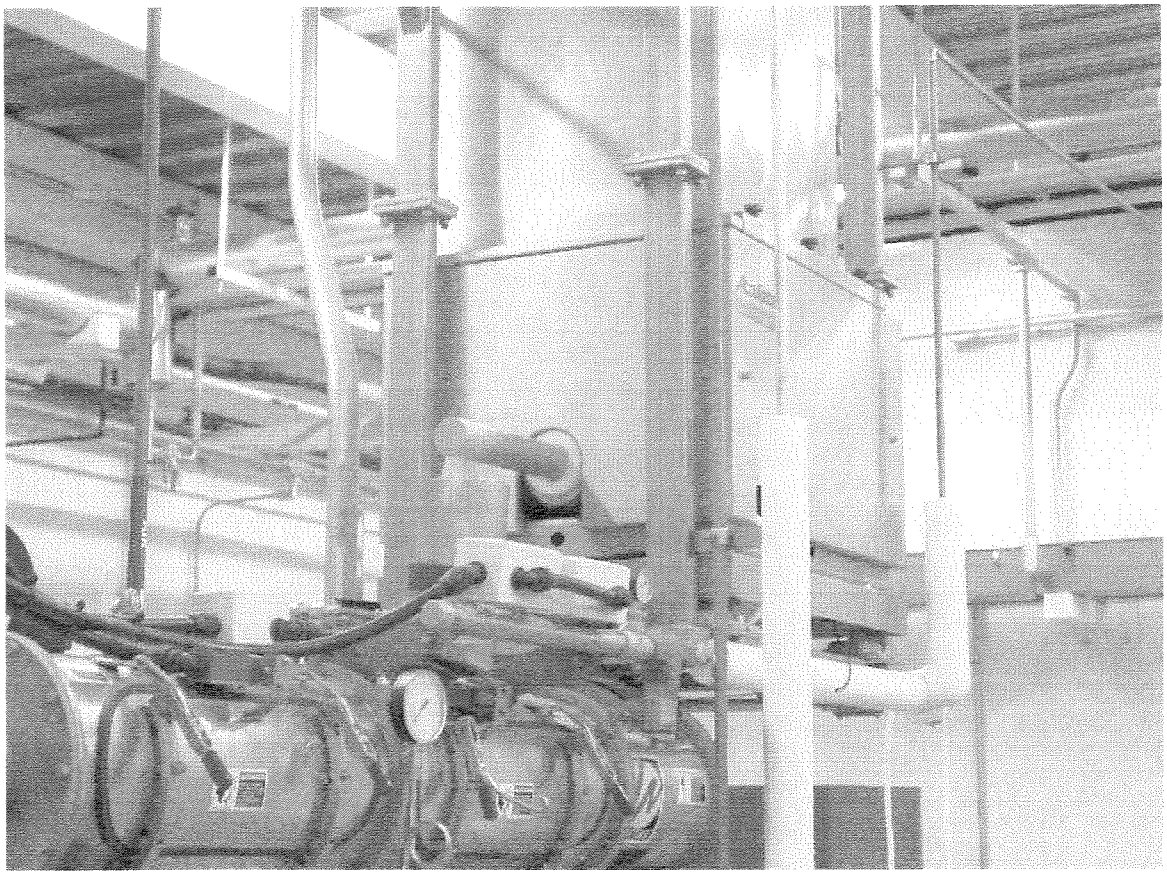


Figura 46: Detalhe do Sistema Volumétrico de Alimentação de Farinha empregado no Teste Piloto.

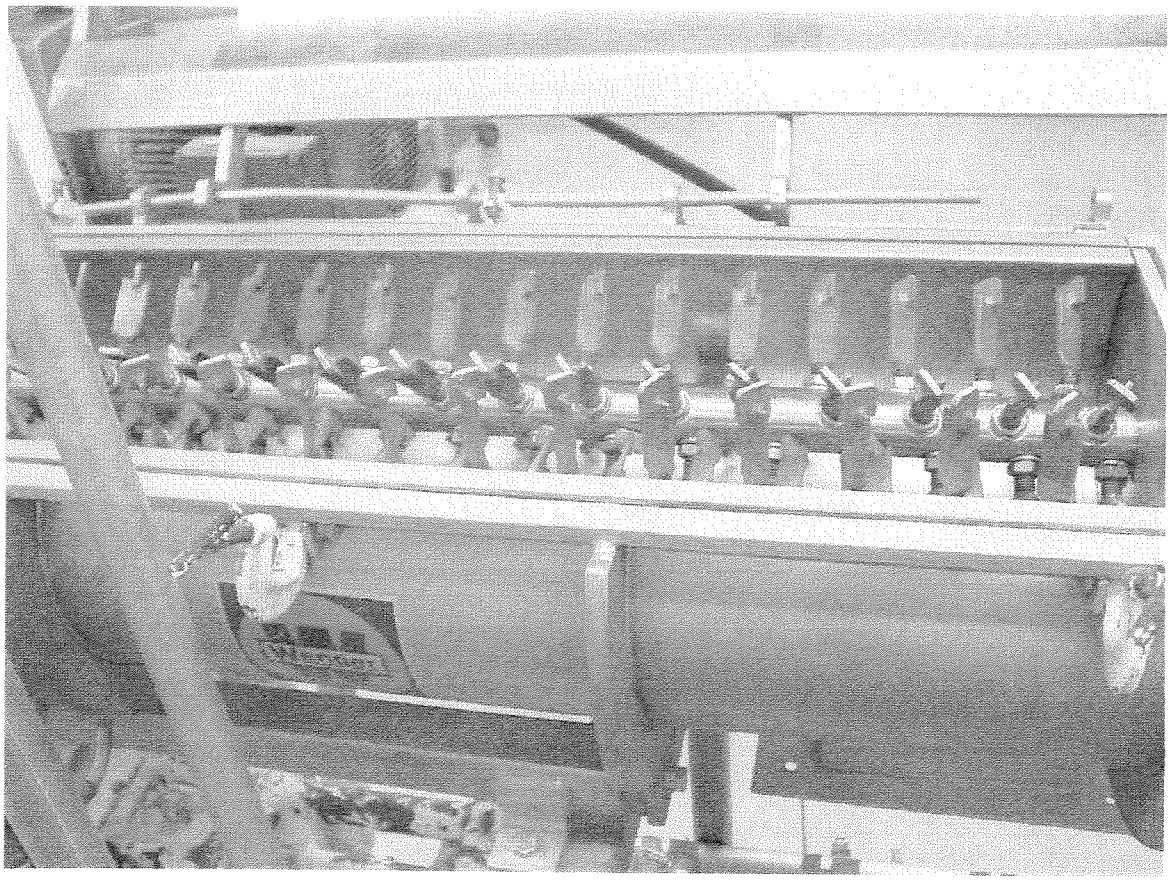


Figura 47: Detalhe do Pré-Condicionador Wenger MDL4DDC utilizado no Teste Piloto.

VIII) ANEXO II

O Anexo II apresenta os quadros de variáveis e resultados utilizados para o desenvolvimento da análise dos dados no Teste Piloto.

Quadro 21: Variáveis Manipulativas e de Processo para a Receita SC.

PERTUBAÇÕES	SUPERFÍCIE RESPOSTA		VARIÁVEIS MANIPULATIVAS								VARIÁVEIS DE PROCESSO *vapor = 30psi						
	Produto	SC	Vazão de Farinha		Vazão de Vapor		Vazão de Água		Rotação do Helicóide		Temp Saída	Press Saída	Densidade	Umidade	Torque	SME	* STE
			(VM1)		(VM2)		(VM3)		(VM4)		(VP1)	(VP2)	(VP3)	(VP0)	VP4	VP5	VP6
	Ordem		NIVEL	REAL	NIVEL	REAL	NIVEL	REAL	NIVEL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL
	Ensaio	Ensaio	[-2;2]	kg/h	[-2;2]	kg/h	[-2;2]	kg/h	[-2;2]	RPM	C°	psi	kg/hL	%	Kw.s	(kJ/kg)	(kJ/kg)
SIMULTÂNEAS	1	Rt(SC)026	0.00	185.00	0.03	30.20	-0.02	39.90	0.26	485.26	94.70	162.49	37.98	26.22	8.24	480.78	459.20
	2	Rt(SC)029	0.00	185.00	0.01	30.08	0.02	40.10	0.25	485.03	94.80	166.75	38.75	25.18	7.86	458.52	455.46
	3	Rt(SC)030	0.00	185.00	0.01	30.09	-0.01	39.96	0.25	484.94	94.60	149.74	38.12	26.35	7.70	449.16	459.62
	4	Rt(SC)025	0.00	185.00	-0.04	29.68	2.97	57.80	0.21	484.17	94.06	128.35	38.31	28.61	6.44	375.04	491.66
	5	Rt(SC)01	-1.00	165.00	-0.83	23.79	-1.03	33.80	-0.76	484.69	93.71	148.38	38.82	24.61	7.34	459.11	402.22
	6	Rt(SC)03	-1.00	165.00	0.09	36.60	-1.03	33.80	-0.75	485.05	94.40	160.02	39.60	25.49	7.53	471.35	613.75
	7	Rt(SC)05	-1.00	165.00	-0.81	23.99	0.97	45.80	-0.79	484.27	93.95	125.67	38.07	28.21	6.35	396.60	432.85
	8	Rt(SC)07	-1.00	165.00	0.76	35.67	0.95	45.70	-0.79	484.17	93.00	123.30	38.03	28.02	6.25	390.02	624.39
	9	Rt(SC)09	1.00	165.00	0.80	23.99	-1.05	33.70	1.23	504.80	93.76	144.54	38.70	26.03	7.51	510.14	408.71
	10	Rt(SC)011	-1.00	165.00	1.02	37.65	-1.03	33.80	1.25	504.93	94.80	160.38	38.37	26.06	8.04	546.08	630.94
	11	Rt(SC)013	-1.00	165.00	-0.80	24.03	0.95	45.70	1.19	503.86	94.70	122.10	37.81	28.25	6.33	429.28	438.14
	12	Rt(SC)015	-1.00	165.00	1.02	37.66	0.95	45.70	1.21	504.10	93.95	116.61	38.51	29.50	6.66	451.76	660.47
	13	Rt(SC)026	-1.00	165.00	0.03	30.19	0.00	40.00	-1.78	444.60	94.30	129.01	38.82	25.58	6.49	388.38	622.41
	14	Rt(SC)027	-1.00	165.00	0.01	30.08	-0.03	39.80	2.22	524.43	94.30	129.74	40.32	26.27	7.48	527.66	619.00
	15	Rt(SC)022	-1.00	165.00	-1.93	15.51	-0.02	39.90	0.23	484.70	94.67	145.42	40.69	26.02	7.36	480.11	287.57
	16	Rt(SC)023	-1.00	165.00	1.83	43.75	-0.02	39.90	0.23	484.60	93.70	134.09	39.07	28.73	7.17	467.62	742.78
	17	Rt(SC)024	0.00	185.00	0.00	30.03	-2.02	27.90	0.28	485.64	94.08	175.31	38.71	24.04	8.64	504.60	436.32
	18	Rt(SC)017	0.00	185.00	-0.02	29.87	-0.02	39.90	0.28	485.64	95.30	181.83	37.84	23.70	8.81	514.69	457.55
	19	Rt(SC)018	0.00	185.00	-0.03	29.79	-0.02	39.86	0.27	485.38	95.20	171.31	37.78	25.37	8.40	490.43	456.37
	20	Rt(SC)019	0.00	185.00	-0.01	29.90	-0.03	39.80	0.27	485.37	95.20	168.33	38.21	26.63	8.36	488.14	457.03
	21	Rt(SC)041	-0.10	183.00	0.49	33.67	-0.55	36.70	0.41	486.16	94.60	153.21	40.70	25.24	8.13	482.34	510.00
	22	Rt(SC)043	-0.60	173.00	-0.57	25.69	0.47	42.80	0.86	497.19	94.80	136.02	40.69	25.02	7.71	492.40	432.42
	23	Rt(SC)044	0.30	191.00	-0.17	29.74	-0.32	38.10	-0.45	470.93	94.92	174.31	39.04	24.72	8.77	481.15	424.55
	24	Rt(SC)046	-0.20	181.00	0.03	30.20	-0.23	38.59	0.36	487.56	95.20	163.49	40.07	23.76	8.73	523.16	556.30
	25	Rt(SC)045	-0.20	181.00	-0.54	25.97	-0.27	38.40	1.06	501.23	95.04	152.38	38.68	23.99	8.46	520.65	407.75
	26	Rt(SC)038	-0.60	175.00	-0.01	29.95	-1.05	33.70	-0.72	485.57	94.90	163.98	40.64	24.68	8.36	493.98	484.16
	27	Rt(SC)035	-0.46	175.80	0.42	33.18	0.74	44.42	0.98	499.54	95.48	132.70	40.61	26.86	7.29	460.21	544.45
	28	Rt(SC)032	-0.63	172.50	0.66	34.96	0.02	40.10	0.97	499.36	95.00	152.80	40.68	24.25	8.62	554.61	571.67
	29	Rt(SC)033	-0.80	167.40	-0.22	28.32	-0.23	38.60	0.64	490.77	95.30	151.16	39.30	23.92	8.40	546.79	480.96
	30	Rt(SC)034	-0.10	183.00	0.16	31.18	-0.20	38.80	1.17	503.31	95.80	152.94	39.72	24.11	8.63	527.77	476.49
	31	Rt(SC)031	-0.30	179.00	-0.45	26.62	0.77	44.60	-0.67	486.57	94.80	162.52	41.41	25.01	8.10	469.28	435.13
	32	Rt(SC)039	-0.75	170.00	0.81	36.07	0.20	41.20	-0.16	477.06	96.12	144.36	41.71	20.82	7.78	486.13	599.22
	33	Rt(SC)036	0.45	194.00	0.64	34.77	0.57	43.40	-0.32	473.64	94.90	164.72	41.79	25.57	7.09	385.30	505.84
	34	Rt(SC)037	0.15	188.00	0.15	31.13	0.27	41.60	-0.03	479.40	95.40	157.58	40.96	25.07	8.31	471.28	468.26
	35	Rt(SC)040	-0.75	170.00	-0.14	29.93	0.60	43.60	-0.33	473.33	95.00	157.61	40.98	24.87	8.12	501.88	494.63
	36	Rt(SC)042	0.40	193.00	-0.55	25.87	-0.65	34.90	0.57	491.40	95.78	175.09	40.46	22.27	9.19	520.69	370.64
	37	Rt(SC)028	-2.00	145.00	0.01	30.04	-0.03	39.80	0.29	484.60	95.38	124.13	40.66	26.28	7.02	519.56	594.49
	38	Rt(SC)02	1.00	205.00	-0.88	23.37	-1.03	33.80	-0.70	485.98	94.55	181.05	41.11	23.41	8.98	453.72	307.95
	39	Rt(SC)04	1.00	205.00	0.87	36.53	-1.03	33.80	-0.69	486.20	96.10	200.76	38.96	23.55	9.33	472.55	481.95
	40	Rt(SC)06	1.00	205.00	-0.79	24.08	0.95	45.72	-0.70	485.98	96.00	193.36	39.72	23.15	8.98	454.65	389.51
	41	Rt(SC)08	1.00	205.00	0.76	35.72	0.96	45.76	-0.72	486.60	95.28	175.39	40.67	24.16	8.41	425.69	490.66
	42	Rt(SC)010	1.00	205.00	-0.71	24.70	-1.04	33.74	1.31	506.10	95.36	196.58	39.64	23.81	9.83	540.94	329.90
	43	Rt(SC)012	1.00	205.00	1.65	42.40	-0.54	38.78	1.31	506.26	96.40	205.27	40.47	24.46	10.19	560.91	565.57
	44	Rt(SC)014	1.00	205.00	-0.62	25.36	0.95	45.70	1.30	506.06	96.40	190.48	39.65	23.62	9.81	539.79	368.58
	45	Rt(SC)016	1.00	205.00	0.79	35.95	0.97	45.80	1.27	505.44	96.50	174.90	40.76	24.44	8.87	487.05	497.52
INDIVIDUAIS	46	Rt(SC)A11	1.00	205.00	0.03	30.19	0.02	40.10	0.34	486.78	63.58	235.40	42.78	25.14	10.62	561.66	411.49
	47	Rt(SC)A12	3.00	245.00	-0.06	29.58	0.02	40.10	0.31	486.13	62.66	195.16	40.64	25.67	9.57	424.17	329.61
	48	Rt(SC)A13	-3.00	125.00	-0.01	29.90	-0.02	39.90	0.26	484.03	88.96	127.52	38.93	28.94	6.22	531.29	696.15
	49	Rt(SC)A21	0.00	185.00	0.84	36.29	0.02	40.11	0.25	484.93	91.59	187.23	34.33	27.30	7.77	452.69	548.01
	50	Rt(SC)A22	0.00	185.00	2.69	50.20	-0.02	39.90	0.27	485.49	93.70	175.78	40.30	26.14	9.63	503.50	747.83
	51	Rt(SC)A23	0.00	185.00	-0.74	24.44	-0.03	39.80	0.26	485.10	94.80	158.27	38.63	25.21	7.99	486.17	376.81
	52	Rt(SC)A31	0.00	185.00	-0.02	29.88	-1.02	33.90	0.27	485.30	95.00	156.76	39.23	25.75	8.21	479.32	441.58
	53	Rt(SC)A32	0.00	185.00	-0.01	29.94	0.95	45.70	0.27	485.44	95.20	166.84	40.67	25.60	8.52	497.20	466.06
	54	Rt(SC)A33	0.00	185.00	-0.01	29.90	2.97	57.80	0.28	484.60	94.73	131.38	40.36	27.99	6.98	405.36	489.72

Quadro 22: Análises Físico–Químicas para a Receita SC.

Provetas	Produto SC													
			Análises para a Farinha de Alimentação				Análises para a Saída do Pré-Condic				Análises para o Produto Extrusado			
	Ordem		Umidade	Lipídios	Proteína	Cinzas	Umidade	Lipídios	Proteína	Cinzas	Umidade	Lipídios	Proteína	Cinzas
	Ensaio	Ensaio	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%	%
SIMULTÂNEAS	1	R1(SC)D28	9.75	5.52	23.04	9.12	24.84	5.66	18.56	7.50	26.22	5.88	19.60	7.62
	2	R1(SC)D29	9.67	6.05	24.18	9.20	27.22	6.51	18.91	7.42	25.18	6.10	19.80	7.57
	3	R1(SC)D30	9.90	4.97	22.61	8.71	27.75	6.02	18.67	7.35	26.35	6.01	19.49	7.67
	4	R1(SC)D25	9.98	4.39	21.65	8.64	28.07	4.57	17.84	7.17	28.61	6.08	18.10	8.33
	5	R1(SC)D1	9.69	6.02	23.52	9.19	27.38	5.08	18.91	7.13	24.61	6.40	19.71	7.10
	6	R1(SC)D3	10.15	4.99	21.84	8.06	26.53	6.70	18.07	7.02	25.49	6.19	19.73	6.53
	7	R1(SC)D5	9.95	5.91	22.28	8.95	25.57	6.65	17.09	9.37	28.21	6.11	18.38	6.36
	8	R1(SC)D7	9.97	4.81	22.25	8.63	24.15	6.85	16.97	8.25	28.02	5.64	17.29	7.20
	9	R1(SC)D9	10.03	5.97	21.76	8.41	26.12	7.46	17.59	6.97	26.03	6.02	17.93	6.06
	10	R1(SC)D11	10.03	5.22	21.02	8.48	28.84	5.72	16.72	6.58	26.06	5.99	16.77	6.22
	11	R1(SC)D13	10.01	5.06	21.21	8.52	30.38	5.62	17.22	6.81	28.25	5.93	16.86	6.62
	12	R1(SC)D15	9.85	4.54	20.08	8.45	30.11	4.61	16.70	6.57	29.50	6.00	16.52	6.23
	13	R1(SC)D26	9.81	4.80	22.37	9.23	30.94	6.23	16.84	6.74	25.58	6.42	17.88	7.26
	14	R1(SC)D27	9.83	5.97	22.55	8.73	27.75	5.08	16.82	7.22	26.27	5.90	17.94	6.54
	15	R1(SC)D22	10.25	5.17	20.99	8.80	27.84	5.82	17.31	6.95	26.02	6.30	17.96	6.21
	16	R1(SC)D23	9.91	4.33	22.09	8.51	28.81	6.29	16.78	7.20	28.73	6.33	16.98	5.88
	17	R1(SC)D24	9.86	5.60	21.83	8.45	27.28	5.67	17.79	6.85	24.04	6.16	18.31	7.77
	18	R1(SC)D17	9.97	4.74	21.75	8.91	26.46	4.97	17.97	7.37	23.70	6.24	17.90	6.02
	19	R1(SC)D18	10.02	5.21	21.54	8.60	28.78	5.31	16.97	7.16	25.37	6.05	16.84	7.35
	20	R1(SC)D19	9.79	4.88	21.61	9.49	27.33	5.33	17.84	7.26	26.63	6.07	17.46	5.86
	21	R1(SC)D41	9.81	5.74	22.10	8.93	26.88	6.13	17.89	7.27	25.24	6.41	18.26	6.48
	22	R1(SC)D43	9.67	5.60	22.45	8.79	27.67	6.77	17.60	7.13	25.02	6.52	17.67	5.86
	23	R1(SC)D44	10.05	4.61	20.84	8.46	27.16	5.25	17.25	6.82	24.72	6.21	18.80	5.64
	24	R1(SC)D46	9.83	5.39	21.52	9.08	26.33	5.54	17.83	7.34	23.76	6.38	16.80	6.06
	25	R1(SC)D45	9.66	5.42	21.52	8.83	26.04	6.17	17.53	7.49	23.99	6.16	17.27	7.48
	26	R1(SC)D39	9.93	3.74	19.09	5.57	25.62	6.17	18.15	7.15	24.68	6.34	18.56	6.30
	27	R1(SC)D35	9.19	2.80	22.87	9.22	29.04	5.07	17.86	7.23	26.85	5.92	17.40	6.64
	28	R1(SC)D32	9.38	5.07	21.68	9.65	27.88	5.28	18.05	7.15	24.25	5.71	17.10	6.06
	29	R1(SC)D38	9.20	5.37	22.20	9.37	26.97	5.66	17.70	7.40	23.92	5.05	19.00	7.66
	30	R1(SC)D34	9.30	5.25	22.11	9.21	25.67	11.43	18.62	7.75	24.11	5.71	18.35	8.68
	31	R1(SC)D31	9.66	5.56	21.60	8.80	25.19	5.43	17.72	7.45	25.01	5.84	19.18	7.20
	32	R1(SC)D33	9.19	5.37	22.64	9.34	26.73	5.10	17.53	7.37	20.82	6.17	17.24	6.04
	33	R1(SC)D36	9.33	5.34	22.58	9.35	27.99	6.06	18.44	7.34	25.57	6.11	17.49	7.02
	34	R1(SC)D37	9.26	5.52	22.54	9.30	25.69	5.28	18.56	7.69	25.07	5.96	18.74	6.10
	35	R1(SC)D40	9.04	4.77	21.66	9.62	26.69	6.01	18.12	7.69	24.87	6.37	18.26	6.62
	36	R1(SC)D42	9.25	4.82	21.50	10.14	23.23	5.96	18.71	9.38	22.27	6.14	18.59	6.82
	37	R1(SC)D20	9.06	5.53	22.86	10.09	28.09	5.76	18.64	7.66	26.28	5.57	18.12	7.62
	38	R1(SC)D2	9.03	6.20	23.53	9.39	25.78	6.44	18.74	7.85	23.41	5.76	20.14	7.94
	39	R1(SC)D4	9.19	5.44	22.13	9.53	23.82	6.37	19.23	8.06	23.55	6.61	18.50	6.53
	40	R1(SC)D6	9.01	5.45	22.59	10.55	27.33	6.42	18.68	6.92	23.15	5.48	18.52	8.03
	41	R1(SC)D8	9.29	5.79	23.63	9.23	27.17	5.08	18.52	7.64	24.16	6.64	17.86	7.09
	42	R1(SC)D10	9.53	5.13	21.35	9.11	27.95	5.75	18.05	6.81	23.81	6.09	17.86	5.96
	43	R1(SC)D12	9.50	4.97	21.93	8.80	25.11	6.07	18.17	7.30	24.46	6.45	17.94	7.70
	44	R1(SC)D14	9.27	5.57	22.27	8.95	23.27	5.46	18.41	7.60	23.62	6.03	17.78	6.04
	45	R1(SC)D16	9.20	5.15	22.10	8.95	25.57	5.62	18.15	7.38	24.44	5.43	17.86	6.30
INDIVIDUAIS	46	R1(SC)A11	9.90	5.48	22.32	8.66					25.14			
	47	R1(SC)A12	9.90	5.48	22.32	8.66					25.57			
	48	R1(SC)A13	9.90	5.48	22.32	8.66					26.94			
	49	R1(SC)A21	9.71	4.81	23.42	8.94					27.30			
	50	R1(SC)A22	9.71	4.81	23.42	8.94					26.14			
	51	R1(SC)A23	9.71	4.81	23.42	8.94					25.21			
	52	R1(SC)A31	9.76	6.06	23.47	8.87					25.75			
	53	R1(SC)A32	9.76	6.06	23.47	8.87					25.60			
	54	R1(SC)A33	9.76	6.06	23.47	8.87					27.99			

Quadro 23: Variáveis Manipulativas e de Processo para a Receita PP.

PERTURBAÇÕES	SUPERFÍCIE RESPOSTA		VARIÁVEIS MANIPULATIVAS								VARIÁVEIS DE PROCESSO *vapor = 30psi						
	Produto PP		Vazão de Farinha		Vazão de Vapor		Vazão de Água		Rotação do Helicóide		Temp Saída	Press Saída	Densidade	Umidade	Torque	SME	* STE
			(VM1)		(VM2)		(VM3)		(VM4)		(VP1)	(VP2)	(VP3)	(VPU)	VP4	VP5	VP6
	Ordem Ensaio	Ensaio	NÍVEL	REAL	NÍVEL	REAL	NÍVEL	REAL	NÍVEL	REAL	Actual	Actual	Actual	Actual	Actual	Actual	Actual
			[-2,2]	kg/h	[-2,2]	kg/h	[-2,2]	kg/h	[-2,2]	RPM	C°	psi	kg/hL	%	Kw.s	(kJ/kg)	(kJ/kg)
SIMULTÂNEAS	1	R1(P)D17	0.00	170.01	0.10	25.76	0.01	40.10	0.20	486.84	97.30	215.97	37.25	25.02	9.26	589.16	429.48
	2	R1(P)D16	0.00	170.01	0.04	25.31	0.00	40.00	0.18	486.54	97.30	168.55	42.22	24.47	8.65	648.67	418.94
	3	R1(P)D19	0.00	170.01	0.04	25.27	-0.02	39.84	0.18	486.50	97.30	167.46	41.82	24.70	8.62	647.04	416.99
	4	R1(P)D26	0.00	170.01	0.07	25.54	-0.02	39.83	-1.80	428.14	97.30	175.31	42.33	24.53	8.50	473.47	426.29
	5	R1(P)D27	0.00	170.01	0.03	25.24	0.00	40.00	2.19	545.64	99.14	152.31	41.62	23.66	9.93	706.12	419.27
	6	R1(P)D25	0.00	170.01	0.12	25.69	1.99	55.90	0.17	486.01	97.30	144.79	42.40	26.57	7.94	503.21	460.97
	7	R1(P)D24	0.00	170.01	0.04	25.32	-2.00	24.00	0.22	486.63	97.24	187.88	37.71	22.40	10.42	682.44	383.23
	8	R1(P)D22	0.00	170.01	-1.24	15.73	-0.02	39.80	0.24	487.26	102.47	213.90	37.27	17.23	11.48	730.62	268.27
	9	R1(P)D23	0.00	170.01	1.79	38.45	0.00	40.00	0.20	486.69	102.30	175.48	42.14	24.13	9.19	583.54	627.70
	10	R1(P)D20	-2.00	130.00	-0.07	24.49	0.02	40.20	0.14	484.15	99.51	93.51	38.57	26.39	6.43	528.57	545.39
	11	R1(P)D21	2.00	210.00	0.03	25.21	-0.01	39.90	0.20	486.08	98.00	186.57	40.08	23.88	9.47	488.41	325.27
	12	R1(P)D1	-1.00	150.00	-1.02	17.38	-1.01	31.90	-0.02	455.41	99.40	149.57	41.40	23.34	7.93	533.57	320.96
	13	R1(P)D8	-1.00	150.00	0.94	32.04	-1.01	31.90	-0.78	456.60	79.67	191.35	39.09	22.66	9.82	662.38	560.93
	14	R1(P)D5	-1.00	150.00	-0.89	18.33	0.98	47.80	-0.82	456.48	86.17	155.78	39.66	25.40	8.00	538.09	379.85
	15	R1(P)D7	-1.00	150.00	0.91	31.81	0.96	47.70	-0.82	456.27	87.20	149.26	39.58	27.74	7.67	515.92	614.24
	16	R1(P)D9	-1.00	150.00	-1.00	17.51	-1.03	31.80	1.18	515.32	89.17	153.09	38.99	23.77	8.80	670.14	324.44
	17	R1(P)D11	-1.00	150.00	0.92	31.87	-1.02	31.82	1.18	515.25	91.30	169.67	38.98	24.05	8.73	684.57	581.40
	18	R1(P)D13	-1.00	150.00	-0.96	17.77	0.96	47.70	1.17	515.03	92.26	155.73	40.14	26.14	8.20	623.68	368.15
	19	R1(P)D15	-1.00	150.00	0.95	32.20	0.96	47.65	1.16	514.70	91.20	145.59	39.33	27.26	7.70	565.47	627.70
	20	R1(P)D2	1.00	190.00	-0.93	18.04	-1.01	31.90	-0.77	456.81	91.95	206.52	38.70	21.76	10.08	639.45	252.80
	21	R1(P)D4	1.00	190.00	0.94	32.06	-1.01	31.90	-0.78	456.54	94.20	199.78	37.99	22.20	9.68	517.52	447.94
	22	R1(P)D6	1.00	190.00	-0.99	17.66	0.96	47.70	-0.76	457.05	94.93	215.39	40.07	22.99	10.48	560.78	280.68
	23	R1(P)D8	1.00	190.00	0.90	31.76	0.98	47.80	-0.73	458.20	94.42	180.58	39.81	26.15	9.03	485.60	475.22
	24	R1(P)D10	1.00	190.00	-1.01	17.40	-1.04	31.70	1.21	516.28	94.69	176.07	38.65	21.64	10.43	630.64	239.73
	25	R1(P)D12	1.00	190.00	0.95	32.12	-1.03	31.75	1.22	516.52	95.50	167.20	36.68	21.61	10.77	651.70	447.45
	26	R1(P)D14	1.00	190.00	-0.90	18.27	0.97	47.73	1.21	516.17	95.60	175.90	36.00	23.45	10.21	617.46	284.54
	27	R1(P)D16	1.00	190.00	0.90	31.72	0.98	47.80	1.20	516.04	94.76	169.96	39.84	24.46	10.04	606.67	476.69
	28	R1(P)D28	0.00	170.01	0.15	25.09	0.01	40.10	0.19	486.63	94.67	169.73	39.85	23.95	8.81	558.80	432.12
	29	R1(P)D29	0.00	170.01	0.18	25.17	0.03	40.20	0.19	486.70	94.80	169.22	40.19	23.68	8.80	564.78	433.44
	30	R1(P)D30	0.00	170.01	0.09	25.63	0.02	40.16	0.20	486.95	94.95	170.48	39.08	22.86	9.29	590.08	425.78
	31	R1(P)D31	-0.50	160.00	0.11	25.62	-1.01	31.90	0.90	609.53	95.06	165.48	37.38	22.65	9.07	640.86	437.85
	32	R1(P)D34	0.10	172.00	0.07	25.54	-0.17	38.60	1.09	612.63	94.93	168.90	38.22	22.86	9.28	614.61	413.63
	33	R1(P)D37	0.15	173.00	0.08	25.60	0.29	42.30	-0.10	476.86	94.93	168.87	38.34	24.00	8.98	550.11	421.45
	34	R1(P)D40	0.75	185.00	-0.01	24.90	0.56	44.50	-0.40	467.93	94.70	166.37	38.69	23.17	8.98	605.37	384.77
	35	R1(P)D44	0.30	176.00	-0.03	24.74	-0.29	37.70	-0.55	463.59	94.78	161.93	38.73	23.41	8.63	605.17	390.06
	36	R1(P)D47	-0.34	163.20	-0.03	24.76	-0.93	32.60	-0.17	475.04	95.30	179.05	38.26	22.69	9.48	612.34	416.11
	37	R1(P)D48	-0.65	157.00	-0.12	24.06	-0.16	38.69	-0.55	463.44	95.90	231.55	34.71	22.41	9.81	642.13	437.26
	38	R1(P)D38	-0.88	152.40	-0.22	23.34	-0.25	38.00	0.48	494.39	96.86	249.84	36.12	23.57	10.07	724.24	440.82
	39	R1(P)D35	0.30	176.00	-0.24	23.22	0.76	46.10	-0.73	468.10	96.00	199.60	37.79	24.23	9.35	540.79	391.33
	40	R1(P)D33	-0.75	165.00	0.65	29.90	0.20	41.60	-0.21	473.68	95.30	171.92	36.54	24.33	8.49	575.32	552.80
	41	R1(P)D36	-0.45	169.00	0.31	27.36	0.29	41.62	0.92	507.70	94.70	163.03	36.52	24.70	8.49	594.68	488.69
INDIVIDUAIS	42	R1(P)A11	1.00	190.00	0.07	25.60	0.00	40.00	0.22	486.95	97.19	207.60	39.75	24.68	10.34	569.05	371.35
	43	R1(P)A12	2.00	210.00	0.07	25.62	0.00	40.00	0.24	487.22	92.70	244.58	38.66	22.75	11.39	588.00	330.60
	44	R1(P)A13	-1.00	150.00	0.02	25.17	-0.02	39.67	0.19	486.83	95.14	184.42	39.17	24.91	8.90	638.85	479.35
	45	R1(P)A21	0.00	170.01	-0.94	17.92	-0.04	39.70	0.20	486.95	95.40	193.99	38.66	24.84	9.32	581.61	302.97
	46	R1(P)A22	0.00	170.01	0.91	31.80	-0.03	39.79	0.20	486.96	95.83	191.36	40.43	25.36	9.31	590.92	520.27
	47	R1(P)A23	0.00	170.01	1.79	38.43	-0.01	39.90	0.18	486.29	97.00	170.92	40.61	26.44	8.26	523.63	624.21
	48	R1(P)A31	0.00	170.01	0.10	25.76	-1.01	31.90	0.19	486.78	97.53	161.15	39.63	23.37	9.03	573.12	406.55
	49	R1(P)A32	0.00	170.01	0.08	25.62	0.98	47.80	0.18	486.37	98.19	172.84	40.36	25.76	8.33	528.18	438.97
	50	R1(P)A33	0.00	170.01	0.03	25.21	0.99	47.90	0.17	486.08	97.10	163.03	41.16	26.30	7.91	501.44	432.77

Quadro 24: Análises Físico–Químicas para a Receita PP.

Perturbações	Produto	PP				
	Análises para a Farinha de Alimentação					
	Ordem		Umidade	Lipídios	Proteína	Cinzas
	Ensaio	Ensaio	%	%	%	%
SIMULTÂNEAS	1	R1(P)D17	9.41	3.92	29.77	7.94
	2	R1(P)D18	9.30	4.32	31.60	8.09
	3	R1(P)D19	9.34	4.37	32.32	8.01
	4	R1(P)D26	9.49	3.18	30.26	7.56
	5	R1(P)D27	9.45	3.65	31.20	8.10
	6	R1(P)D25	9.20	4.28	32.56	8.38
	7	R1(P)D24	9.26	4.28	32.35	8.14
	8	R1(P)D22	9.27	3.76	32.56	7.98
	9	R1(P)D23	9.40	3.72	29.95	8.00
	10	R1(P)D20	9.20	4.78	32.89	8.57
	11	R1(P)D21	9.41	4.38	32.37	8.17
	12	R1(P)D1	9.41	4.58	32.14	8.01
	13	R1(P)D3	9.33	3.81	30.35	7.99
	14	R1(P)D5	9.37	3.49	30.92	8.40
	15	R1(P)D7	9.06	4.70	32.47	8.26
	16	R1(P)D9	9.40	4.35	31.55	7.86
	17	R1(P)D11	9.51	3.99	30.14	7.49
	18	R1(P)D13	9.43	4.49	31.41	7.87
	19	R1(P)D15	9.54	3.42	29.63	7.48
	20	R1(P)D2	9.35	4.27	30.56	7.91
	21	R1(P)D4	9.26	4.48	31.56	7.76
	22	R1(P)D6	9.38	3.95	28.21	7.77
	23	R1(P)D8	9.22	3.93	31.31	7.73
	24	R1(P)D10	9.14	4.58	32.96	7.92
	25	R1(P)D12	9.14	4.05	32.62	7.91
	26	R1(P)D14	9.16	4.41	32.30	7.78
	27	R1(P)D16	9.35	3.65	30.37	7.78
	28	R1(P)D28	9.24	3.78	31.60	8.10
	29	R1(P)D29	9.20	3.79	31.93	7.88
	30	R1(P)D30	9.29	3.76	31.23	7.96
	31	R1(P)D31	9.09	3.45	32.59	8.44
	32	R1(P)D34	9.13	4.61	31.49	8.21
	33	R1(P)D37	9.24	3.69	31.63	7.74
	34	R1(P)D40	9.37	3.70	31.59	7.76
	35	R1(P)D44	9.31	3.21	32.22	8.02
	36	R1(P)D47	9.47	4.61	29.70	7.47
	37	R1(P)D48	9.32	4.09	30.16	7.57
	38	R1(P)D38	9.55	3.49	29.08	6.96
	39	R1(P)D39	9.52	3.83	28.03	6.83
	40	R1(P)D33	9.45	3.45	29.46	7.16
	41	R1(P)D35	9.47	3.55	30.14	7.06
INDIVIDUAIS	42	R1(P)A11	9.24	4.28	31.72	8.10
	43	R1(P)A12	9.24	4.28	31.72	8.10
	44	R1(P)A13	9.24	4.28	31.72	8.10
	45	R1(P)A21	9.58	4.05	31.53	8.16
	46	R1(P)A22	9.58	4.05	31.53	8.16
	47	R1(P)A23	9.58	4.05	31.53	8.16
	48	R1(P)A31	9.37	4.41	32.45	8.42
	49	R1(P)A32	9.37	4.41	32.45	8.42
	50	R1(P)A33	9.37	4.41	32.45	8.42

Quadro 25: Variáveis Manipulativas e de Processo para a Receita Wos.

PERTURBAÇÕES	SUPERFÍCIE RESPOSTA		VARIÁVEIS MANIPULATIVAS								VARIÁVEIS DE PROCESSO						*vapor = 30psi
	Produto Wos		Vazão de Fannha		Vazão de Vapor		Vazão deÁgua		Rotação do Helicóide		Temp Saída	Press Saída	Densidade	Umidade	Torque	SME	° STE
			(VM1)		(VM2)		(VM3)		(VM4)		(VP1)	(VP2)	(VP3)	(VP4)	VP4	VP5	VP6
	Ordem		NÍVEL	REAL	NÍVEL	REAL	NÍVEL	REAL	NÍVEL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL	REAL
	Ensaio	Ensaio	[-2;2]	kg/h	[-2;2]	kg/h	[-2;2]	kg/h	[-2;2]	RPM	C°	psi	kg/hL	%	Kw.s	(kJ/kg)	(kJ/kg)
SIMULTÂNEAS	1	R1(Wos)D17	0.00	170.01	0.05	25.40	0.00	40.00	0.20	486.86	96.80	242.05	40.80	23.57	9.23	544.29	390.97
	2	R1(Wos)D18	0.00	170.01	0.05	25.36	0.03	40.20	0.20	486.90	97.00	242.29	41.12	23.10	9.27	546.81	393.39
	3	R1(Wos)D19	0.00	170.01	0.01	25.06	0.03	40.20	0.19	486.70	97.10	233.11	40.89	23.09	8.90	525.00	378.04
	4	R1(Wos)D26	0.00	170.01	-0.05	24.66	0.00	40.00	-1.80	426.90	96.94	239.81	42.54	23.34	8.20	423.76	372.60
	5	R1(Wos)D27	0.00	170.01	-0.02	24.86	-0.03	39.80	2.19	545.46	97.90	210.40	40.27	23.26	9.51	629.46	376.07
	6	R1(Wos)D24	0.00	170.01	-0.06	24.58	-2.14	22.85	0.21	486.26	98.20	246.40	40.79	18.57	9.64	680.77	396.45
	7	R1(Wos)D25	0.00	170.01	0.00	25.02	1.99	65.80	0.18	486.50	100.12	227.79	40.60	23.59	8.81	907.98	409.22
	8	R1(Wos)D20	-2.00	130.00	0.01	25.10	0.03	40.20	0.14	484.20	96.80	149.99	42.26	26.14	6.52	468.30	504.00
	9	R1(Wos)D21	2.00	210.00	0.05	25.42	0.01	40.10	0.19	486.80	95.20	230.18	42.53	23.43	9.05	439.90	384.42
	10	R1(Wos)D22	0.00	170.01	-1.22	15.84	-0.01	39.80	0.21	486.16	96.50	261.39	41.59	21.89	9.64	666.84	254.82
	11	R1(Wos)D23	0.00	170.01	1.82	38.86	0.03	40.20	0.19	486.80	97.00	230.63	41.60	24.30	9.10	636.44	580.73
	12	R1(Wos)D01	-1.00	150.00	-0.86	18.66	-1.03	31.80	-0.82	466.40	96.63	211.67	40.96	22.46	8.01	498.11	312.77
	13	R1(Wos)D02	-1.00	150.00	0.84	31.30	-1.03	31.80	-0.82	466.50	97.10	223.00	42.39	23.24	8.17	505.88	518.70
	14	R1(Wos)D05	-1.00	150.00	-0.72	19.60	0.95	47.70	-0.84	454.90	96.60	184.55	42.05	24.64	7.13	440.96	361.74
	15	R1(Wos)D07	-1.00	150.00	0.92	31.90	0.98	47.80	-0.84	454.70	96.06	182.32	43.92	26.61	6.69	422.12	566.74
	16	R1(Wos)D06	-1.00	150.00	-0.77	19.26	-1.01	31.90	1.17	515.04	96.20	167.20	41.16	23.37	8.56	566.45	326.32
	17	R1(Wos)D11	-1.00	150.00	0.90	31.76	-1.01	31.90	1.17	516.02	96.40	189.65	40.66	23.55	8.52	563.06	528.09
	18	R1(Wos)D13	-1.00	150.00	-0.83	18.90	0.96	47.84	1.15	514.50	96.30	166.20	41.46	25.78	7.40	517.52	348.59
	19	R1(Wos)D03	1.00	190.00	-0.77	19.20	-1.01	31.90	-0.80	456.88	94.49	235.07	43.16	22.88	8.69	454.15	243.86
	20	R1(Wos)D04	1.00	190.00	0.90	31.78	-1.03	31.80	-0.79	456.30	95.98	263.93	41.59	22.98	9.30	465.25	410.11
	21	R1(Wos)D08	1.00	190.00	-0.71	19.64	0.96	47.70	-0.80	456.04	96.10	268.22	43.38	24.07	8.97	448.28	280.18
	22	R1(Wos)D09	1.00	190.00	0.77	30.74	0.98	47.70	-0.80	456.10	96.10	261.63	42.93	25.02	8.89	449.64	427.78
	23	R1(Wos)D10	1.00	190.00	-0.77	19.22	-1.01	31.90	1.22	516.66	96.69	268.61	41.20	21.94	10.82	612.66	245.73
	24	R1(Wos)D12	1.00	190.00	0.99	32.34	-1.01	31.90	1.20	516.00	98.20	239.61	41.25	24.22	9.95	962.66	423.39
	25	R1(Wos)D14	1.00	190.00	-0.71	19.68	0.96	47.70	1.20	515.98	97.60	229.89	42.11	23.88	9.83	666.17	283.44
	26	R1(Wos)D16	1.00	190.00	0.90	31.72	0.98	47.80	1.20	516.04	96.62	237.41	42.03	24.86	10.02	966.69	440.63
	27	R1(Wos)D15	-1.00	150.00	0.90	31.72	0.96	47.70	1.15	514.50	96.08	170.40	43.38	27.04	7.48	523.40	568.13
	28	R1(Wos)D28	0.00	170.01	0.11	25.84	0.03	40.20	0.19	486.80	96.50	222.91	42.21	24.43	8.75	516.68	391.81
	29	R1(Wos)D29	0.00	170.01	0.12	25.86	0.00	40.00	0.19	486.74	96.40	228.09	41.74	24.14	9.03	532.71	393.20
	30	R1(Wos)D30	0.00	170.01	0.11	25.86	0.01	40.10	0.19	486.62	96.50	229.01	41.79	24.03	8.76	516.43	394.89
	31	R1(Wos)D31	-0.50	160.00	0.09	25.66	-1.01	31.90	0.99	509.40	96.00	216.55	40.99	23.27	8.65	576.09	399.11
	32	R1(Wos)D34	0.10	172.00	0.10	25.72	-0.19	38.52	1.09	512.80	97.30	234.23	41.18	23.61	9.57	699.69	394.31
	33	R1(Wos)D37	0.15	173.00	0.09	25.68	0.26	42.10	-0.12	476.60	96.80	230.66	41.80	24.95	8.48	462.67	388.29
	34	R1(Wos)D40	0.75	185.00	0.04	25.32	0.57	44.52	-0.99	468.30	96.40	269.00	42.19	23.06	9.49	499.34	398.91
	35	R1(Wos)D44	0.30	176.00	-0.07	24.50	-0.31	37.50	-0.54	483.94	96.50	249.57	41.74	23.11	9.19	501.25	354.54
	36	R1(Wos)D47	-0.34	163.20	-0.05	24.64	-0.81	32.70	-0.18	474.32	96.60	216.19	41.65	23.86	8.31	496.65	374.41
	37	R1(Wos)D48	-0.65	157.00	-0.16	23.84	-0.20	38.40	-0.60	482.04	81.58	205.37	41.31	26.49	7.64	460.94	366.65
	38	R1(Wos)D38	-0.88	152.40	-0.20	23.80	-0.24	38.10	0.44	493.24	97.72	218.27	41.91	26.53	8.16	539.74	396.57
	39	R1(Wos)D39	0.30	176.00	-0.26	23.06	0.79	46.20	-0.75	457.60	91.08	252.60	41.36	24.92	8.52	456.77	349.21
	40	R1(Wos)D09	-0.75	155.00	0.73	30.44	0.21	41.70	-0.23	473.04	93.40	221.25	40.88	25.57	7.65	478.05	507.25
	41	R1(Wos)D32	0.62	182.50	0.71	30.30	0.00	40.00	0.87	506.04	94.50	237.90	40.57	26.19	8.21	472.67	422.84
	42	R1(Wos)D35	-0.45	160.80	0.55	29.12	0.75	46.00	0.91	507.30	97.00	201.91	42.29	25.07	7.77	503.40	478.07
	43	R1(Wos)D36	0.45	179.00	0.72	30.40	0.58	44.60	0.37	488.92	96.60	229.01	41.34	25.04	8.17	443.68	442.88
	44	R1(Wos)D41	-0.10	168.00	0.57	29.26	-0.54	35.70	0.34	490.14	97.30	264.31	38.44	23.43	8.91	536.94	442.48
	45	R1(Wos)D42	0.40	178.00	-0.48	21.42	-0.83	33.40	0.48	494.50	98.50	261.29	38.35	22.19	9.74	660.89	298.06
	46	R1(Wos)D43	-0.60	158.00	-0.64	20.20	0.46	43.70	0.81	504.44	99.40	260.61	38.11	23.17	9.46	619.22	347.09
	47	R1(Wos)D45	-0.20	166.00	-0.56	20.78	-0.24	38.10	1.01	510.30	98.60	276.60	38.10	22.85	10.35	655.02	328.75
	48	R1(Wos)D46	-0.20	166.00	0.73	30.46	-0.28	38.16	0.30	489.12	98.40	277.95	39.03	20.48	9.65	586.21	467.55
	49	R1(Wos)D49	-0.50	160.00	0.20	26.46	-1.16	30.70	0.45	493.84	98.96	267.68	37.30	22.35	7.51	476.36	411.34
INDIVIDUAIS	50	R1(Wos)A11	-1.00	150.00	0.06	25.46	0.00	40.00	0.19	486.60	90.04	238.07	40.70	23.90	8.75	577.94	441.93
	51	R1(Wos)A12	1.00	190.00	0.09	25.66	-0.02	39.80	0.21	486.20	93.70	272.05	40.65	23.33	9.69	516.58	345.07
	52	R1(Wos)A13	2.00	210.00	-0.05	24.59	0.00	40.00	0.23	486.90	96.80	312.60	40.33	22.21	10.86	528.44	295.99
	53	R1(Wos)A21	0.00	170.01	-0.05	18.64	0.00	40.00	0.22	486.46	97.60	276.75	39.69	22.15	10.22	603.31	257.12
	54	R1(Wos)A22	0.00	170.01	0.94	32.04	-0.02	39.88	0.20	486.90	97.37	263.38	40.65	23.77	9.23	644.38	481.63
	55	R1(Wos)A23	0.00	170.01	1.82	38.86	-0.02	39.80	0.17	485.17	96.80	226.10	40.43	24.80	8.09	476.61	577.53
	56	R1(Wos)A31	0.00	170.01	0.09	25.65	-1.01	31.90	0.19	485.80	96.99	236.63	39.72	21.43	9.11	536.97	371.34
	57	R1(Wos)A32	0.00	170.01	0.03	25.21	0.97	47.73	0.18	485.37	97.30	219.69	41.11	24.27	8.38	493.54	386.95
	58	R1(Wos)A33	0.00	170.01	0.00	24.99	0.96	47.70	0.19	485.60	96.80	227.30	41.70	24.45	8.76	516.41	393.70

Quadro 26: Análises Físico–Químicas para a Receita Wos.

Peticões	Produto Wos					
	Análises para a Farinha de Alimentação					
	Ordem		Umidade	Lipídios	Proteína	Cinzas
	Ensaio	Ensaio	%	%	%	%
SIMULTÂNEAS	1	R1(Wos)D17	8.11	4.67	32.77	5.98
	2	R1(Wos)D18	7.92	5.00	37.43	6.54
	3	R1(Wos)D19	7.94	5.65	37.42	6.63
	4	R1(Wos)D26	7.97	5.52	37.08	6.51
	5	R1(Wos)D27	7.95	5.57	36.29	6.54
	6	R1(Wos)D24	7.94	5.73	37.35	6.27
	7	R1(Wos)D25	7.86	5.68	37.26	6.62
	8	R1(Wos)D20	7.83	5.63	36.38	6.31
	9	R1(Wos)D21	7.65	5.44	36.44	6.41
	10	R1(Wos)D22	8.34	4.34	31.09	5.71
	11	R1(Wos)D23	7.98	5.30	34.37	6.28
	12	R1(Wos)D1	7.78	5.13	35.45	6.40
	13	R1(Wos)D3	7.88	5.66	34.92	6.28
	14	R1(Wos)D5	7.71	5.64	36.85	6.27
	15	R1(Wos)D7	8.07	5.17	34.99	5.89
	16	R1(Wos)D9	8.04	4.54	33.80	5.92
	17	R1(Wos)D11	8.09	5.18	34.14	6.23
	18	R1(Wos)D13	8.03	5.50	36.69	6.48
	19	R1(Wos)D2	7.89	5.70	36.50	6.33
	20	R1(Wos)D4	8.02	5.18	35.98	6.36
	21	R1(Wos)D6	7.97	5.46	35.46	6.34
	22	R1(Wos)D8	8.06	5.22	34.44	6.17
	23	R1(Wos)D10	8.12	5.71	35.27	6.30
	24	R1(Wos)D12	8.36	4.30	33.11	5.62
	25	R1(Wos)D14	8.23	5.14	33.84	6.19
	26	R1(Wos)D16	8.25	5.14	34.56	6.22
	27	R1(Wos)D15	7.99	5.72	37.05	6.62
	28	R1(Wos)D28	8.44	5.25	36.69	5.82
	29	R1(Wos)D29	8.43	5.11	35.76	5.99
	30	R1(Wos)D30	8.40	4.97	34.57	6.01
	31	R1(Wos)D31	8.47	5.65	34.95	5.99
	32	R1(Wos)D34	8.33	5.18	34.63	6.14
	33	R1(Wos)D37	8.33	3.78	35.01	6.24
	34	R1(Wos)D40	8.49	3.80	30.88	5.79
	35	R1(Wos)D44	8.43	4.96	35.06	5.99
	36	R1(Wos)D47	8.70	5.07	37.25	6.18
	37	R1(Wos)D48	8.05	5.92	39.09	6.35
	38	R1(Wos)D38	7.97	5.46	37.02	6.33
	39	R1(Wos)D39	7.95	5.49	36.75	6.25
	40	R1(Wos)D33	7.90	5.70	36.58	6.42
	41	R1(Wos)D32	7.90	5.67	36.34	6.11
	42	R1(Wos)D35	7.87	5.30	36.58	6.23
	43	R1(Wos)D36	7.89	5.04	36.17	6.22
	44	R1(Wos)D41	8.08	3.85	34.54	6.06
	45	R1(Wos)D42	8.21	5.23	36.62	5.94
	46	R1(Wos)D43	8.38	4.69	34.76	5.74
	47	R1(Wos)D45	8.01	1.51	35.69	6.01
	48	R1(Wos)D46	7.92	4.80	36.38	5.85
	49	R1(Wos)D49	7.89	5.21	33.84	6.06
INDIVIDUAIS	50	R1(Wos)A11	7.76	5.30	35.26	6.53
	51	R1(Wos)A12	7.76	5.30	35.26	6.53
	52	R1(Wos)A13	7.76	5.30	35.26	6.53
	53	R1(Wos)A21	7.92	5.60	35.52	6.51
	54	R1(Wos)A22	7.92	5.60	35.52	6.51
	55	R1(Wos)A23	7.92	5.60	35.52	6.51
	56	R1(Wos)A31	7.86	5.39	36.62	6.59
	57	R1(Wos)A32	7.86	5.39	36.62	6.59
	58	R1(Wos)A33	7.86	5.39	36.62	6.59

Quadro 27: Resumo das Variáveis Normalizadas para a Receita SC.

						EFEITOS						
		Base seca (%)				relação	relação	relação Farinha /	delta rotação	relação (Vapor +	relação	relação
RECEITA	Umidade	Lipídios	Proteínas	Cinzas	Carboidratos	Vapor / Farinha	Umidade / Farinha	(Vapor+Umidade)	Helicóide (%)	Umidade)/Farinha	Vapor / Umidade	Umidade / Vapor
SC	%					VM_{21}	VM_{U1}	$VM_{1(2U)}$	VM_{4R}	$1 / VM_{1(2U)}$	VM_{2U}	$1 / VM_{2U}$
Código				Valor de Referência		0.18	0.34	1.92	1.00	0.52	0.52	1.93
R1(SC)D28	9.67	6.99	25.29	10.01	57.71	0.18	0.34	1.91	0.05	0.52	0.52	1.92
R1(SC)D29	9.59	7.56	26.52	10.09	55.83	0.18	0.34	1.92	0.01	0.52	0.52	1.93
R1(SC)D30	9.62	6.39	24.86	9.68	58.17	0.19	0.35	1.90	-0.01	0.53	0.52	1.94
R1(SC)D25	9.90	5.76	23.64	9.51	60.89	0.18	0.45	1.59	-0.17	0.63	0.39	2.57
R1(SC)D1	9.60	7.63	25.77	10.07	56.52	0.16	0.33	2.05	-4.15	0.49	0.48	2.09
R1(SC)D3	10.05	6.54	24.05	8.88	60.53	0.24	0.34	1.72	-4.11	0.58	0.72	1.38
R1(SC)D5	9.86	7.53	24.46	9.84	58.16	0.16	0.41	1.74	-4.27	0.57	0.38	2.60
R1(SC)D7	9.88	6.33	24.46	9.49	59.73	0.24	0.41	1.53	-4.29	0.65	0.57	1.74
R1(SC)D9	9.94	7.61	23.93	9.25	59.21	0.16	0.33	2.02	4.04	0.49	0.48	2.09
R1(SC)D11	9.94	6.78	23.12	9.33	60.77	0.25	0.34	1.70	4.11	0.59	0.75	1.34
R1(SC)D13	9.92	6.60	23.32	9.37	60.70	0.16	0.41	1.74	3.89	0.57	0.39	2.59
R1(SC)D15	9.76	6.02	22.04	9.28	62.86	0.25	0.41	1.51	3.94	0.66	0.61	1.64
R1(SC)D26	9.72	6.30	24.65	10.13	59.02	0.20	0.37	1.74	-8.35	0.57	0.54	1.86
R1(SC)D27	9.74	7.59	24.75	9.58	58.06	0.20	0.37	1.75	8.13	0.57	0.54	1.86
R1(SC)D22	10.15	6.74	23.14	9.70	60.41	0.10	0.36	2.07	-0.06	0.48	0.27	3.66
R1(SC)D23	9.82	5.79	24.27	9.35	60.59	0.29	0.37	1.50	-0.08	0.67	0.78	1.29
R1(SC)D24	9.80	6.97	24.00	9.29	59.74	0.19	0.27	2.21	0.11	0.45	0.65	1.54
R1(SC)D17	9.89	6.14	23.93	9.80	60.12	0.18	0.36	1.91	0.13	0.52	0.51	1.95
R1(SC)D18	9.94	6.66	23.72	9.47	60.16	0.18	0.36	1.91	0.08	0.52	0.51	1.96
R1(SC)D19	9.71	6.29	23.73	10.42	59.56	0.19	0.34	1.92	0.09	0.52	0.52	1.94
R1(SC)D41	9.73	7.24	24.27	9.81	58.68	0.20	0.33	1.89	0.65	0.53	0.52	1.92
R1(SC)D43	9.58	7.13	24.61	9.63	58.63	0.16	0.38	1.85	2.51	0.54	0.43	2.32
R1(SC)D44	9.97	5.98	22.96	9.32	61.74	0.17	0.33	2.02	-2.90	0.50	0.50	1.99
R1(SC)D46	9.75	6.87	23.64	9.97	59.52	0.22	0.34	1.78	0.53	0.56	0.64	1.56
R1(SC)D45	9.78	6.90	23.65	9.70	59.75	0.16	0.34	2.00	3.35	0.50	0.46	2.17
R1(SC)D39	9.84	5.09	20.99	8.12	67.80	0.19	0.32	1.96	-4.01	0.51	0.59	1.71
R1(SC)D35	9.11	4.02	24.94	10.05	60.96	0.21	0.36	1.72	3.00	0.58	0.55	1.83
R1(SC)D32	9.30	6.53	23.69	10.54	59.24	0.22	0.36	1.73	2.96	0.58	0.62	1.61
R1(SC)D38	9.12	6.87	24.20	10.21	58.71	0.18	0.35	1.87	1.19	0.54	0.52	1.91
R1(SC)D34	9.22	6.67	24.15	10.06	59.12	0.19	0.33	1.93	3.78	0.52	0.56	1.79
R1(SC)D31	9.58	7.05	23.68	9.65	59.62	0.16	0.36	1.84	-3.80	0.54	0.43	2.32
R1(SC)D33	9.11	6.86	24.68	10.18	58.28	0.23	0.36	1.68	-1.64	0.60	0.63	1.58
R1(SC)D36	9.26	6.72	24.68	10.22	58.36	0.20	0.35	1.84	-2.34	0.54	0.57	1.77
R1(SC)D37	9.18	6.93	24.62	10.16	58.29	0.19	0.34	1.91	-1.15	0.52	0.53	1.90
R1(SC)D40	8.96	6.19	23.57	10.47	59.76	0.19	0.38	1.78	-2.41	0.56	0.49	2.04
R1(SC)D42	9.18	6.15	23.46	11.07	59.30	0.15	0.30	2.25	1.32	0.44	0.49	2.04
R1(SC)D20	8.98	7.18	24.65	10.97	57.00	0.29	0.40	1.61	-0.10	0.62	0.57	1.76
R1(SC)D2	8.96	7.59	25.65	10.24	56.52	0.12	0.26	2.46	-3.93	0.40	0.45	2.24
R1(SC)D4	9.12	6.77	24.17	10.41	58.65	0.19	0.26	2.11	-3.88	0.48	0.69	1.44
R1(SC)D6	8.94	6.77	24.62	11.60	57.11	0.13	0.34	2.13	-3.92	0.47	0.36	2.67
R1(SC)D8	9.22	7.16	25.63	10.09	56.91	0.19	0.35	1.87	-4.00	0.54	0.55	1.81
R1(SC)D10	9.46	6.46	23.40	9.99	60.16	0.13	0.28	2.40	4.35	0.42	0.46	2.16
R1(SC)D12	9.43	6.28	24.03	9.64	60.06	0.23	0.30	1.90	4.38	0.53	0.75	1.33
R1(SC)D14	9.20	6.92	24.34	9.78	58.96	0.14	0.34	2.08	4.34	0.48	0.39	2.55
R1(SC)D16	9.13	6.46	24.14	9.77	59.63	0.19	0.34	1.87	4.21	0.54	0.56	1.80
R1(SC)A11	9.83	6.87	24.57	9.53	59.04	0.15	0.32	2.06	0.37	0.49	0.50	2.00
R1(SC)A12	9.84	6.74	24.60	9.54	59.12	0.13	0.29	2.37	0.23	0.42	0.46	2.18
R1(SC)A13	9.78	7.37	24.43	9.48	59.72	0.26	0.46	1.39	-0.20	0.72	0.57	1.75
R1(SC)A21	9.63	6.20	25.70	9.81	58.29	0.22	0.34	1.79	-0.01	0.56	0.62	1.60
R1(SC)A22	9.63	6.20	25.70	9.81	58.29	0.30	0.34	1.56	0.10	0.64	0.87	1.15
R1(SC)A23	9.63	6.20	25.70	9.81	58.29	0.14	0.34	2.05	0.02	0.49	0.42	2.36
R1(SC)A31	9.70	7.58	25.77	9.74	56.91	0.18	0.31	2.06	0.06	0.49	0.57	1.74
R1(SC)A32	9.70	7.58	25.77	9.74	56.91	0.18	0.38	1.60	0.09	0.56	0.47	2.13
R1(SC)A33	9.70	7.58	25.77	9.74	56.91	0.18	0.45	1.59	-0.10	0.63	0.39	2.54

Quadro 28: Resumo das Variáveis Normalizadas para a Receita PP.

		Base seca (%)				EFEITOS						
RECEITA PP	Umidade %	Lipídios	Proteínas	Cinzas	Carboidratos	relação Vapor / Farinha	relação Umidade / Farinha	relação Farinha / (Vapor+Umidade)	delta rotação Halmóide (%)	relação (Vapor + Umidade)/Farinha	relação Vapor / Umidade	relação Umidade / Vapor
						VM_{21}	VM_{U1}	$VM_{1(2U)}$	$VM_{\delta R}$	$1 / VM_{1(2U)}$	VM_{2U}	$1 / VM_{2U}$
Código				Valor de Referência		0.16	0.27	1.88	1.00	0.53	0.44	2.29
R1(P)D17	9.32	5.29	32.53	8.68	53.50	0.17	0.36	1.90	0.19	0.53	0.46	2.18
R1(P)D18	9.22	5.72	34.49	8.63	50.96	0.16	0.36	1.92	0.11	0.52	0.45	2.21
R1(P)D19	9.26	5.77	35.29	8.75	50.19	0.16	0.36	1.92	0.10	0.52	0.45	2.20
R1(P)D26	9.40	4.48	33.09	8.29	54.14	0.16	0.36	1.91	-12.14	0.52	0.46	2.19
R1(P)D27	9.36	4.99	34.11	8.86	52.04	0.16	0.36	1.91	12.60	0.52	0.45	2.22
R1(P)D25	9.12	5.67	35.60	9.14	49.70	0.17	0.46	1.60	0.00	0.62	0.36	2.76
R1(P)D24	9.18	5.67	35.29	8.88	50.16	0.16	0.26	2.40	0.34	0.42	0.64	1.57
R1(P)D22	9.19	5.10	35.53	8.71	50.66	0.10	0.36	2.19	0.47	0.46	0.28	3.53
R1(P)D23	9.31	5.07	32.73	8.74	53.47	0.25	0.36	1.65	0.18	0.61	0.69	1.46
R1(P)D20	9.09	6.50	35.75	9.32	48.43	0.20	0.44	1.56	-0.18	0.64	0.47	2.13
R1(P)D21	9.34	5.61	35.44	8.95	50.00	0.13	0.31	2.26	0.22	0.44	0.42	2.37
R1(P)D1	9.31	6.13	35.08	8.74	50.05	0.13	0.33	2.17	-6.10	0.46	0.38	2.65
R1(P)D3	9.23	5.29	33.09	8.71	52.91	0.23	0.39	1.77	-5.86	0.57	0.70	1.43
R1(P)D5	9.27	4.94	33.73	9.16	52.17	0.13	0.45	1.71	-6.09	0.58	0.30	3.37
R1(P)D7	8.97	6.24	35.30	9.00	49.46	0.23	0.44	1.48	-6.13	0.67	0.52	1.93
R1(P)D9	9.30	5.88	34.43	8.68	51.11	0.13	0.33	2.17	6.25	0.46	0.38	2.62
R1(P)D11	9.41	5.50	32.93	8.18	53.39	0.23	0.34	1.75	6.24	0.57	0.69	1.46
R1(P)D13	9.33	6.04	34.29	8.69	51.09	0.13	0.45	1.73	6.19	0.58	0.29	3.48
R1(P)D15	9.44	4.87	32.38	8.17	54.57	0.23	0.45	1.46	6.12	0.69	0.52	1.92
R1(P)D2	9.27	5.57	33.41	8.65	52.09	0.10	0.29	2.57	-6.91	0.39	0.36	2.75
R1(P)D4	9.20	5.79	34.48	8.48	51.26	0.18	0.28	2.13	-6.87	0.47	0.65	1.54
R1(P)D6	9.30	5.22	30.85	8.60	55.43	0.10	0.38	2.09	-5.76	0.48	0.27	3.73
R1(P)D8	9.14	5.19	34.18	8.44	52.19	0.18	0.38	1.79	-6.94	0.56	0.49	2.06
R1(P)D10	9.07	5.69	35.94	8.64	49.53	0.10	0.26	2.62	6.45	0.38	0.35	2.82
R1(P)D12	9.07	5.31	35.58	8.63	50.48	0.18	0.26	2.14	6.50	0.47	0.65	1.53
R1(P)D14	9.09	5.71	35.24	8.49	50.57	0.10	0.37	2.09	6.43	0.48	0.28	3.57
R1(P)D16	9.27	5.11	33.20	8.51	53.19	0.18	0.38	1.79	6.40	0.56	0.48	2.07
R1(P)D28	9.16	5.12	34.47	8.64	51.57	0.17	0.36	1.90	0.13	0.53	0.47	2.14
R1(P)D29	9.12	5.13	34.81	8.69	51.46	0.17	0.36	1.90	0.14	0.53	0.47	2.13
R1(P)D30	9.21	5.11	34.08	8.69	52.12	0.16	0.36	1.91	0.20	0.52	0.46	2.18
R1(P)D31	9.00	4.82	35.47	9.19	50.53	0.18	0.32	2.09	6.06	0.49	0.55	1.80
R1(P)D34	9.06	6.01	34.31	8.95	50.73	0.16	0.34	1.98	5.70	0.51	0.47	2.13
R1(P)D37	9.16	5.01	34.51	8.44	52.04	0.16	0.37	1.89	-1.88	0.53	0.44	2.28
R1(P)D40	9.39	4.97	34.53	8.48	52.02	0.15	0.37	1.95	-3.52	0.51	0.40	2.48
R1(P)D44	9.23	4.47	35.18	8.76	51.59	0.16	0.34	2.04	-4.42	0.49	0.46	2.19
R1(P)D47	9.38	6.08	32.46	8.17	53.29	0.17	0.32	2.05	-2.06	0.49	0.52	1.94
R1(P)D48	9.23	5.55	32.90	8.26	53.30	0.17	0.37	1.86	-4.46	0.54	0.45	2.21
R1(P)D38	9.45	4.93	31.79	7.61	56.67	0.17	0.38	1.84	1.93	0.54	0.44	2.25
R1(P)D39	9.44	5.16	30.69	7.48	56.68	0.14	0.39	1.67	-6.56	0.54	0.37	2.71
R1(P)D33	9.36	4.67	32.18	7.62	55.14	0.21	0.40	1.65	-2.36	0.61	0.63	1.59
R1(P)D35	9.38	4.95	32.94	7.72	54.39	0.19	0.39	1.74	4.68	0.57	0.48	2.09
R1(P)A11	9.16	5.57	34.64	8.84	50.95	0.16	0.35	2.10	0.32	0.49	0.44	2.26
R1(P)A12	9.17	5.49	34.67	8.85	50.99	0.13	0.31	2.26	0.46	0.44	0.43	2.33
R1(P)A13	9.14	5.60	34.55	8.82	50.83	0.16	0.39	1.75	0.14	0.57	0.47	2.13
R1(P)A21	9.49	5.44	34.52	8.93	51.11	0.12	0.36	2.10	0.20	0.48	0.32	3.12
R1(P)A22	9.49	5.44	34.52	8.93	51.11	0.20	0.36	1.77	0.20	0.57	0.57	1.76
R1(P)A23	9.49	5.44	34.52	8.93	51.11	0.25	0.36	1.64	0.06	0.61	0.68	1.46
R1(P)A31	9.28	5.82	35.45	9.20	49.54	0.17	0.31	2.11	0.16	0.47	0.54	1.86
R1(P)A32	9.28	5.82	35.45	9.20	49.54	0.16	0.41	1.74	0.08	0.57	0.40	2.49
R1(P)A33	9.28	5.82	35.45	9.20	49.54	0.16	0.41	1.75	0.02	0.57	0.39	2.53

Quadro 29: Resumo das Variáveis Normalizadas para a Receita Wos.

						EFEITOS						
		Base seca (%)				relação	relação	relação Farinha /	delta rotação	relação (Vapor +	relação	relação
RECEITA	Umidade	Lipídios	Proteínas	Cinzas	Carboidratos	Vapor / Farinha	Umidade / Farinha	(Vapor+Umidade)	Helicóide (%)	Umidade)/Farinha	Vapor / Umidade	Umidade / Vapor
Wos	%					VM_{21}	VM_{U1}	$VM_{1(2U)}$	VM_{4R}	$1 / VM_{1(2U)}$	VM_{2U}	$1 / VM_{2U}$
Código				Valor de Referência		0.15	0.33	2.09	1.00	0.48	0.47	2.15
R1(Wos)D17	7.74	9.79	38.89	6.18	50.13	0.15	0.33	2.08	0.18	0.48	0.47	2.12
R1(Wos)D18	7.56	10.12	38.64	6.76	44.50	0.16	0.33	2.08	0.19	0.48	0.47	2.12
R1(Wos)D19	7.58	10.79	38.63	6.84	43.73	0.15	0.33	2.09	0.14	0.48	0.47	2.14
R1(Wos)D26	7.60	10.66	38.29	6.72	44.33	0.15	0.33	2.10	-12.19	0.48	0.46	2.17
R1(Wos)D27	7.59	10.71	37.47	6.75	45.07	0.15	0.32	2.11	12.47	0.47	0.47	2.14
R1(Wos)D24	7.58	10.67	38.56	6.47	44.09	0.15	0.22	2.70	0.26	0.37	0.68	1.48
R1(Wos)D25	7.60	10.61	38.44	6.63	43.92	0.15	0.42	1.75	0.10	0.67	0.36	2.76
R1(Wos)D20	7.37	12.09	36.95	6.41	44.54	0.20	0.39	1.70	-0.16	0.69	0.50	2.01
R1(Wos)D21	7.56	9.71	37.94	6.67	45.67	0.13	0.28	2.46	0.16	0.41	0.45	2.23
R1(Wos)D22	7.96	9.48	32.23	5.92	52.37	0.10	0.33	2.35	0.24	0.43	0.29	3.41
R1(Wos)D23	7.61	10.43	35.50	6.49	47.58	0.23	0.33	1.78	0.16	0.56	0.72	1.39
R1(Wos)D1	7.38	10.82	36.30	6.66	46.32	0.13	0.30	2.36	-6.10	0.42	0.43	2.33
R1(Wos)D3	7.47	11.38	35.79	6.44	46.39	0.21	0.30	1.95	-6.08	0.51	0.72	1.39
R1(Wos)D5	7.31	11.34	37.71	6.42	44.54	0.13	0.40	1.66	-6.21	0.54	0.33	3.02
R1(Wos)D7	7.65	10.90	35.94	6.05	47.12	0.22	0.41	1.59	-6.25	0.63	0.53	1.88
R1(Wos)D9	7.63	10.25	34.70	6.08	48.97	0.13	0.30	2.31	6.19	0.43	0.44	2.28
R1(Wos)D11	7.67	10.91	35.07	6.40	47.62	0.22	0.30	1.93	6.19	0.52	0.72	1.39
R1(Wos)D13	7.62	11.23	37.67	6.65	44.45	0.13	0.41	1.66	6.09	0.54	0.31	3.17
R1(Wos)D2	7.57	10.37	37.06	6.57	45.21	0.10	0.26	2.77	-6.00	0.36	0.41	2.44
R1(Wos)D4	7.69	9.84	37.37	6.61	46.18	0.17	0.26	2.32	-5.92	0.43	0.68	1.48
R1(Wos)D6	7.64	10.13	36.81	6.58	46.48	0.11	0.34	2.22	-5.97	0.45	0.31	3.20
R1(Wos)D8	7.73	9.89	35.79	6.41	47.91	0.17	0.34	1.95	-5.96	0.51	0.49	2.05
R1(Wos)D10	7.79	10.40	36.67	6.55	46.37	0.11	0.26	2.75	6.51	0.36	0.41	2.46
R1(Wos)D12	8.02	8.96	34.51	6.07	50.46	0.18	0.26	2.27	6.39	0.44	0.68	1.48
R1(Wos)D14	7.89	9.62	35.23	6.44	48.51	0.11	0.35	2.20	6.38	0.45	0.31	3.22
R1(Wos)D16	7.91	9.62	35.98	6.48	47.72	0.17	0.35	1.92	6.40	0.52	0.50	2.00
R1(Wos)D15	7.58	11.45	38.02	6.79	43.74	0.22	0.41	1.60	6.08	0.63	0.53	1.88
R1(Wos)D28	8.05	10.43	38.08	6.04	45.45	0.16	0.33	2.04	0.12	0.49	0.47	2.11
R1(Wos)D29	8.04	10.28	37.11	5.22	46.39	0.16	0.33	2.04	0.15	0.49	0.49	2.10
R1(Wos)D30	8.02	10.13	35.86	6.23	47.77	0.16	0.33	2.04	0.13	0.49	0.48	2.10
R1(Wos)D31	8.06	11.12	36.17	6.20	46.51	0.17	0.29	2.17	5.03	0.46	0.56	1.77
R1(Wos)D34	7.95	10.29	35.92	6.37	47.42	0.16	0.32	2.11	5.73	0.47	0.49	2.05
R1(Wos)D37	7.95	8.82	36.32	6.47	48.39	0.15	0.34	2.03	-1.75	0.49	0.45	2.21
R1(Wos)D40	8.13	8.56	32.19	6.04	53.21	0.14	0.34	2.07	-3.44	0.48	0.42	2.38
R1(Wos)D44	8.06	9.97	37.27	6.23	46.52	0.14	0.31	2.20	-4.34	0.45	0.47	2.14
R1(Wos)D47	8.29	10.46	38.68	6.42	44.44	0.16	0.30	2.20	-2.20	0.46	0.53	1.90
R1(Wos)D48	7.65	11.44	40.24	6.54	41.78	0.16	0.33	2.04	-4.73	0.49	0.47	2.14
R1(Wos)D38	7.56	11.10	38.01	6.50	44.38	0.16	0.34	2.01	1.70	0.50	0.47	2.14
R1(Wos)D39	7.60	10.47	38.01	6.46	45.05	0.14	0.35	2.04	-5.65	0.49	0.38	2.61
R1(Wos)D33	7.50	11.26	37.57	6.69	44.57	0.20	0.36	1.79	-2.47	0.56	0.56	1.77
R1(Wos)D32	7.56	10.60	37.63	6.33	45.54	0.17	0.31	2.08	4.34	0.46	0.55	1.80
R1(Wos)D35	7.49	10.67	37.63	6.41	45.29	0.19	0.38	1.78	4.60	0.56	0.50	2.01
R1(Wos)D36	7.55	9.93	37.42	6.43	46.22	0.18	0.34	1.94	-3.32	0.52	0.52	1.93
R1(Wos)D41	7.71	9.00	35.69	6.26	49.05	0.18	0.30	2.07	1.06	0.48	0.59	1.68
R1(Wos)D42	7.85	10.18	38.00	6.16	45.66	0.12	0.28	2.47	1.96	0.40	0.45	2.24
R1(Wos)D43	7.97	10.18	35.91	5.93	47.97	0.13	0.37	1.98	4.01	0.50	0.35	2.82
R1(Wos)D45	7.63	6.63	36.63	6.20	50.34	0.13	0.32	2.23	5.22	0.45	0.40	2.47
R1(Wos)D46	7.55	10.02	37.51	6.09	46.45	0.19	0.32	1.97	0.85	0.51	0.59	1.69
R1(Wos)D49	7.51	10.61	34.81	6.23	48.35	0.17	0.28	2.23	1.78	0.45	0.51	1.64
R1(Wos)A11	7.36	11.00	36.10	6.69	46.22	0.17	0.35	1.90	0.12	0.53	0.49	2.03
R1(Wos)A12	7.44	9.94	36.63	6.76	46.77	0.14	0.30	2.29	0.25	0.44	0.47	2.13
R1(Wos)A13	7.47	9.56	36.68	6.79	46.97	0.12	0.28	2.50	0.39	0.40	0.44	2.29
R1(Wos)A21	7.56	10.73	36.66	6.72	45.80	0.11	0.32	2.28	0.30	0.44	0.35	2.87
R1(Wos)A22	7.56	10.73	36.66	6.72	45.88	0.19	0.32	1.93	0.19	0.52	0.60	1.66
R1(Wos)A23	7.56	10.73	36.66	6.72	45.88	0.23	0.32	1.79	0.04	0.56	0.73	1.38
R1(Wos)A31	7.50	10.51	37.78	6.80	44.91	0.16	0.27	2.32	0.16	0.43	0.57	1.75
R1(Wos)A32	7.50	10.51	37.78	6.80	44.91	0.15	0.37	1.91	0.08	0.52	0.41	2.42
R1(Wos)A33	7.50	10.51	37.78	6.80	44.91	0.15	0.37	1.92	0.12	0.52	0.41	2.44

IX) ANEXO III

O Anexo III mostra as relações estatísticas para as variáveis dependentes Densidade e Umidade do Produto Extrusado Úmido com a Temperatura e Pressão de Saída.

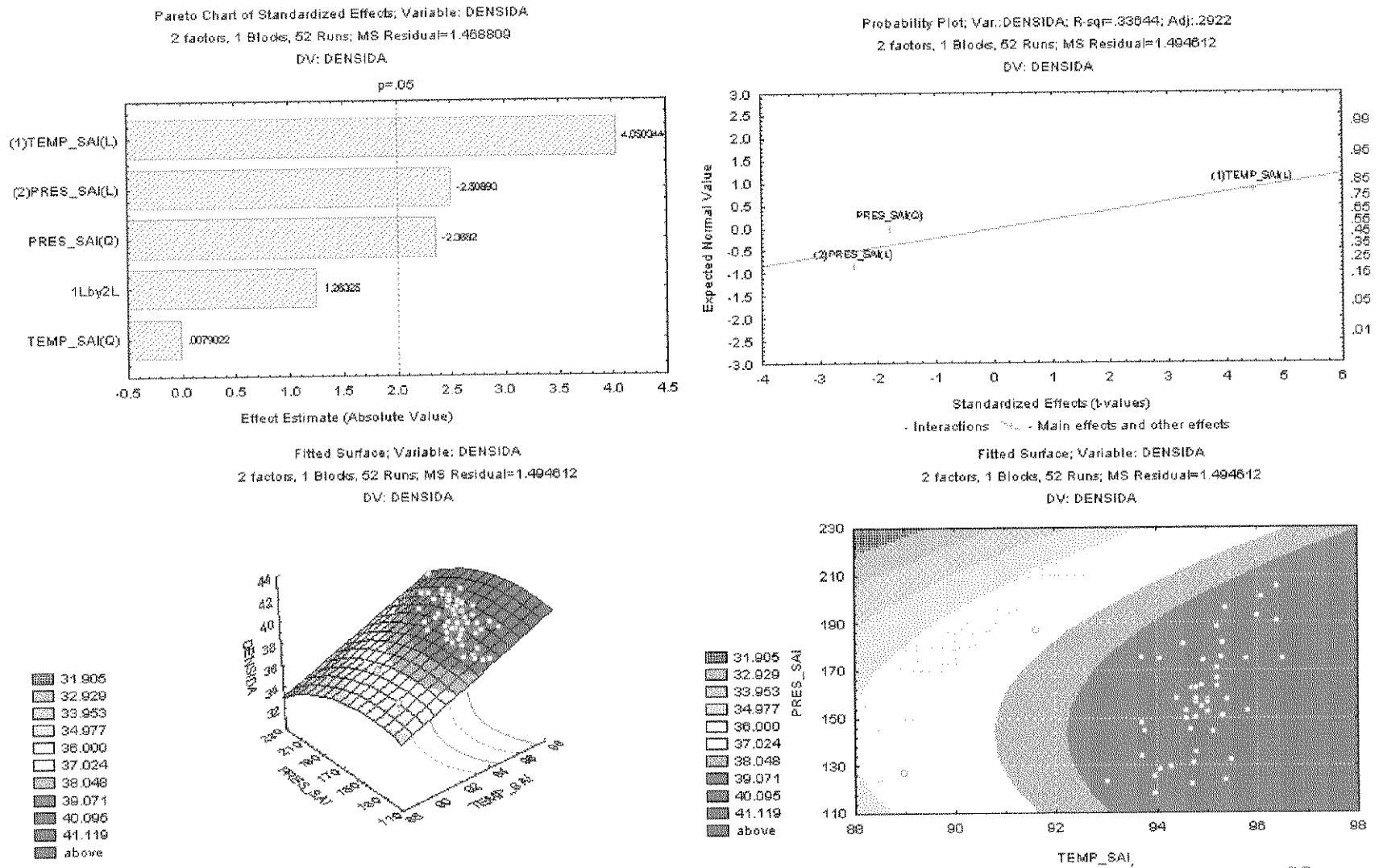


Figura 48: Relação da Temperatura (^0C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido na Receita SC.

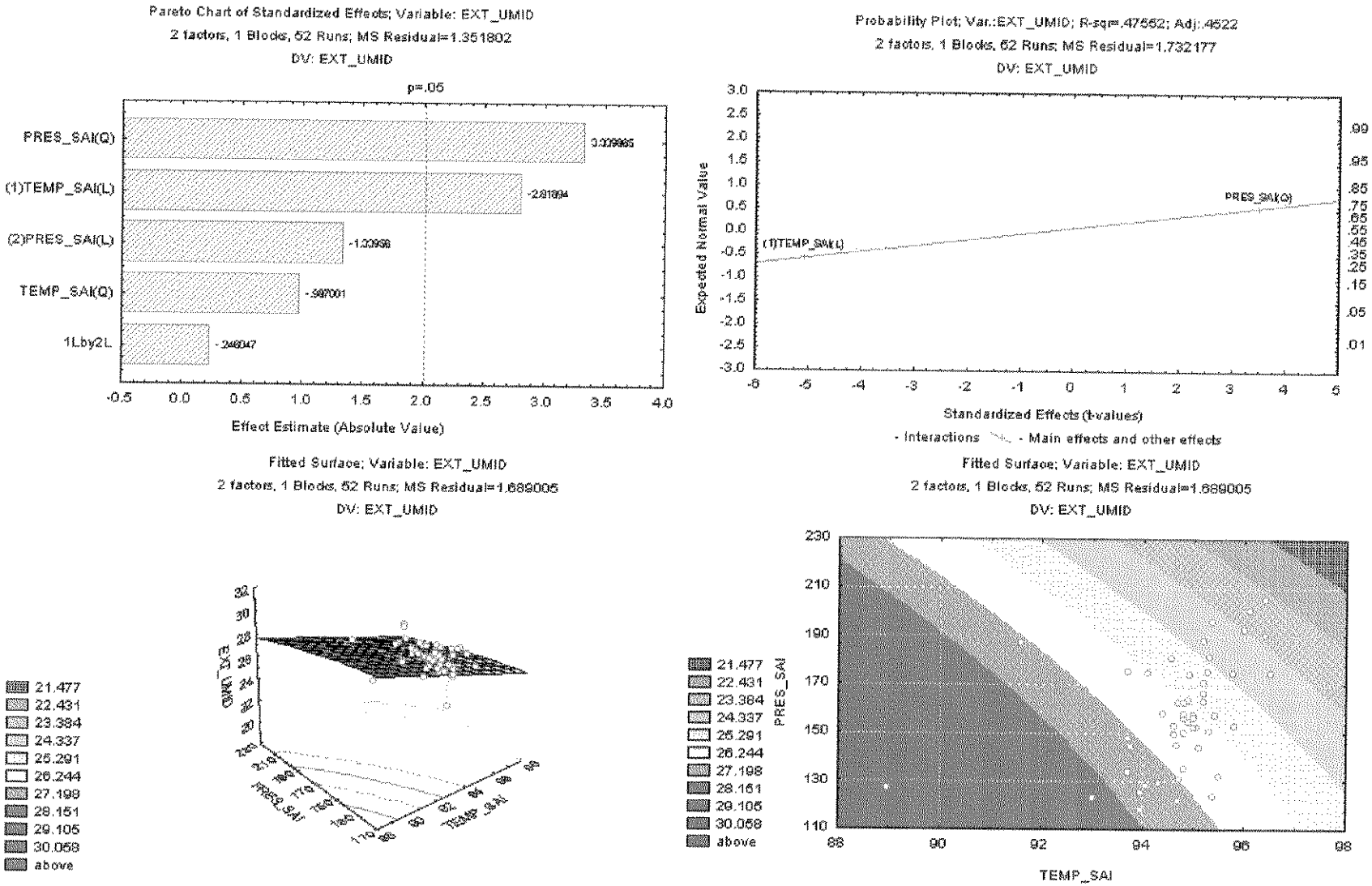


Figura 49: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido na Receita SC.

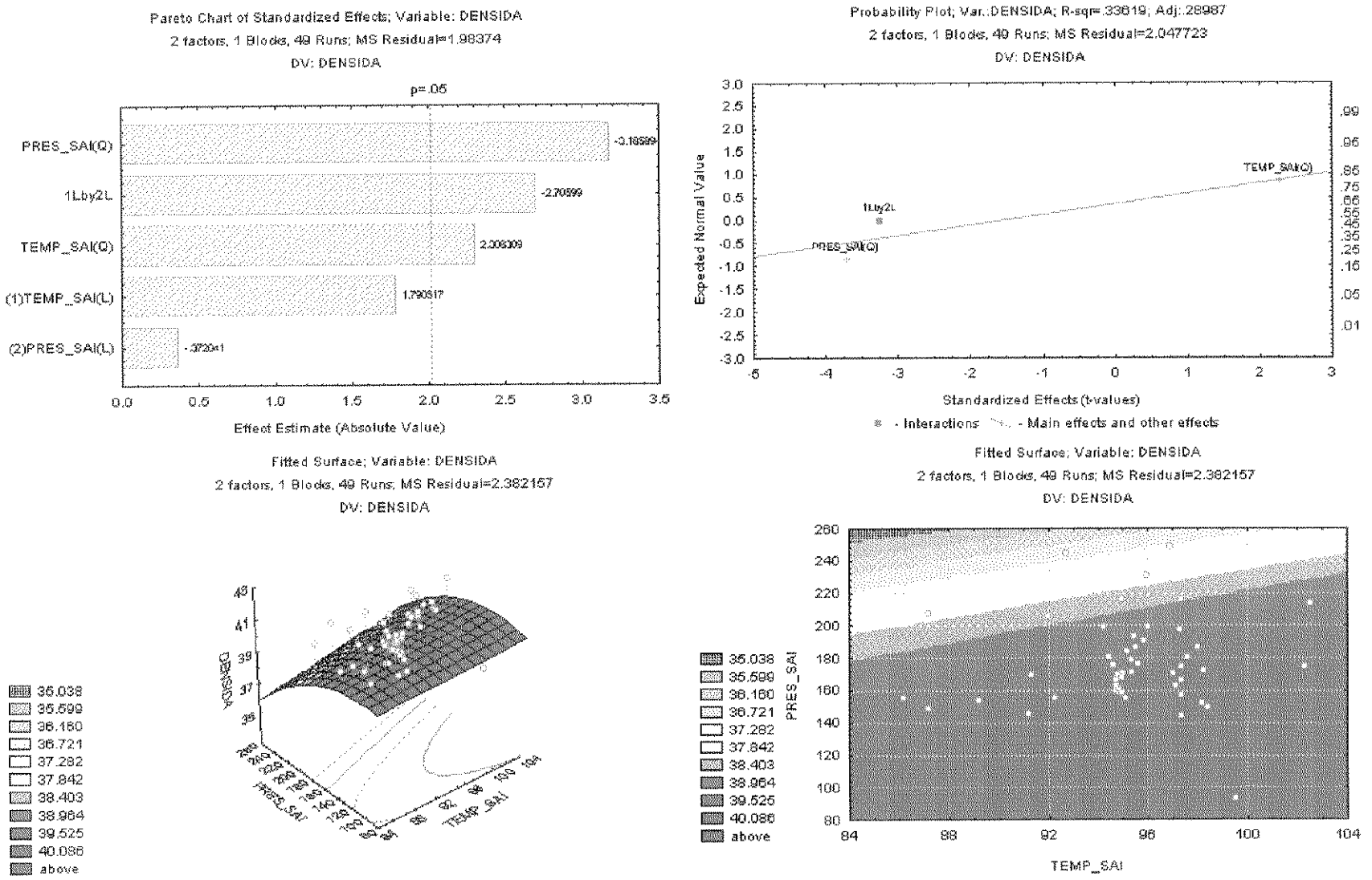


Figura 50: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão de Saída (psi) do Extrusor para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido na Receita PP.

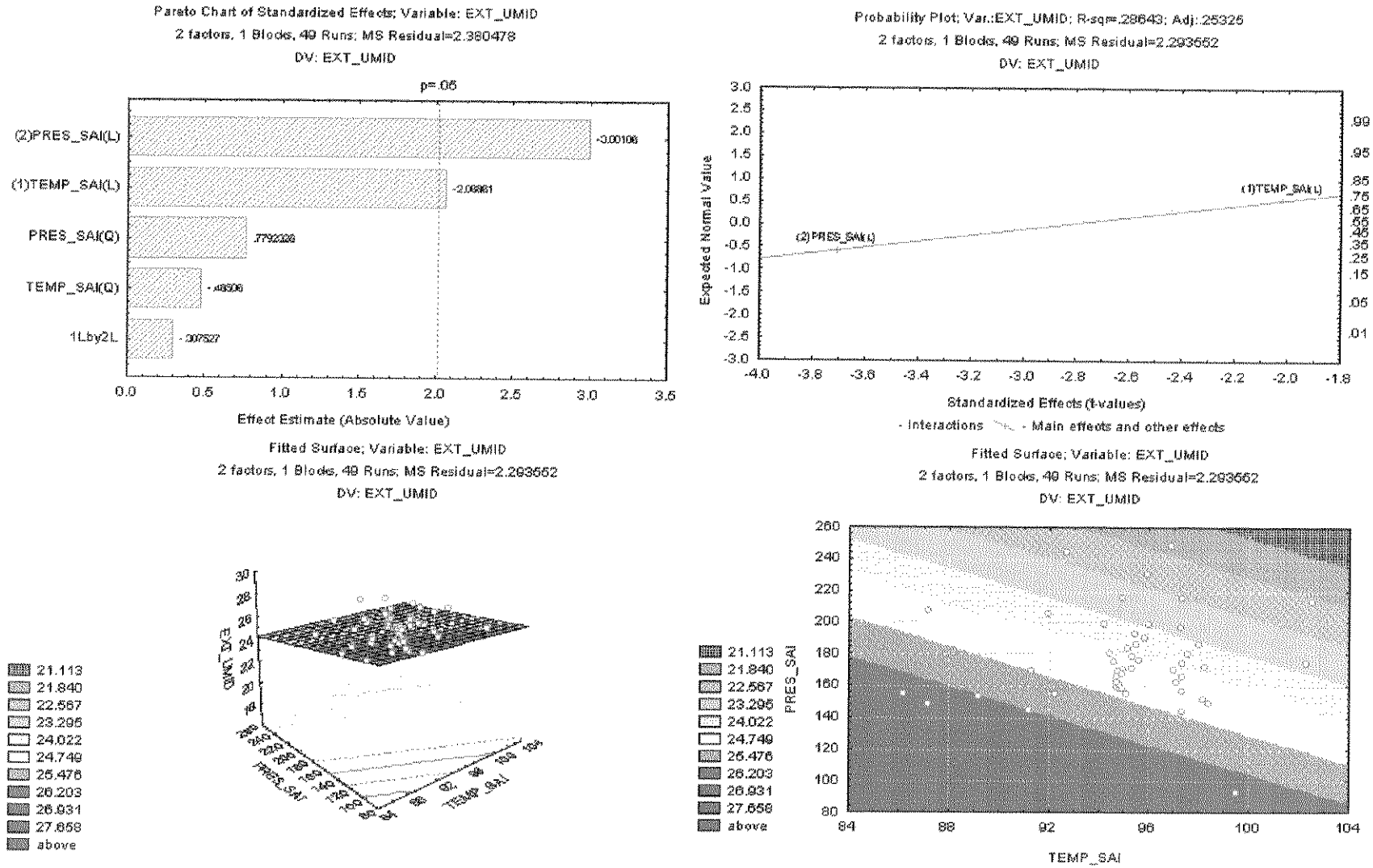


Figura 51: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido na Receita PP.

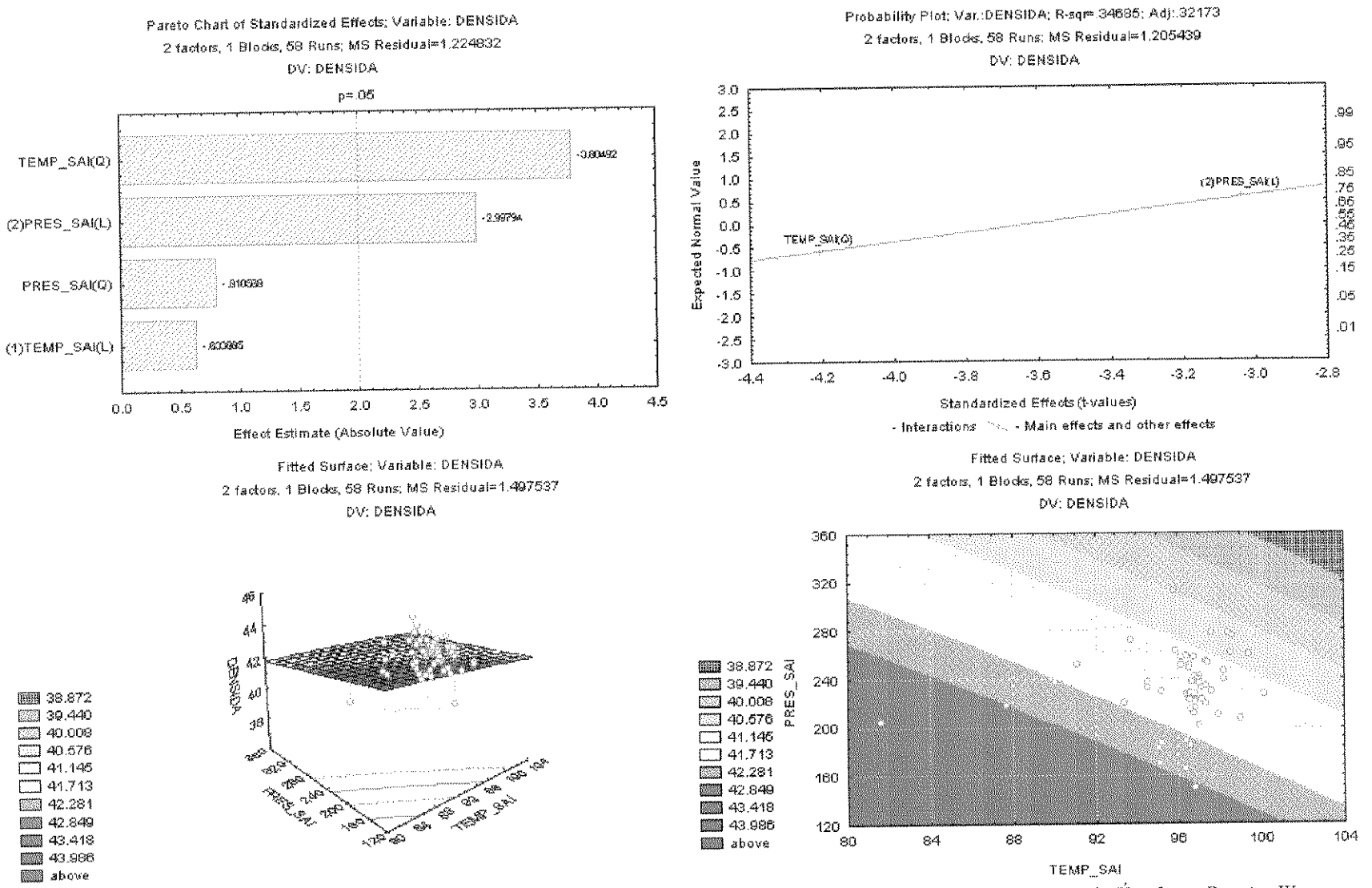


Figura 52: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido na Receita Wos.

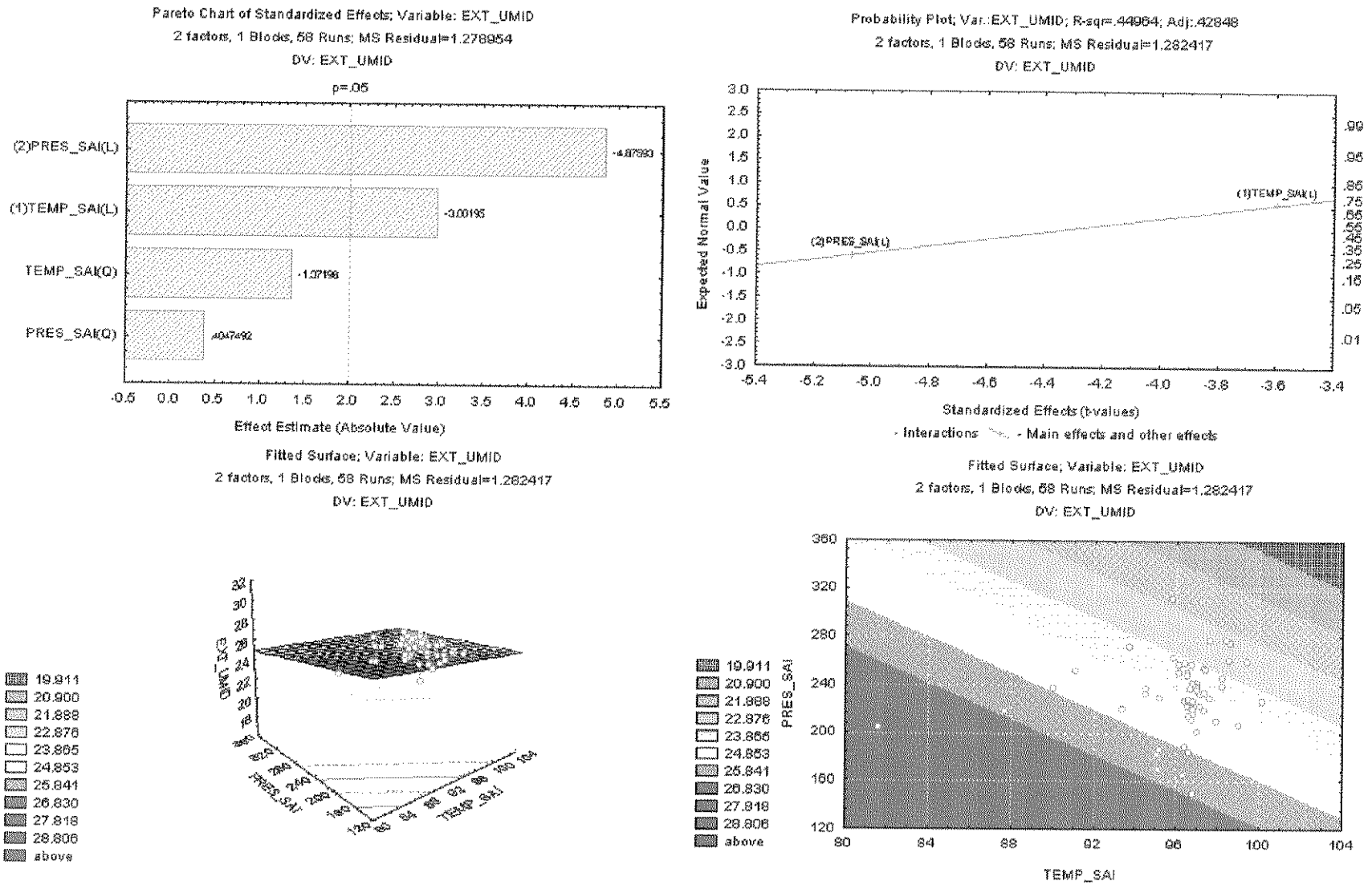


Figura 53: Relação da Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída do Extrusor para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido na Receita Wos.

Quadro 30: Análise de Variância para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido – Receita SC.

ANOVA; (DENSIDADE); R^2=0,37507					
DV: DENSIDA					
SC-Densidade	SS	df	MS	F	p
TEMP_SAI(L)	24,096	1,000	24,096	16,405	0,000
TEMP_SAI(Q)	0,000	1,000	0,000	0,000	0,994
PRES_SAI(L)	9,246	1,000	9,246	6,295	0,016
PRES_SAI(Q)	8,237	1,000	8,237	5,608	0,022
1L x 2L	2,344	1,000	2,345	1,596	0,213
Error	67,565	46,000	1,468		
Total SS	108,116	51,000			

Quadro 31: Análise de Variância para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido – Receita PP.

ANOVA; Var,:DENSIDADE; R^2=0,385;					
DV: DENSIDA					
PP - Densidade	SS	df	MS	F	p
TEMP_SAI(L)	6,360	1,000	6,360	3,206	0,080
TEMP_SAI(Q)	10,552	1,000	10,552	5,319	0,026
PRES_SAI(L)	0,275	1,000	0,275	0,138	0,712
PRES_SAI(Q)	20,135	1,000	20,135	10,150	0,003
1L by 2L	14,526	1,000	14,526	7,322	0,010
Error	85,301	43,000	1,984		
Total SS	138,815	48,000			

Quadro 32: Análise de Variância para a Densidade (kg/hL) do Produto Extrusado Úmido – Receita Wos.

ANOVA; Var.:DENSIDA; R^2=0,36047;					
DV: DENSIDA					
Wos - Densidade	SS	df	MS	F	p
TEMP_SAI(L)	0,492	1,000	0,492	0,402	0,529
TEMP_SAI(Q)	17,732	1,000	17,732	14,477	0,000
PRES_SAI(L)	11,008	1,000	11,008	8,988	0,004
PRES_SAI(Q)	0,805	1,000	0,805	0,657	0,421
Error	64,916	53,000	1,225		
Total SS	101,507	57,000			

Quadro 33: Análise de Variância para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido – Receita SC.

ANOVA; Var,:EXT_UMID; R^2=0,61575					
DV: EXT_UMID					
SC - Umidade	SS	df	MS	F	p
TEMP_SAI(L)	10,742	1,000	10,742	7,946	0,007
TEMP_SAI(Q)	1,317	1,000	1,317	0,974	0,329
PRES_SAI(L)	2,426	1,000	2,426	1,794	0,187
PRES_SAI(Q)	15,079	1,000	15,079	11,155	0,002
1L by 2L	0,082	1,000	0,082	0,061	0,807
Error	62,183	46,000	1,352		
Total SS	161,829	51,000			

Quadro 34: Análise de Variância para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido – Receita PP.

ANOVA; Var,:EXT_UMID; R^2=0,30769;					
DV: EXT_UMID					
PP - Umidade	SS	df	MS	F	p
TEMP_SAI(L)	10,186	1,000	10,186	4,279	0,045
TEMP_SAI(Q)	0,560	1,000	0,560	0,235	0,630
PRES_SAI(L)	21,439	1,000	21,439	9,006	0,004
PRES_SAI(Q)	1,445	1,000	1,445	0,607	0,440
1L by 2L	0,225	1,000	0,225	0,095	0,760
Error	102,361	43,000	2,380		
Total SS	147,854	48,000			

Quadro 35: Análise de Variância para a Umidade (%) do Produto Extrusado Úmido – Receita Wos.

ANOVA; Var,:EXT_UMID; R^2=0,47109;					
DV: EXT_UMID					
Wos - Umidade	SS	df	MS	F	p
TEMP_SAI(L)	11,526	1,000	11,526	9,012	0,004
TEMP_SAI(Q)	2,407	1,000	2,407	1,882	0,176
PRES_SAI(L)	30,407	1,000	30,407	23,775	0,000
PRES_SAI(Q)	0,210	1,000	0,210	0,164	0,687
Error	67,785	53,000	1,279		
Total SS	128,159	57,000			

X) ANEXO IV

No Anexo IV são apresentadas as influências qualitativas relacionadas as perturbações individuais e os perfis transientes para a Temperatura e Pressão de Saída.

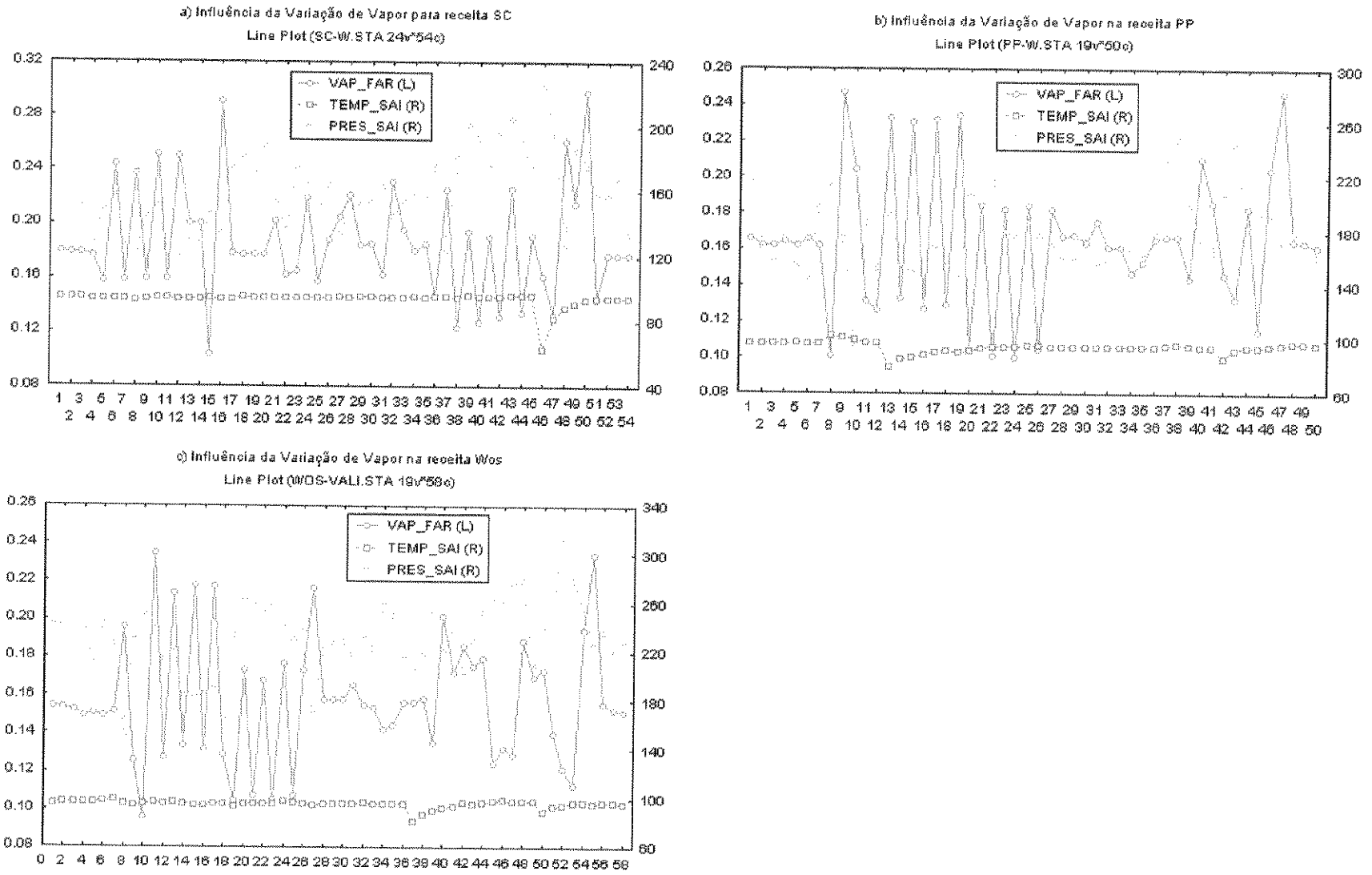


Figura 54: Influência da Vazão de Vapor para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

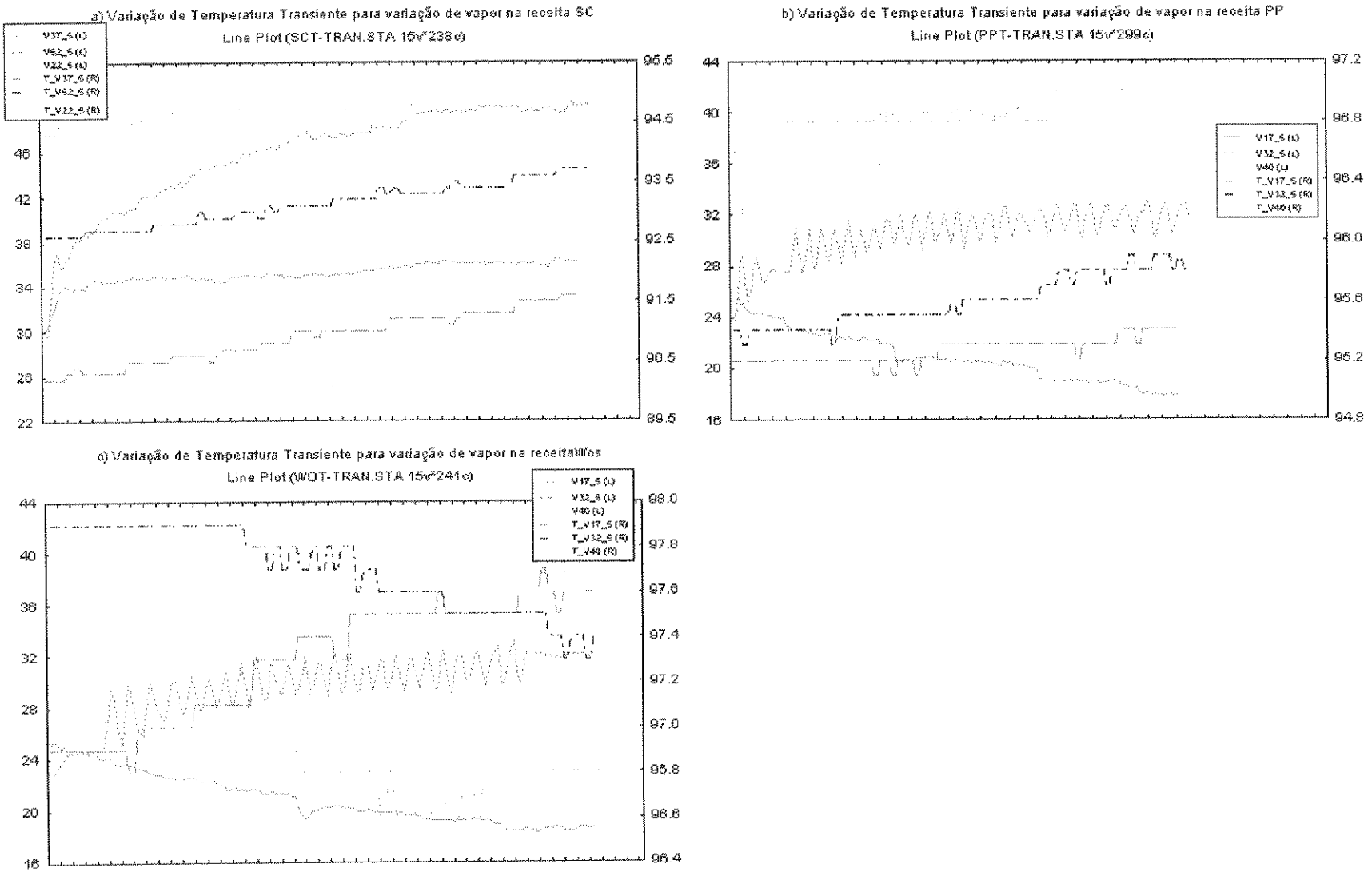


Figura 55: Variação Transiente de Temperatura (^{0}C) de Saída para a Vazão de Vapor em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

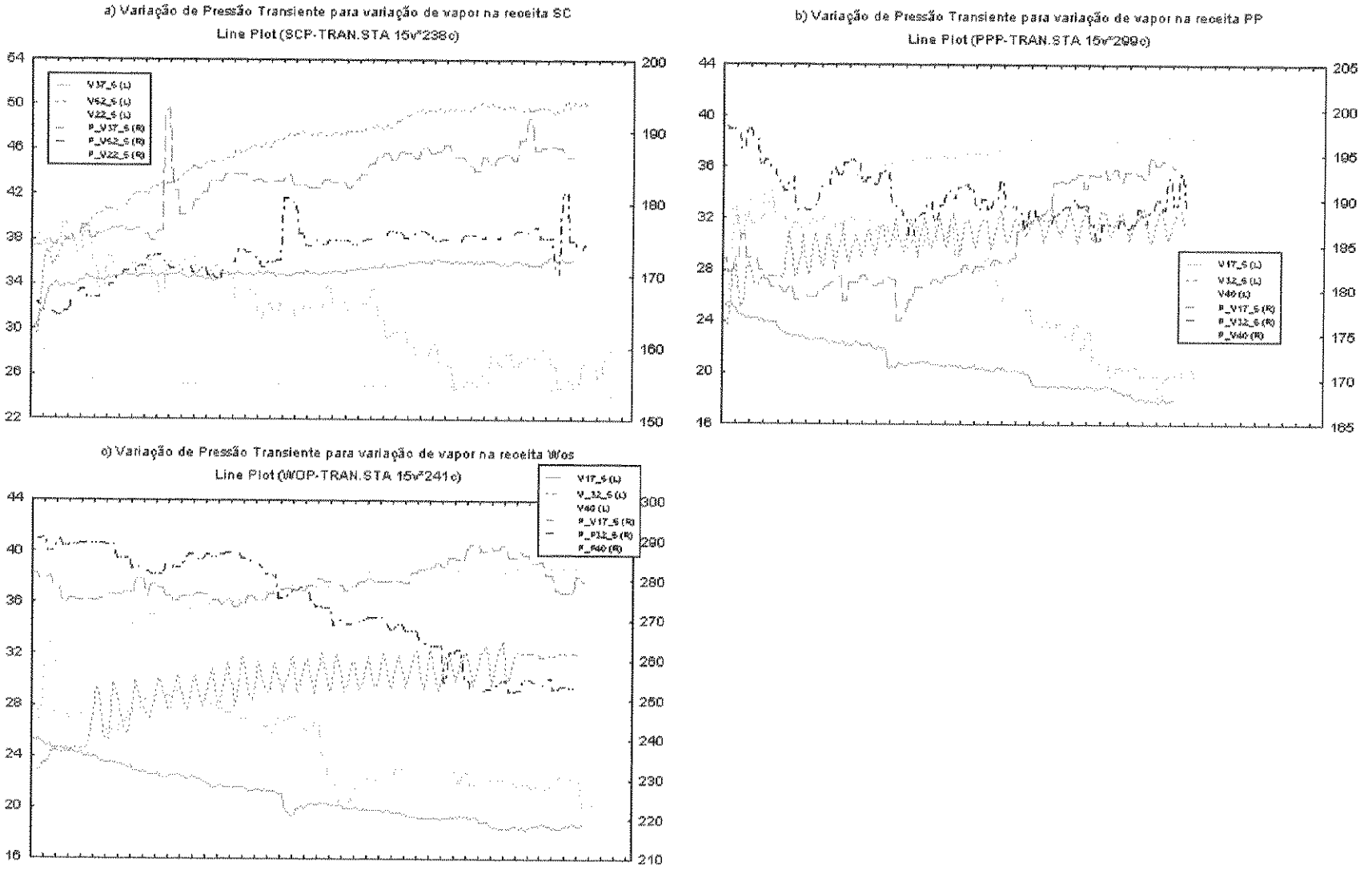


Figura 56: Variação Transiente de Pressão (psi) de Saída para a Vazão de Vapor em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

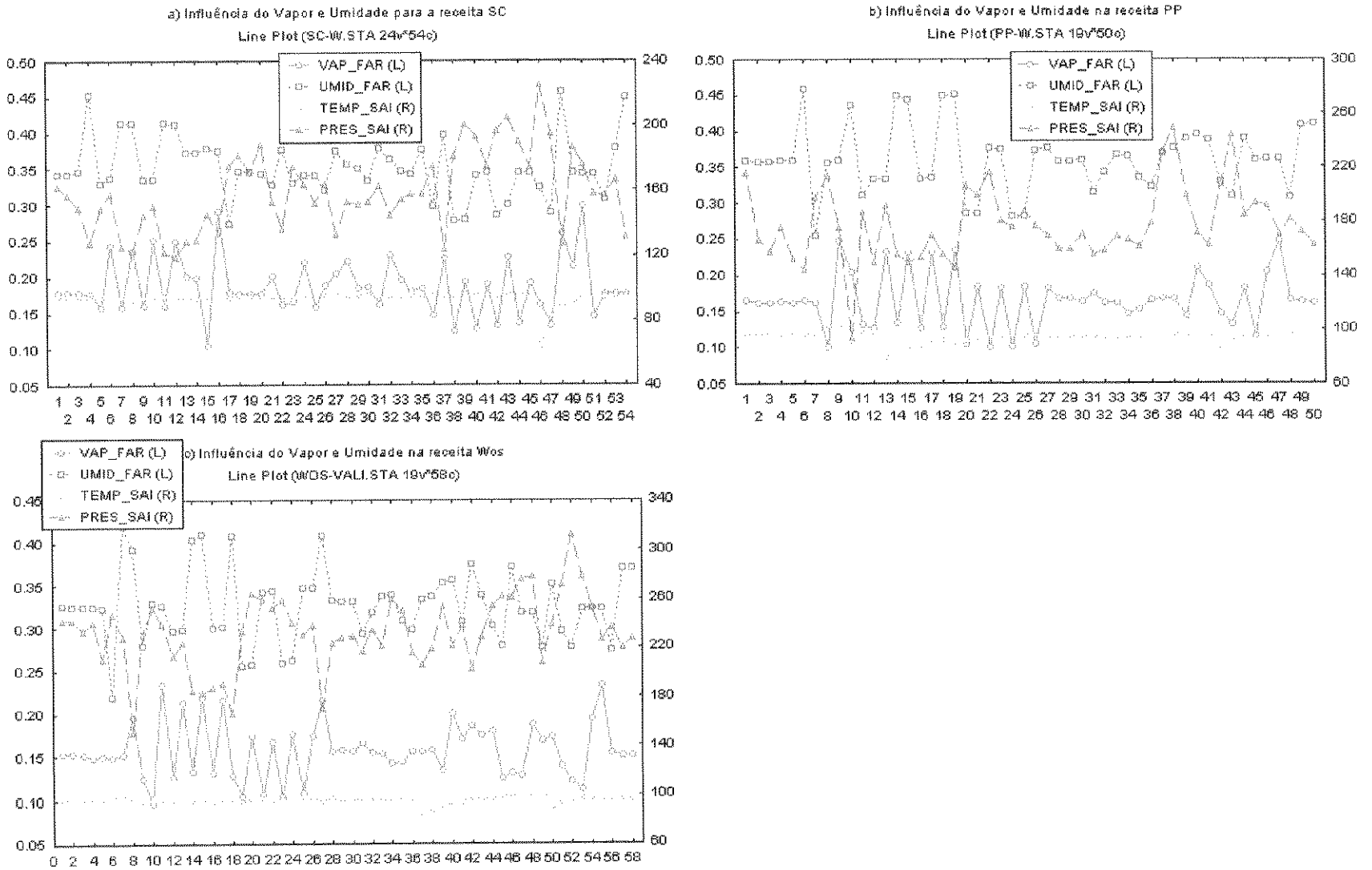


Figura 57: Influência da Vazão de Umidade para a Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos..

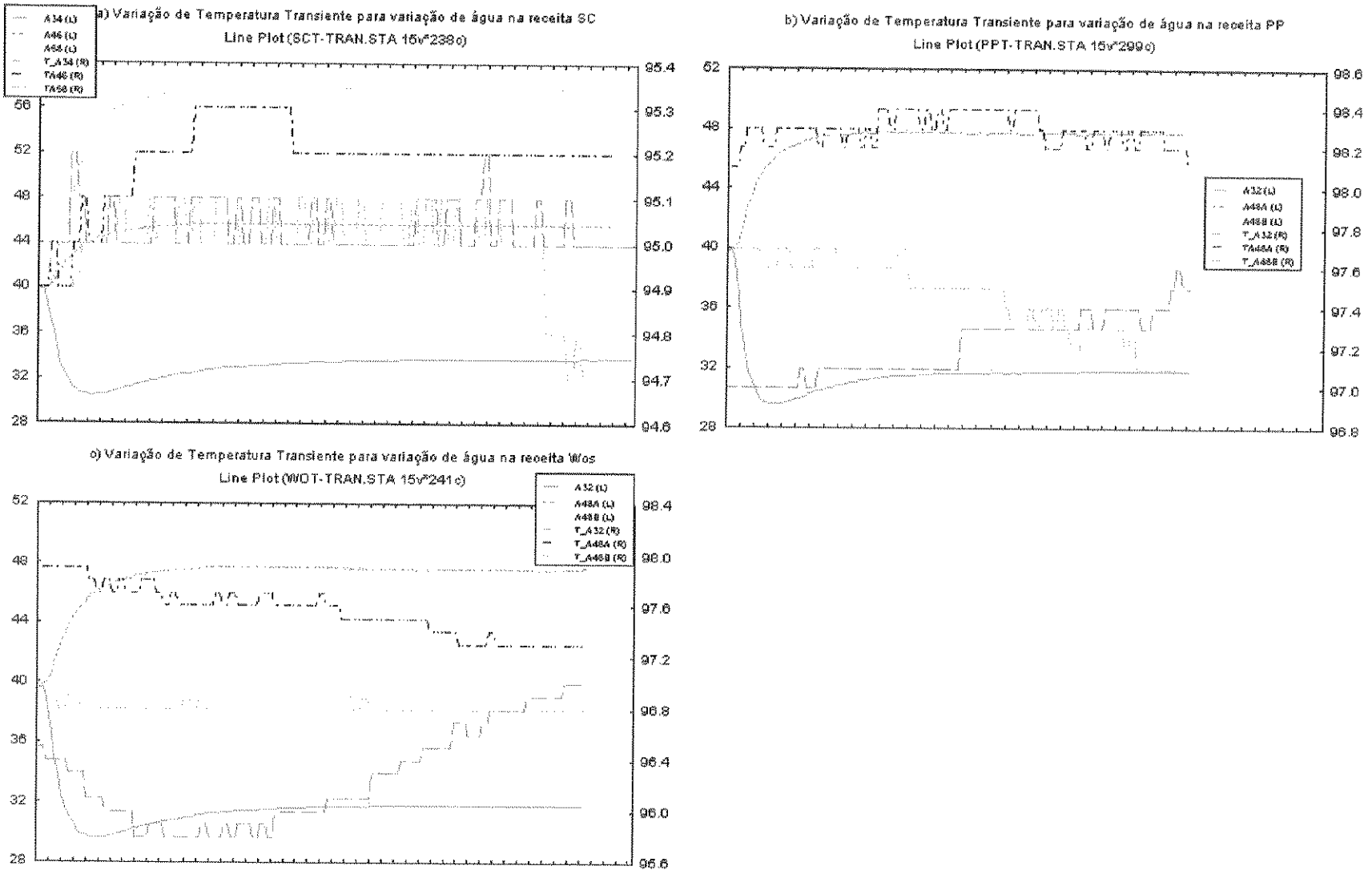


Figura 58: Variação Transiente de Temperatura (^0C) de Saída para a Vazão de Água em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

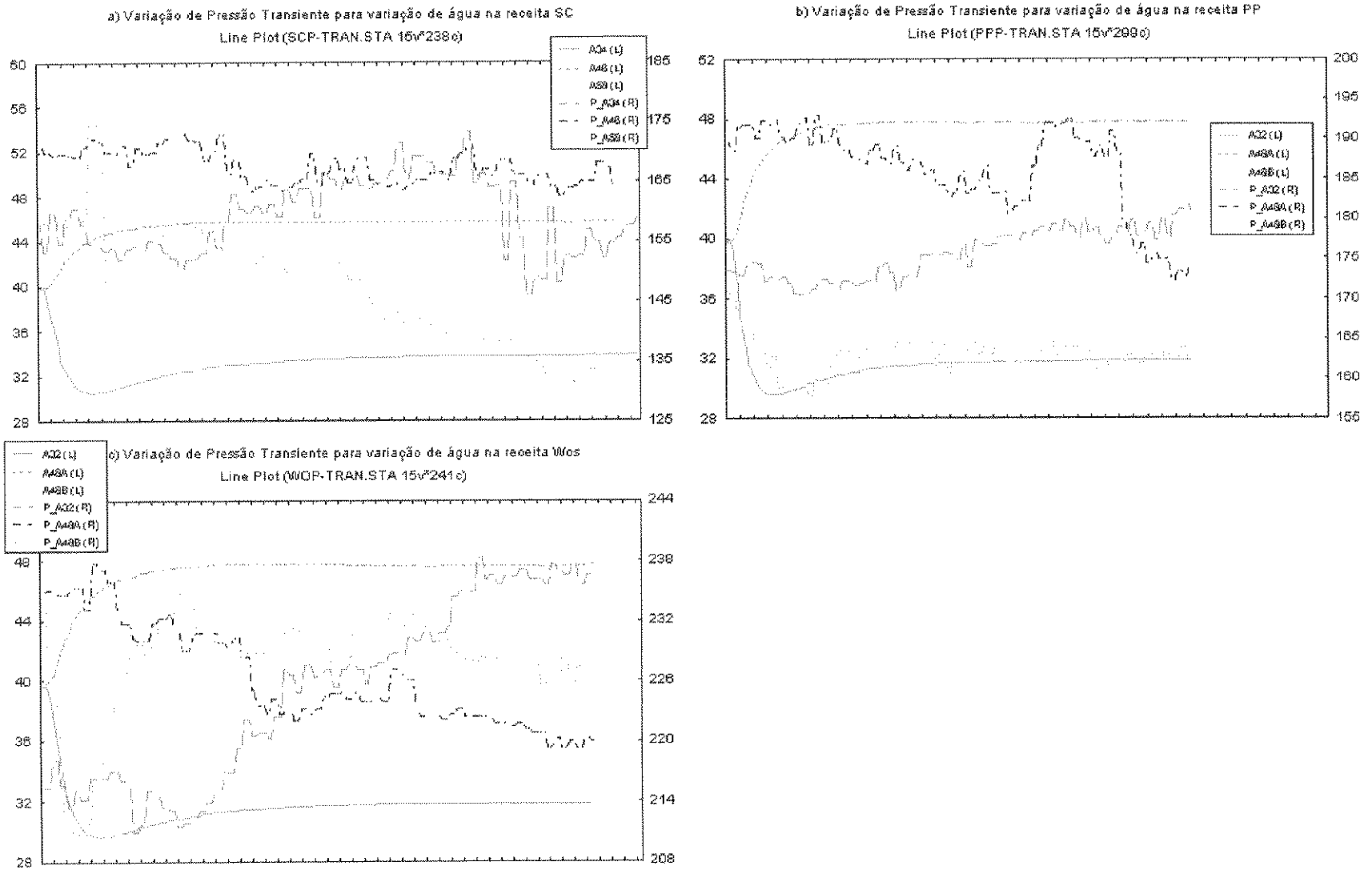


Figura 59: Variação Transiente de Pressão (psi) de Saída para a Vazão de Água em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

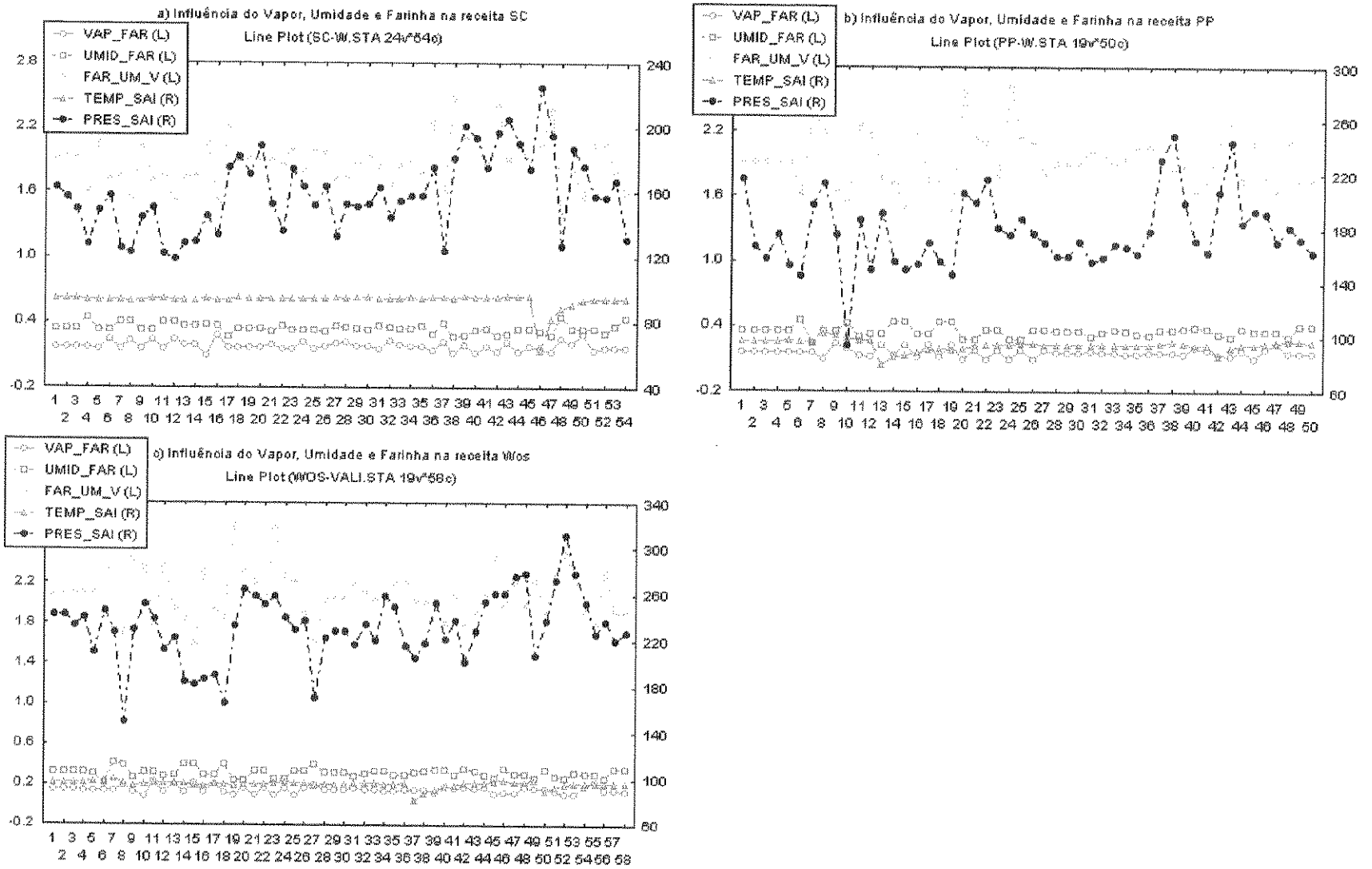


Figura 60: Influência da Vazão de Farinha para Temperatura (^0C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

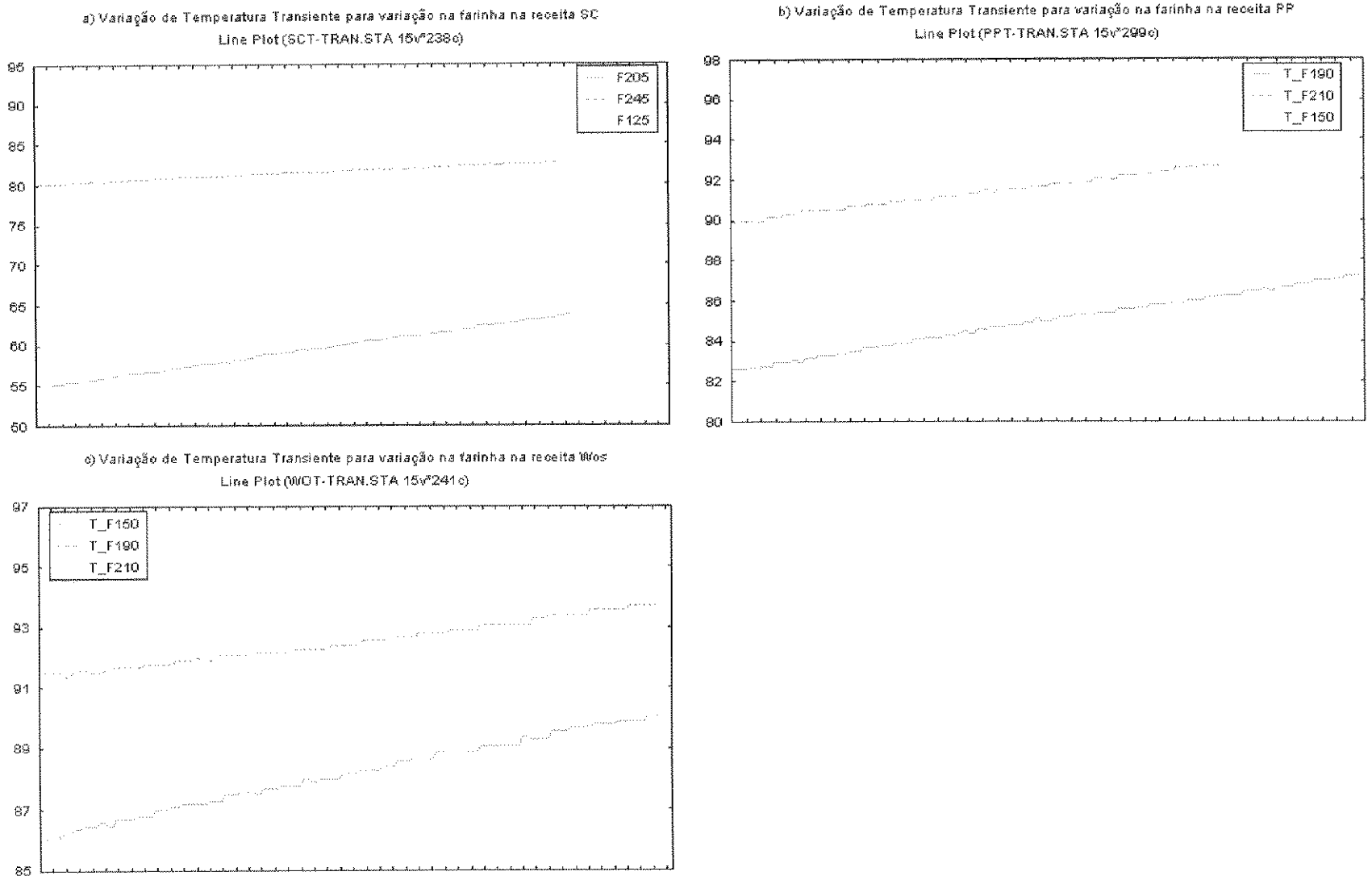


Figura 61: Variação Transiente de Temperatura (^{0}C) de Saída para a Vazão de Farinha em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

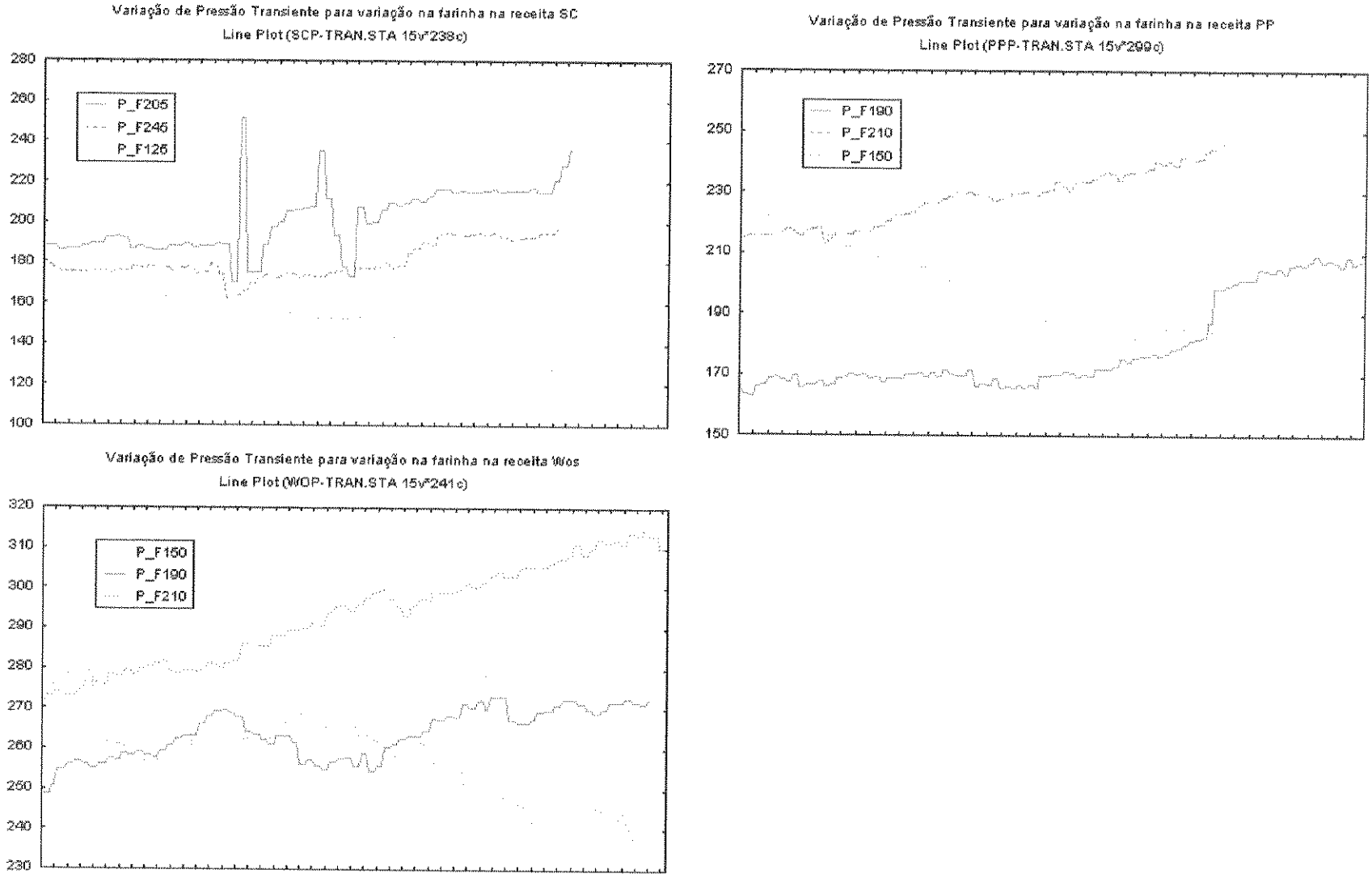


Figura 62: Variação Transiente de Pressão (psi) de Saída para a Vazão de Farinha em kg/h nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

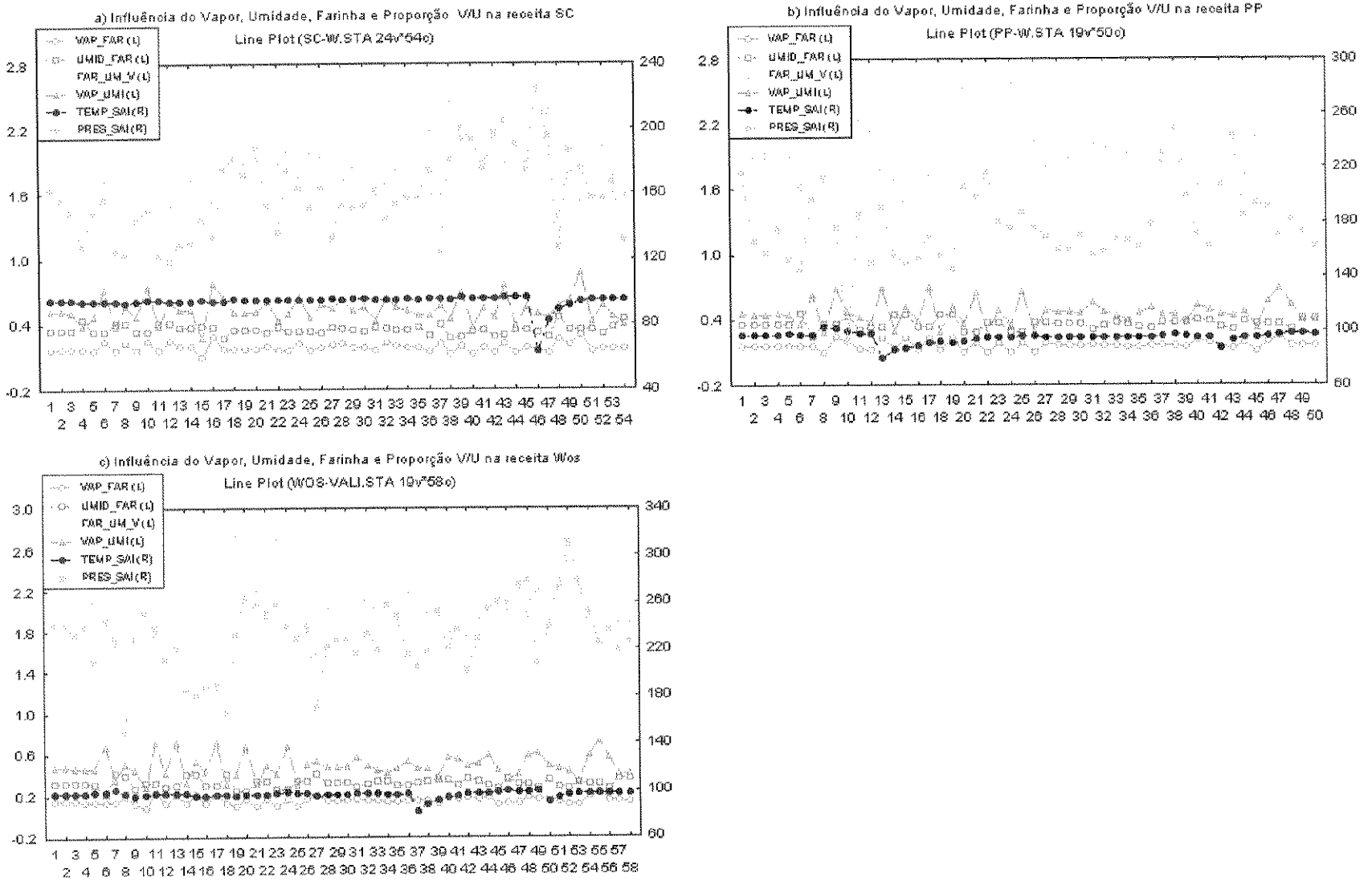


Figura 63: Influência da Proporção Vapor / Umidade para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

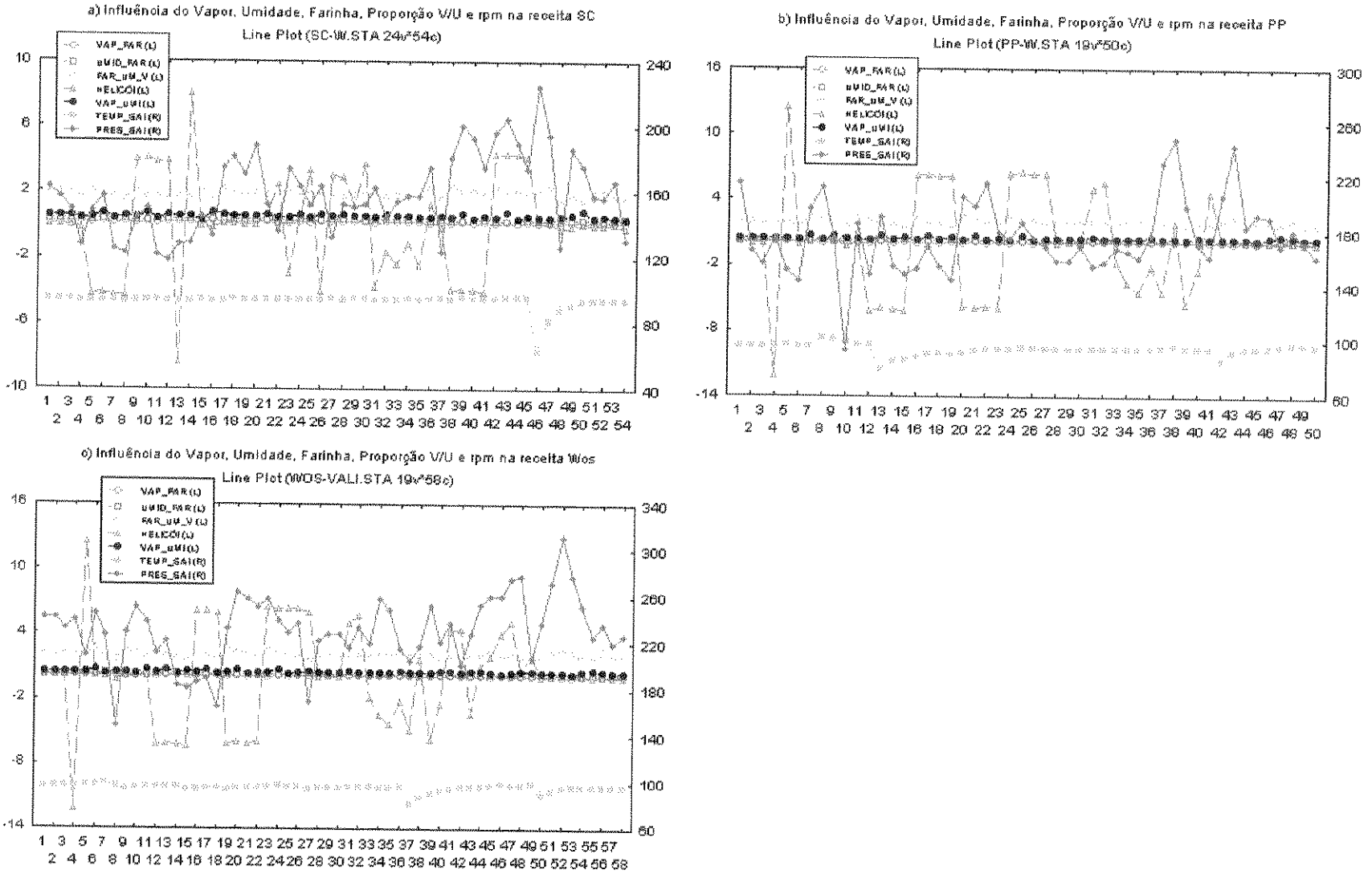


Figura 64: Influência da Rotação do Helicóide em rpm para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída nas Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

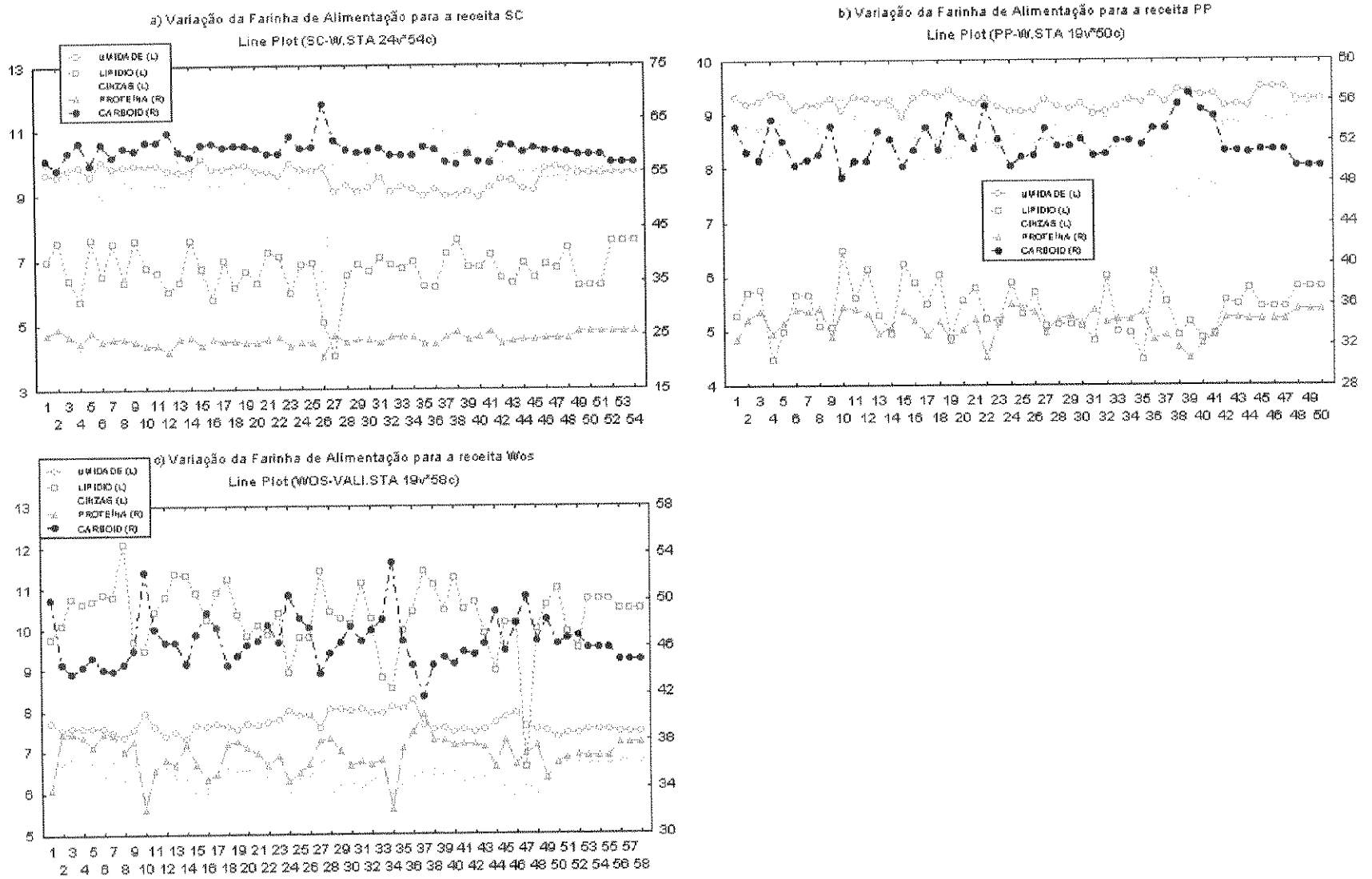


Figura 65: Variação da Matéria – Prima em (%) de Umidade, Proteína, Lipídio, Carboidratos e Cinzas para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos

XI) ANEXO V

O Anexo V mostra as diversas relações envolvendo a Energia Mecânica Específica (SME) e a Energia Térmica Específica (STE).

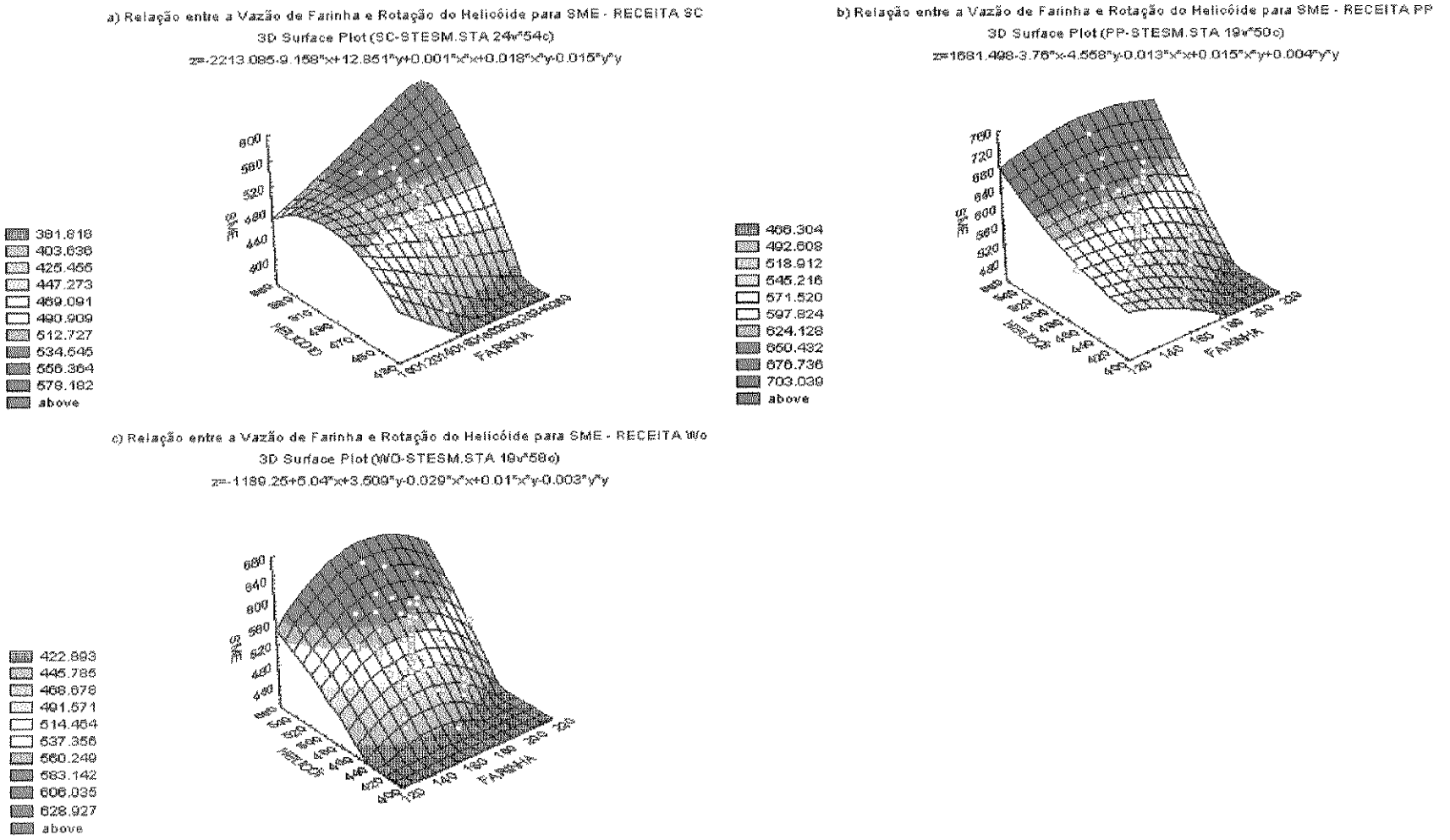


Figura 66: Relação entre a Vazão de Farinha em kg/h e Rotação do Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

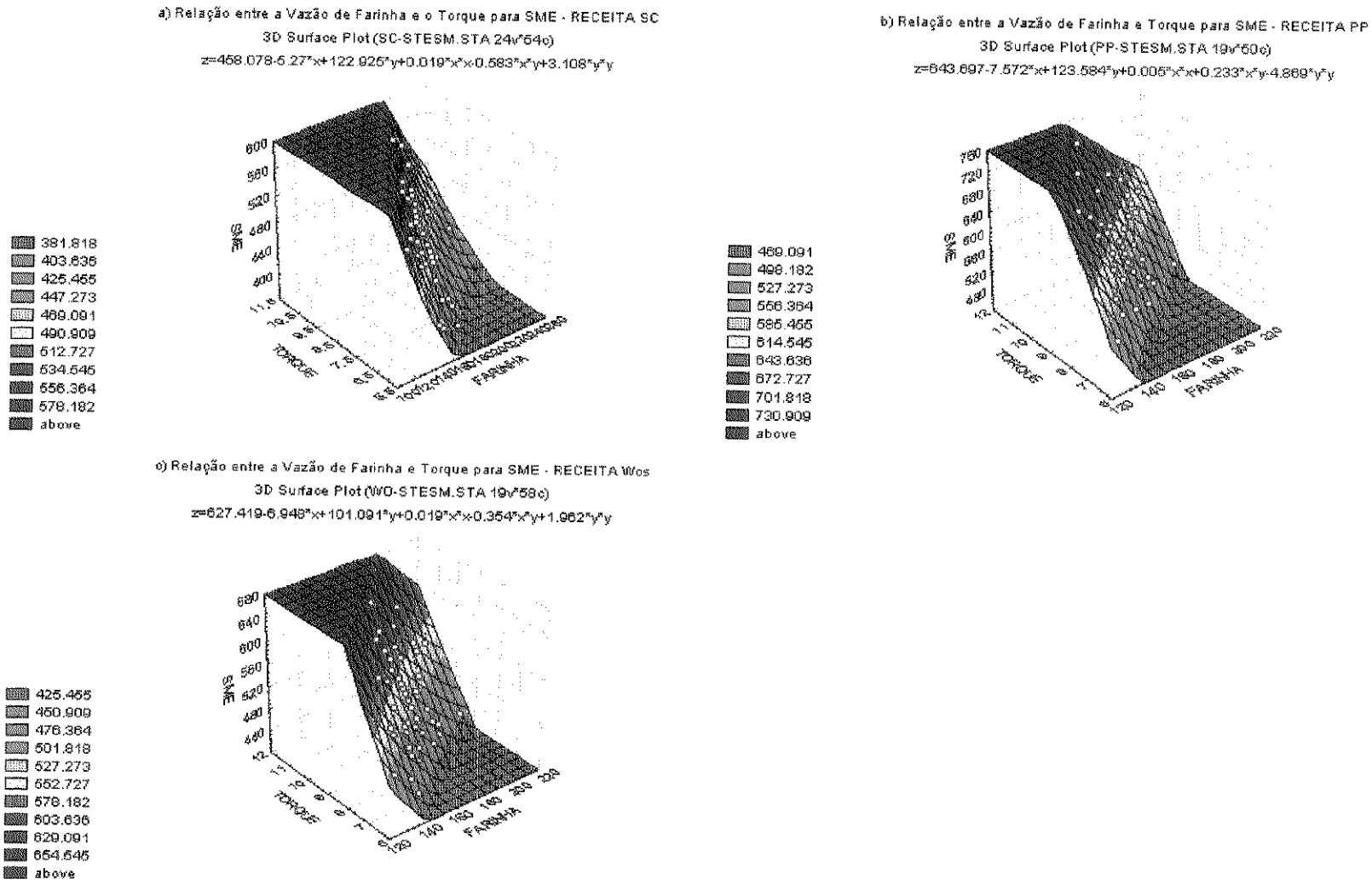


Figura 67: Relação entre a Vazão de Farinha em kg/h e Torque em kW.s para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

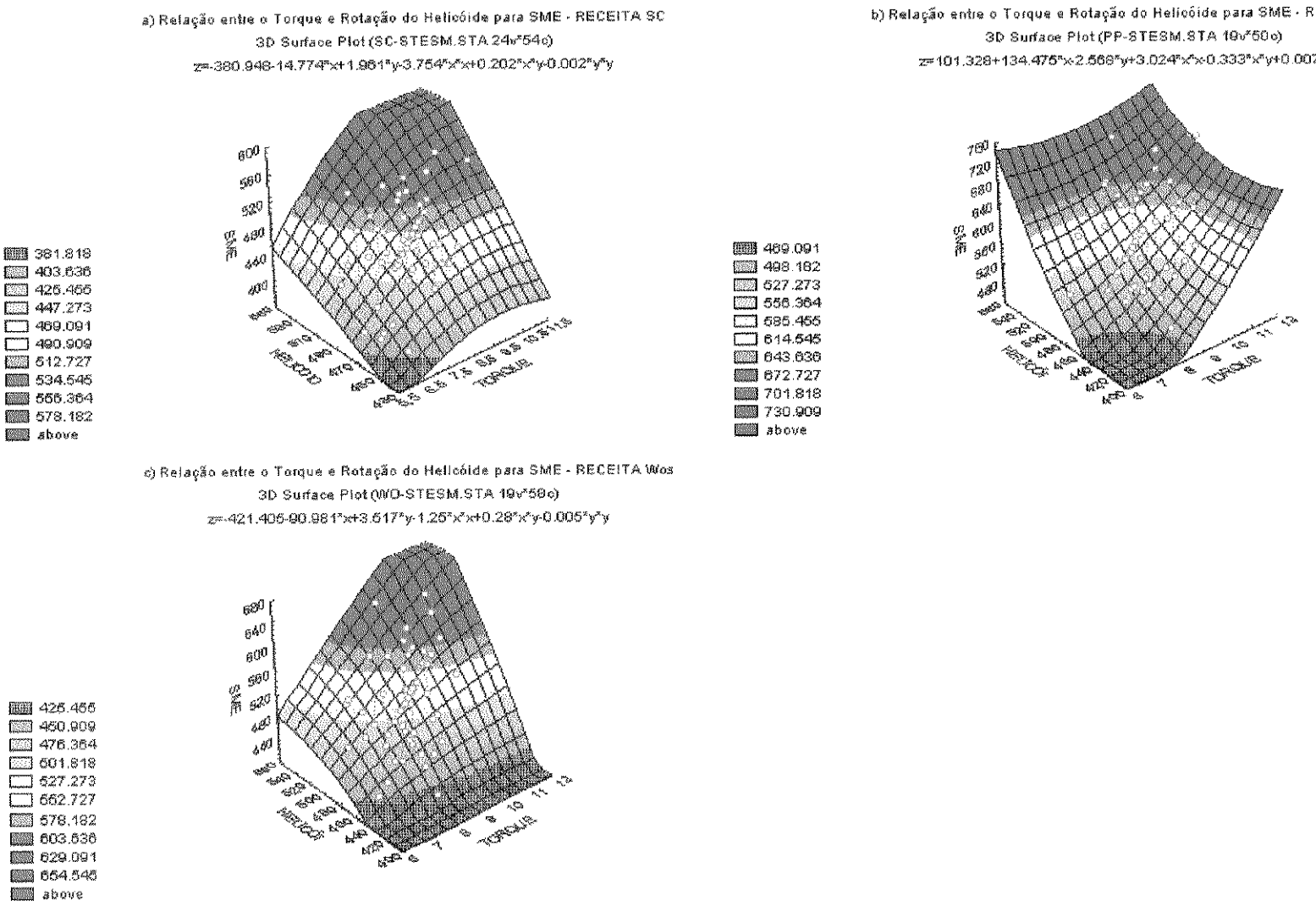


Figura 68: Relação entre o Torque em kW.s e a Rotação do Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Especifica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

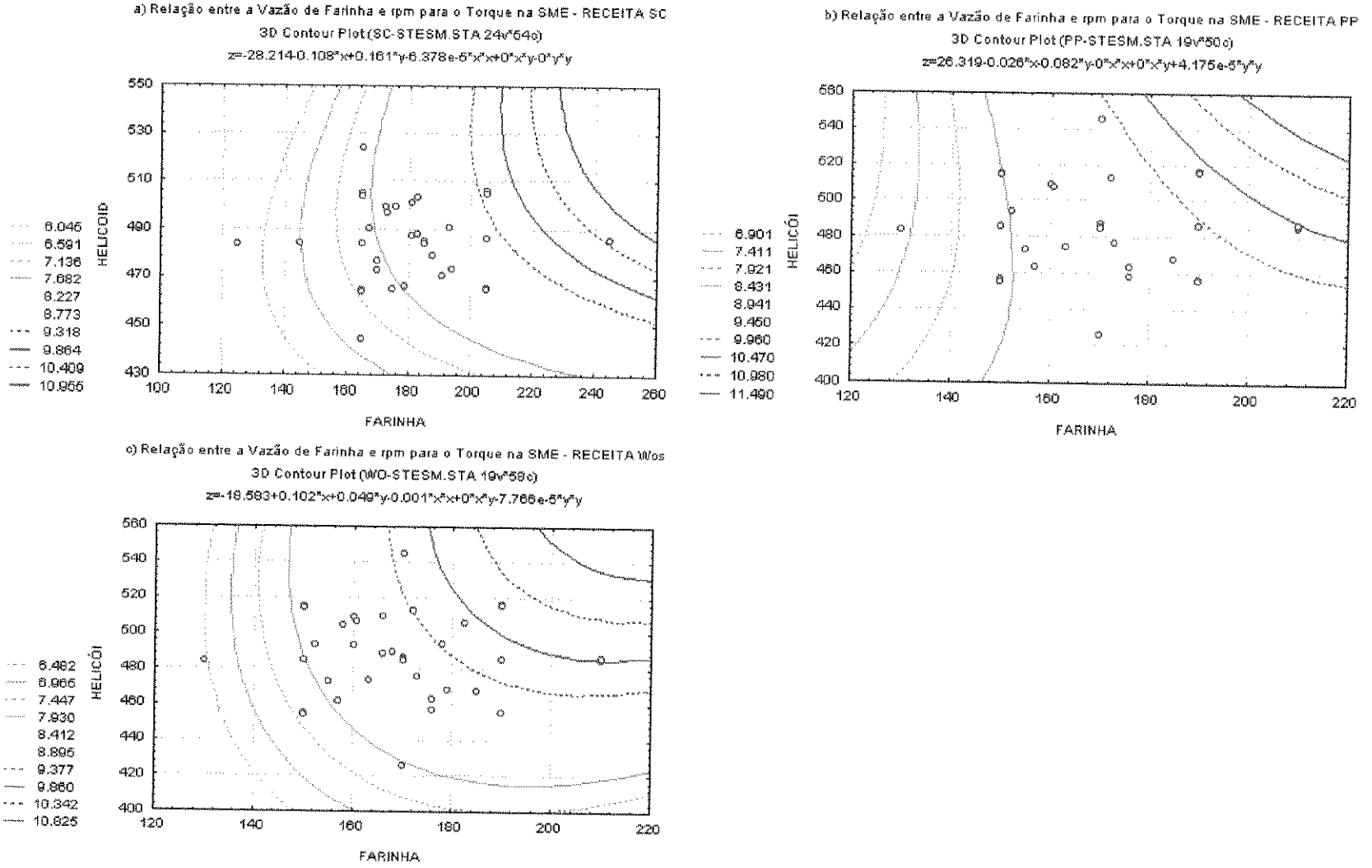


Figura 69: Relação da Vazão de Farinha em kg/h e Rotação do Helicóide em rpm e o Torque kW.s na Energia Mecânica Especifica (SME) para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

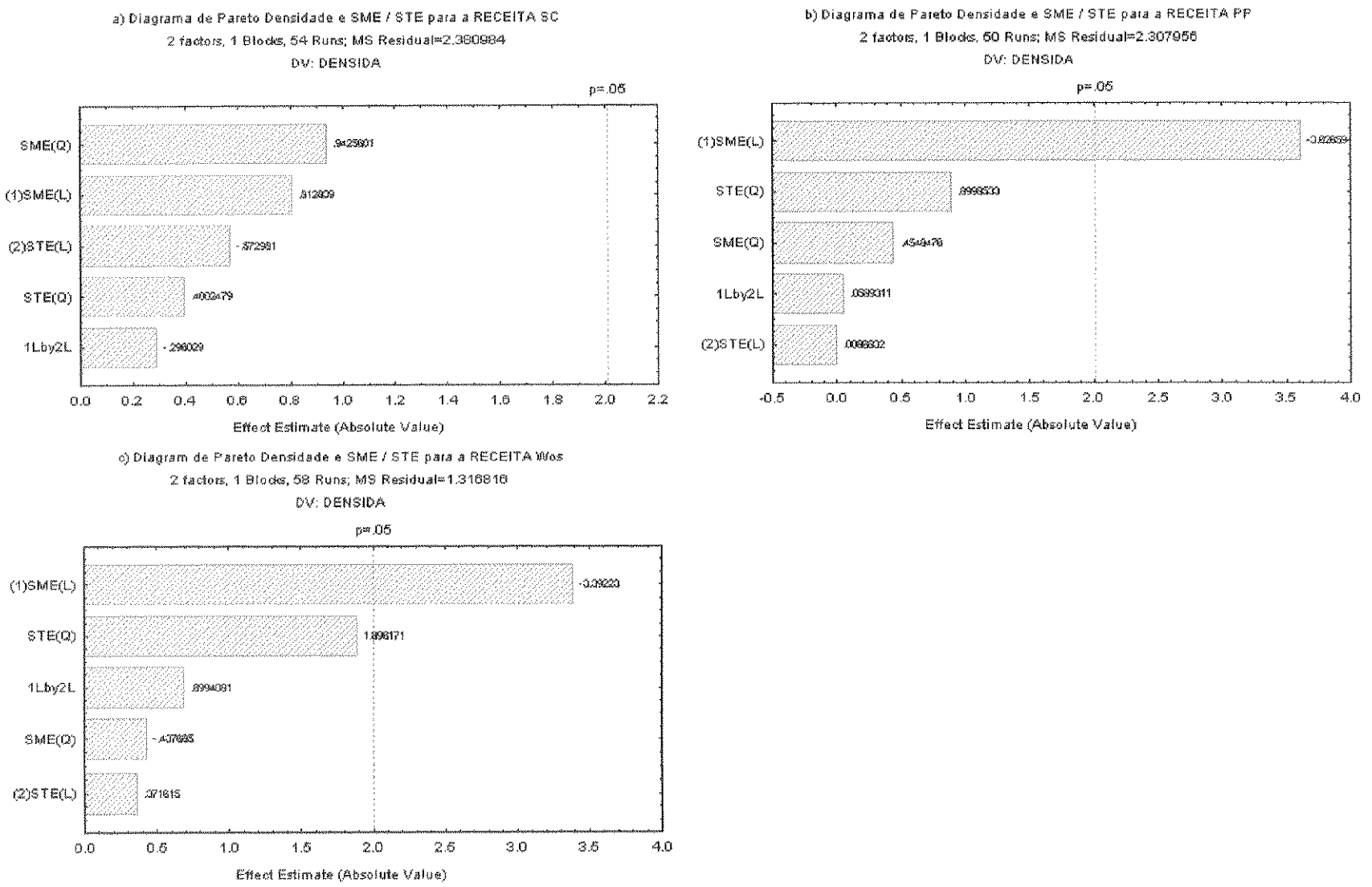


Figura 70: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Densidade em kg/hL do Produto Extrusado Úmido para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

Quadro 36: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Densidade em kg/hL do Produto Extrusado Úmido - Receita SC.

ANOVA; Var.:DENSIDA; R^2=**0,05074**; Adj:0. (sc-stesm.sta)

DV: DENSIDADE

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	1,573133	1	1'573133	0.660707	0,420323784
SME (Q)	2,115313	1	2,115313	0.88842	0,350626003
(2)STE (L)	0,781695	1	0,781695	0.328308	0,569331994
STE (Q)	0,38143	1	0,38143	0.160198	0,690749762
1L by 2L	0,208654	1	0,208654	0.087633	0,768484553
Error	114,2872	48	2,380984		
Total SS	120,3967	53			

Quadro 37: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Densidade kg/hL do Produto Extrusado Úmido - Receita PP.

ANOVA; Var.:DENSIDA; R^2=**0,2686**; Adj:0,18549 (pp-stesm.sta)

DV: DENSIDADE

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	30,35457	1	30,35457	13,15215	0,000742377
SME (Q)	0,477484	1	0,477484	0,206886	0,651455234
(2)STE (L)	0,000174	1	0,000174	7,54E-05	0,993111167
STE (Q)	1,868835	1	1,868835	0,809736	0,373096992
1L by 2L	0,008015	1	0,008015	0,003473	0,95327383
Error	101,5501	44	2,307956		
Total SS	138,8441	49			

Quadro 38: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Densidade kg/hL do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos.

ANOVA; Var.:DENSIDA; R^2=**0,32542**; Adj:0,26055 (wo-stesm.sta)

DV: DENSIDADE

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	15,15287	1	15,15287	11,5072	0,00133211
SME (Q)	0,25226	1	0,25226	0,191568	0,663427142
(2)STE (L)	0,181849	1	0,181849	0,138098	0,71168952
STE (Q)	4,734568	1	4,734568	3,595466	0,063499801
1L by 2L	0,644149	1	0,644149	0,489172	0,487413943
Error	68,47444	52	1,316816		
Total SS	101,5066	57			

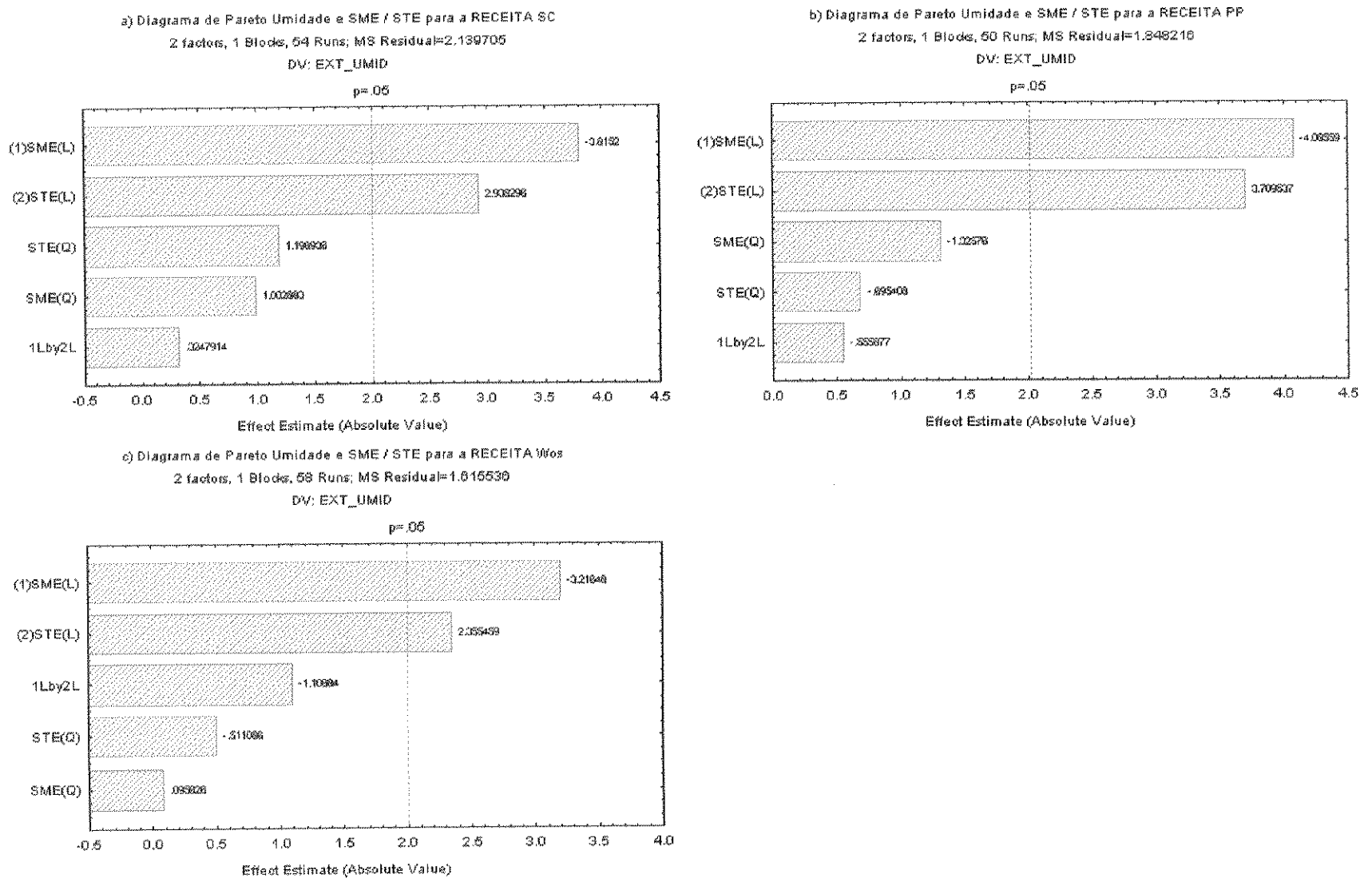


Figura 71: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

Quadro 39: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido - Receita SC.

ANOVA; Var.:EXT_UMID; R^2=**0,36576**; Adj:0,29969 (sc-stesm.sta)
DV: UMIDADE

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	31,14496	1	31,14496	14.55572	0,000388998
SME (Q)	2,152061	1	2,152061	1.005775	0,320946352
(2)STE (L)	18,47333	1	18,47333	8.633585	0,005059268
STE (Q)	3,065462	1	3,065462	1.432657	0,237209588
1L by 2L	0,225716	1	0,225716	0.105489	0,746750309
Error	102,7058	48	2,139705		
Total SS	161,9347	53			

Quadro 40: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido - Receita PP.

ANOVA; Var.:EXT_UMID; R^2=**0,45659**; Adj:0,39484 (pp-stesm.sta)
DV: UMIDADE

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	30,85049	1	30,85049	16,69203	0,000183218
SME (Q)	3,248502	1	3,248502	1,757641	0,191761066
(2)STE (L)	25,43268	1	25,43268	13,76066	0,000579404
STE (Q)	0,893783	1	0,893783	0,483592	0,490456331
1L by 2L	0,571097	1	0,571097	0,308999	0,581110932
Error	81,32152	44	1,848216		
Total SS	149,6507	49			

Quadro 41: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Umidade em % do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos.

ANOVA; Var.:EXT_UMID; R^2=**0,3445**; Adj:0,28147 (wo-stesm.sta)
DV: UMIDADE

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	16,71391	1	16,71391	10.34574	0,00223403
SME (Q)	0,014773	1	0,014773	0.009144	0,924185159
(2)STE (L)	8,96329	1	8,96329	5.548185	0,022306909
STE (Q)	0,421993	1	0,421993	0.261209	0,611453876
1L by 2L	1,97917	1	1,97917	1.225086	0,273458938
Error	84,00785	52	1,615536		
Total SS	128,1588	57			

Quadro 42: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura em ^0C do Produto Extrusado Úmido - Receita SC.

ANOVA; Var.:TEMP_SAI; R^2=0,1264; Adj:0,0354 (sc-stesm.sta)					
DV: Temperatura de saída					
	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	3,218309	1	3,218309	0,153534	0,696915
SME (Q)	110,6535	1	110,6535	5,278885	0,025988
(2)STE (L)	3,914682	1	3,914682	0,186756	0,667566
STE (Q)	23,81913	1	23,81913	1,136327	0,291763
1L by 2L	4,257091	1	4,257091	0,203091	0,654267
Error	1006,153	48	20,96152		
Total SS	1151,726	53			

Quadro 43: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura em ^0C do Produto Extrusado Úmido - Receita PP.

ANOVA; Var.:TEMP_SAI; R^2=0,16207; Adj:0,06685 (pp-stesm.sta)					
DV: Temperatura de saída					
	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	8,532103	1	8,532103	0.602793	0,441668
SME (Q)	12,84532	1	12,84532	0.907522	0,345977
(2)STE (L)	21,92456	1	21,92456	1.548971	0,219876
STE (Q)	22,73634	1	22,73634	1.606324	0,211676
1L by 2L	63,12654	1	63,12654	4.459893	0,040413
Error	622,788	44	14,15427		
Total SS	743,2481	49			

Quadro 44: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura em ^0C do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos.

ANOVA; Var.:TEMP_SAI; R^2=0,08441; Adj:0. (wo-stesm.sta)					
DV: Temperatura de saída					
	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	16,92372	1	16,92372	2,128269	0,150618
SME (Q)	0,007652	1	0,007652	0,000962	0,975371
(2)STE (L)	0,028341	1	0,028341	0,003564	0,952624
STE (Q)	1,090876	1	1,090876	0,137185	0,7126
1L by 2L	1,283005	1	1,283005	0,161346	0,689566
Error	413,4972	52	7,95187		
Total SS	451,6172	57			

Quadro 45: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Pressão em psi do Produto Extrusado Úmido - Receita SC.

ANOVA; Var.:PRES_SAI; R^2=**0,26788**; Adj:0,19162 (sc-stesm.sta)
DV: Pressão de saída

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	4160,465	1	4160,465	8,60513	0,005127
SME (Q)	0,023363	1	0,023363	4,83E-05	0,994482
(2)STE (L)	2903,403	1	2903,403	6,005136	0,017959
STE (Q)	137,6081	1	137,6081	0,284616	0,596153
1L by 2L	42,76908	1	42,76908	0,08846	0,767428
Error	23207,36	48	483,4866		
Total SS	31698,88	53			

Quadro 46: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Pressão em psi do Produto Extrusado Úmido - Receita PP.

ANOVA; Var.:PRES_SAI; R^2=**0,19993**; Adj:0,10902 (pp-stesm.sta)
DV: Pressão de saída

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	4171,404	1	4171,404	6,219041	0,01647
SME (Q)	401,1254	1	401,1254	0,598028	0,443466
(2)STE (L)	1630,631	1	1630,631	2,431066	0,126116
STE (Q)	177,1807	1	177,1807	0,264154	0,609852
1L by 2L	1084,209	1	1084,209	1,61642	0,210272
Error	29512,87	44	670,7471		
Total SS	36888,08	49			

Quadro 47: Análise de Variância da SME e STE em kJ/kg para a Pressão em psi do Produto Extrusado Úmido - Receita Wos.

ANOVA; Var.:PRES_SAI; R^2=**0,17159**; Adj:0,09193 (wo-stesm.sta)
DV: Pressão de saída

	SS	df	MS	F	p
(1)SME (L)	1541,674	1	1541,674	1,931454	0,170521
SME (Q)	15,80003	1	15,80003	0,019795	0,888655
(2)STE (L)	3810,239	1	3810,239	4,77358	0,03343
STE (Q)	14,44662	1	14,44662	0,018099	0,8935
1L by 2L	8,208995	1	8,208995	0,010284	0,919613
Error	41506,05	52	798,1933		
Total SS	50103,09	57			

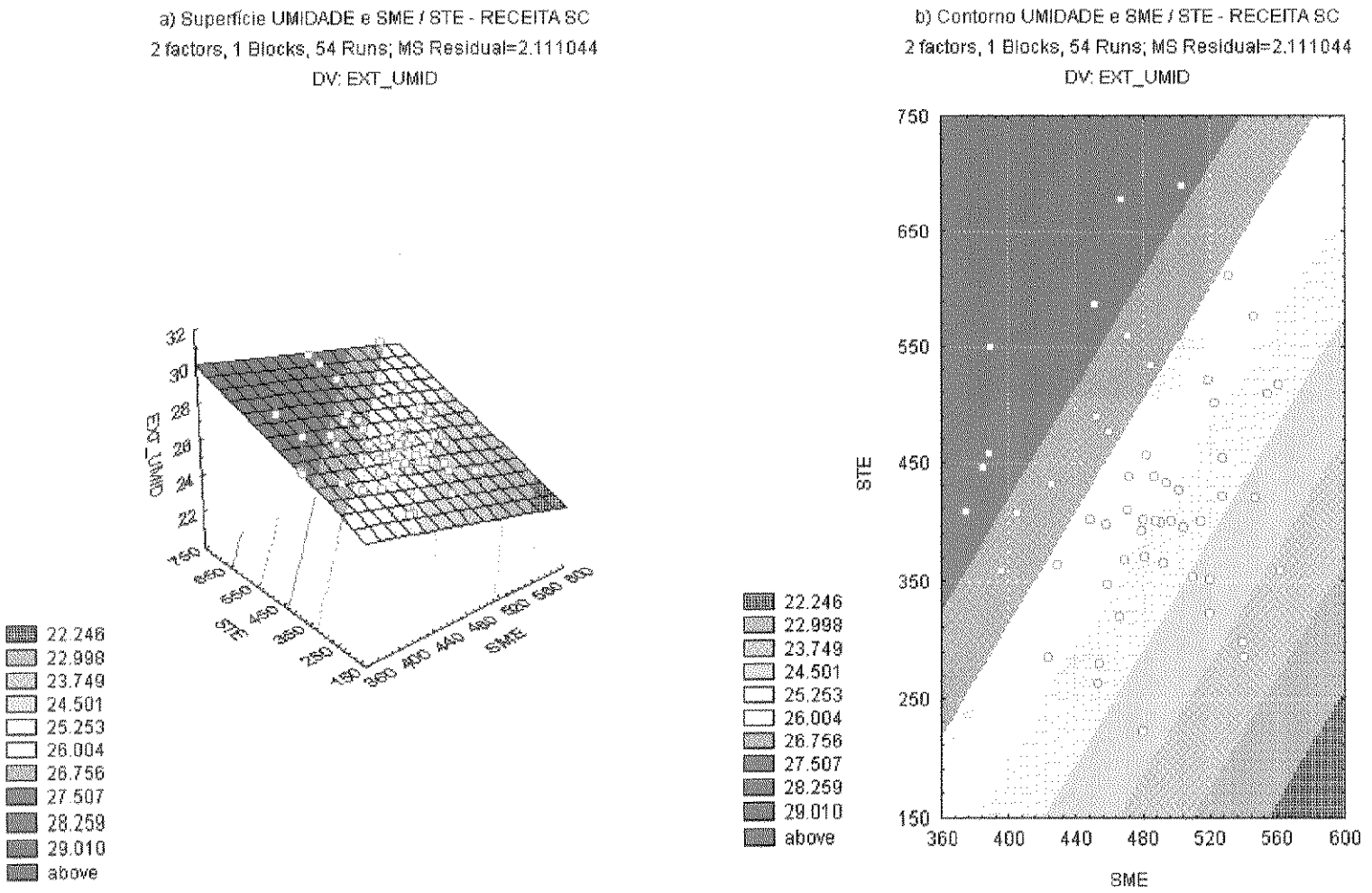


Figura 72: Relação entre SME e STE em kJ/kg para a (a,b) Densidade em kg/hL do Produto Extrusado Úmido – Receita SC.

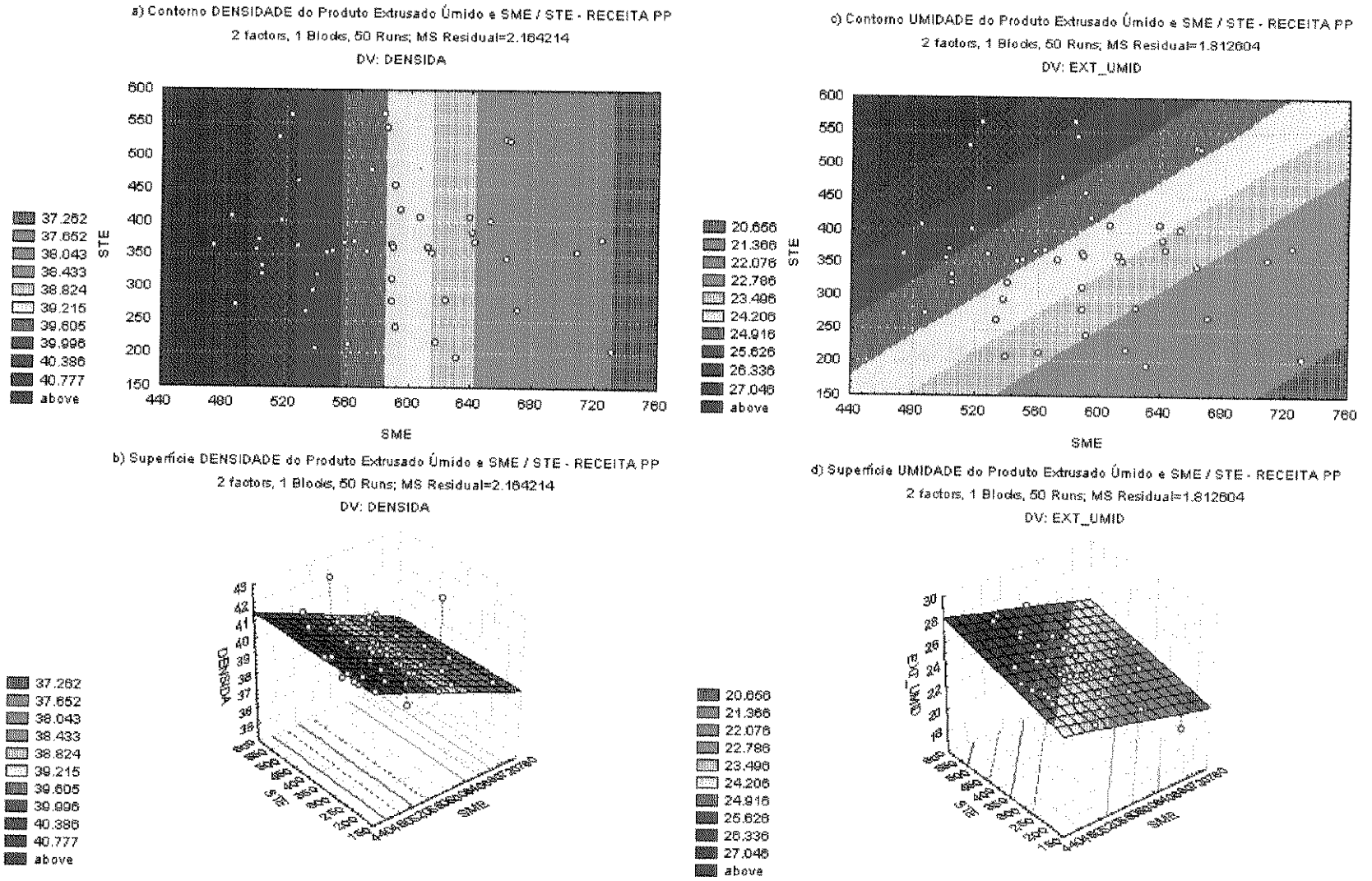


Figura 73: Relação entre SME e STE em kJ/kg para a (a,b) Densidade em kg/hL e (c,d) Umidade em % do Produto Extrusado Úmido – Receita PP.

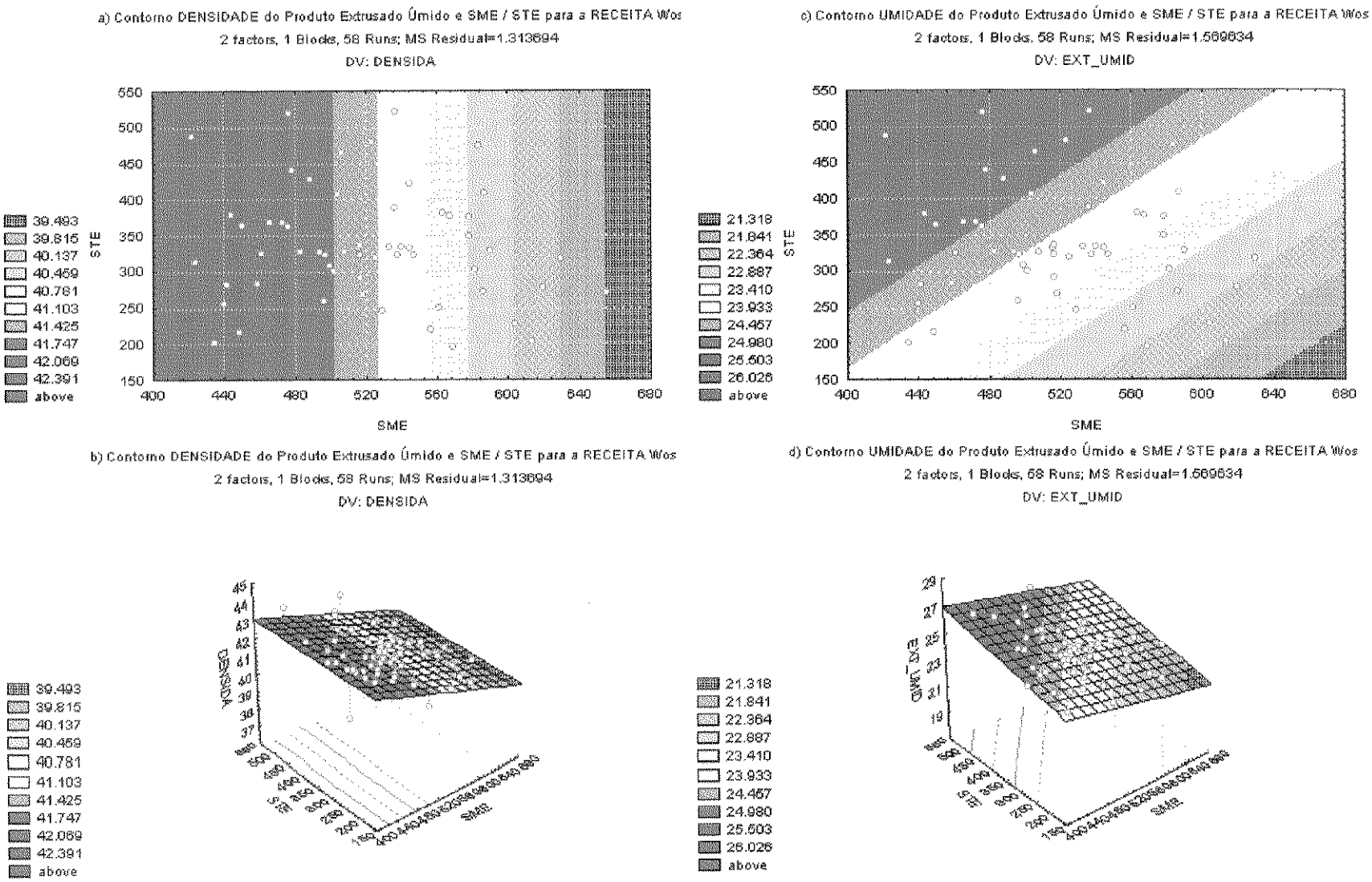


Figura 74: Relação entre SME e STE em kJ/kg para a (a,b) Densidade em kg/hL e (c,d) Umidade em % do Produto Extrusado Úmido – Receita Wos.

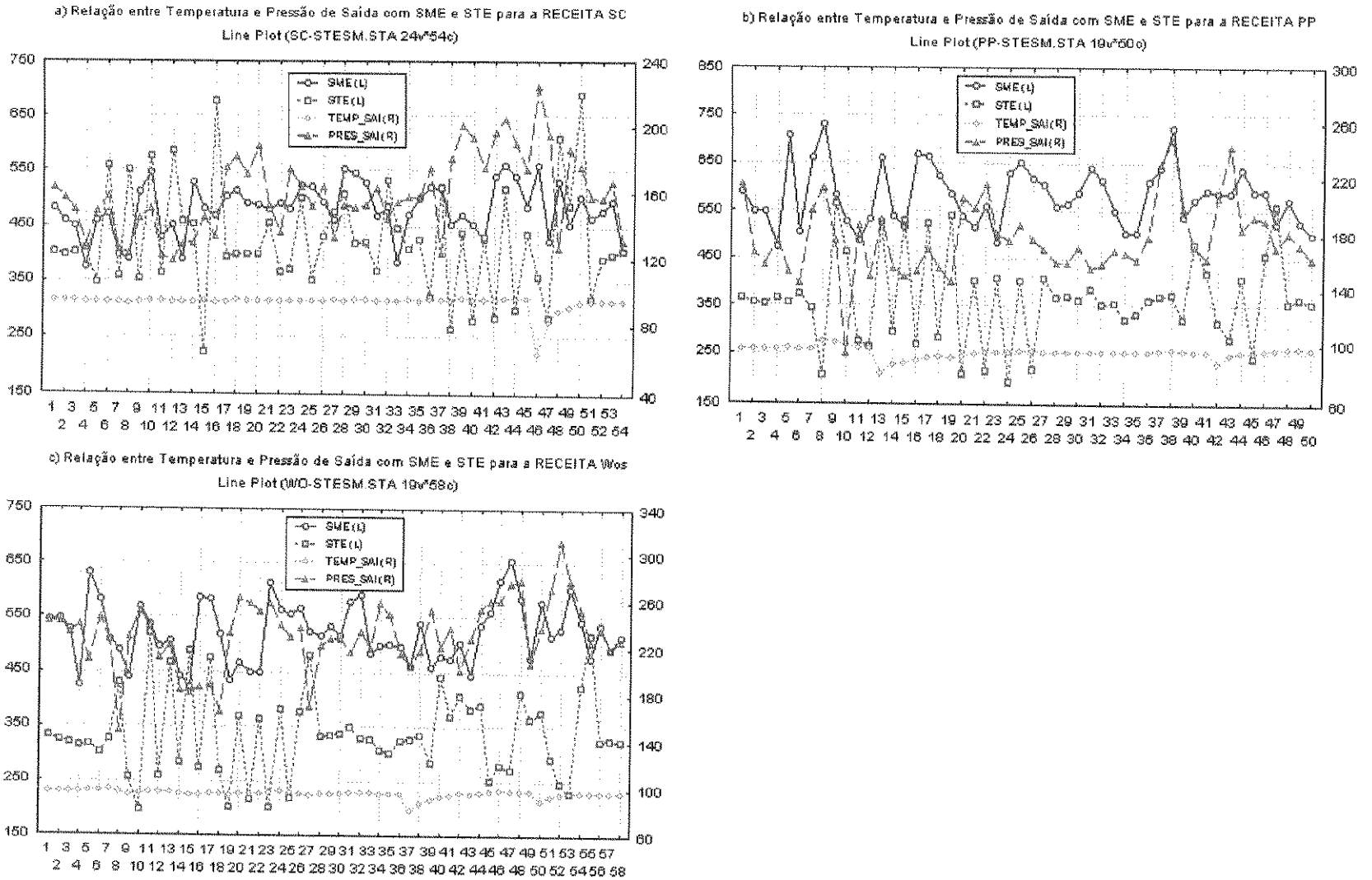
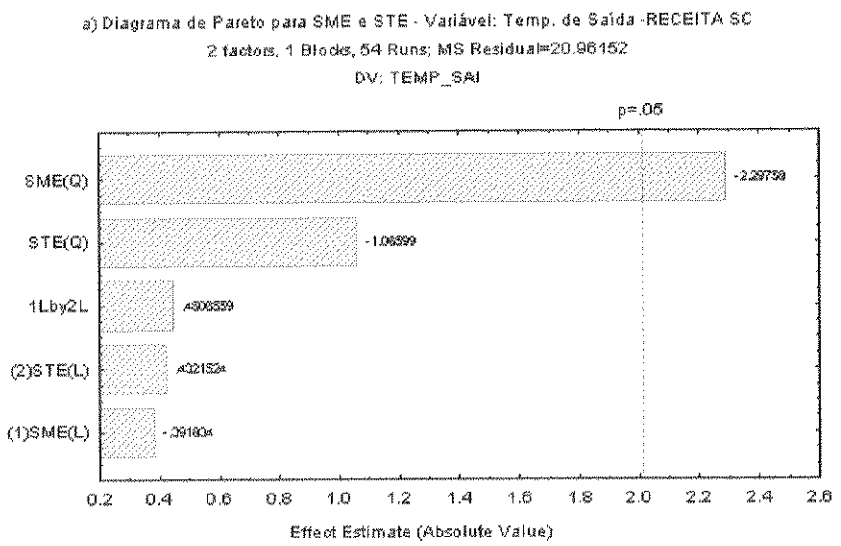
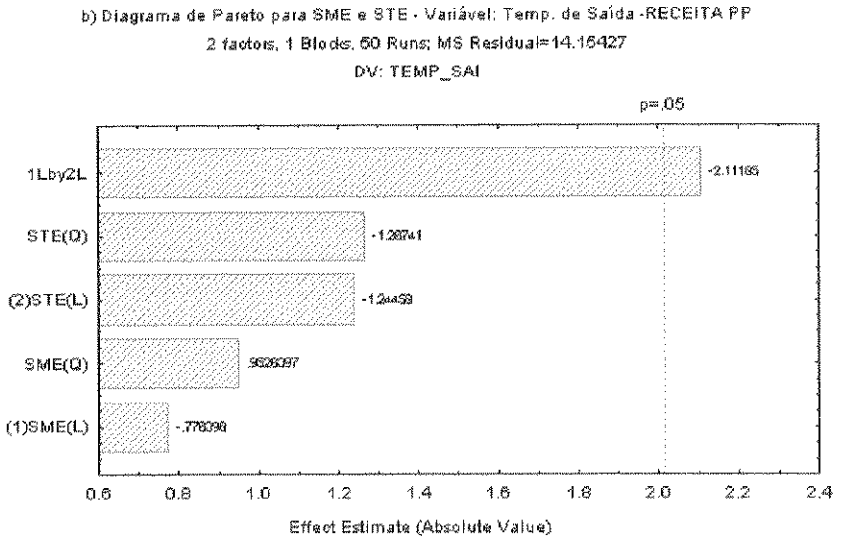


Figura 75: Variação da SME e STE em kJ/kg para Temperatura (^{0}C) e Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.





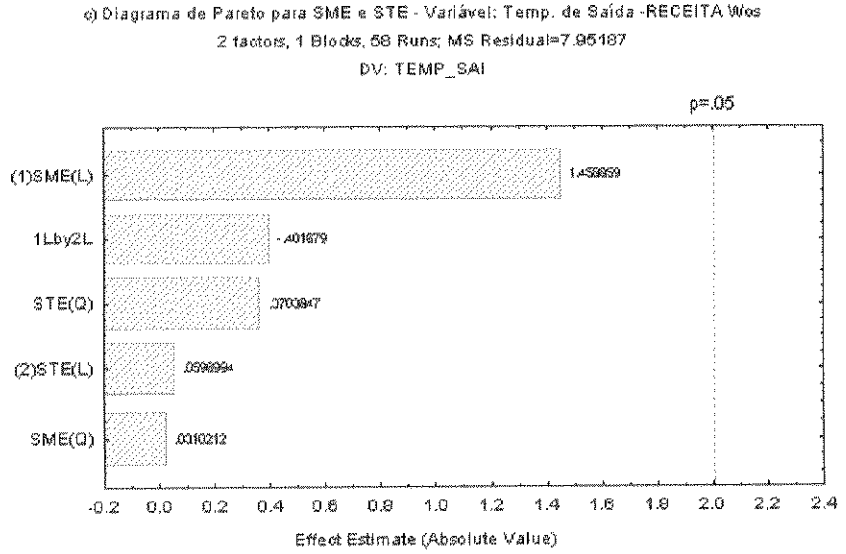
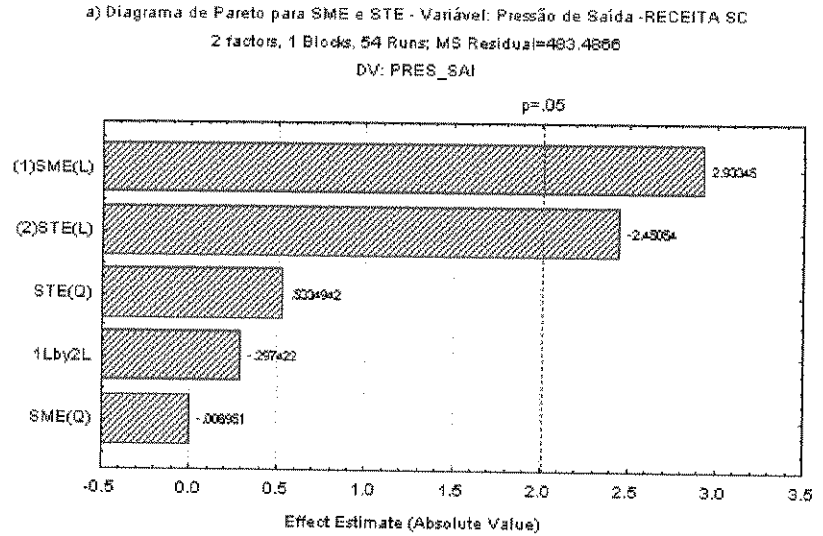
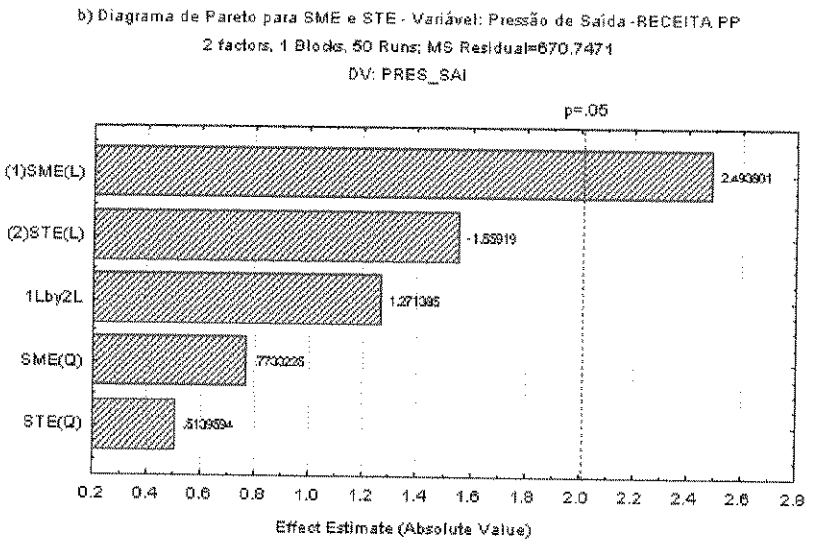


Figura 76: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Temperatura (^{0}C) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.





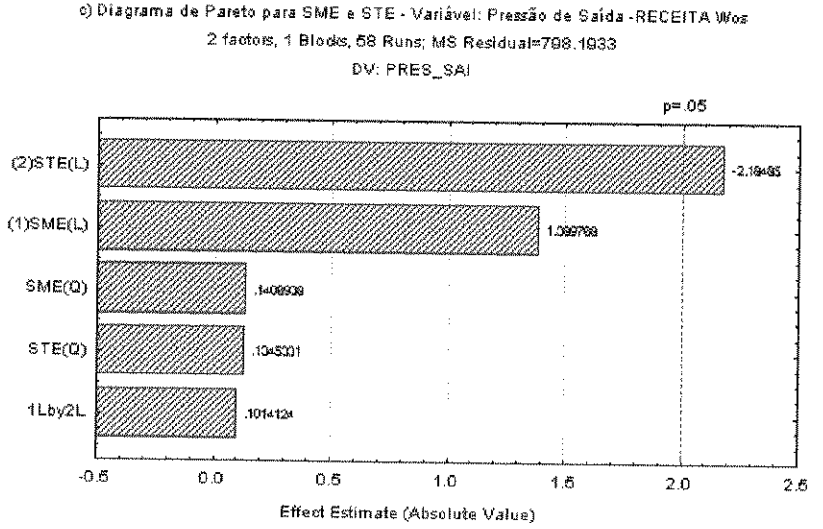


Figura 77: Diagrama de Pareto da SME e STE em kJ/kg para a Pressão (psi) de Saída para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

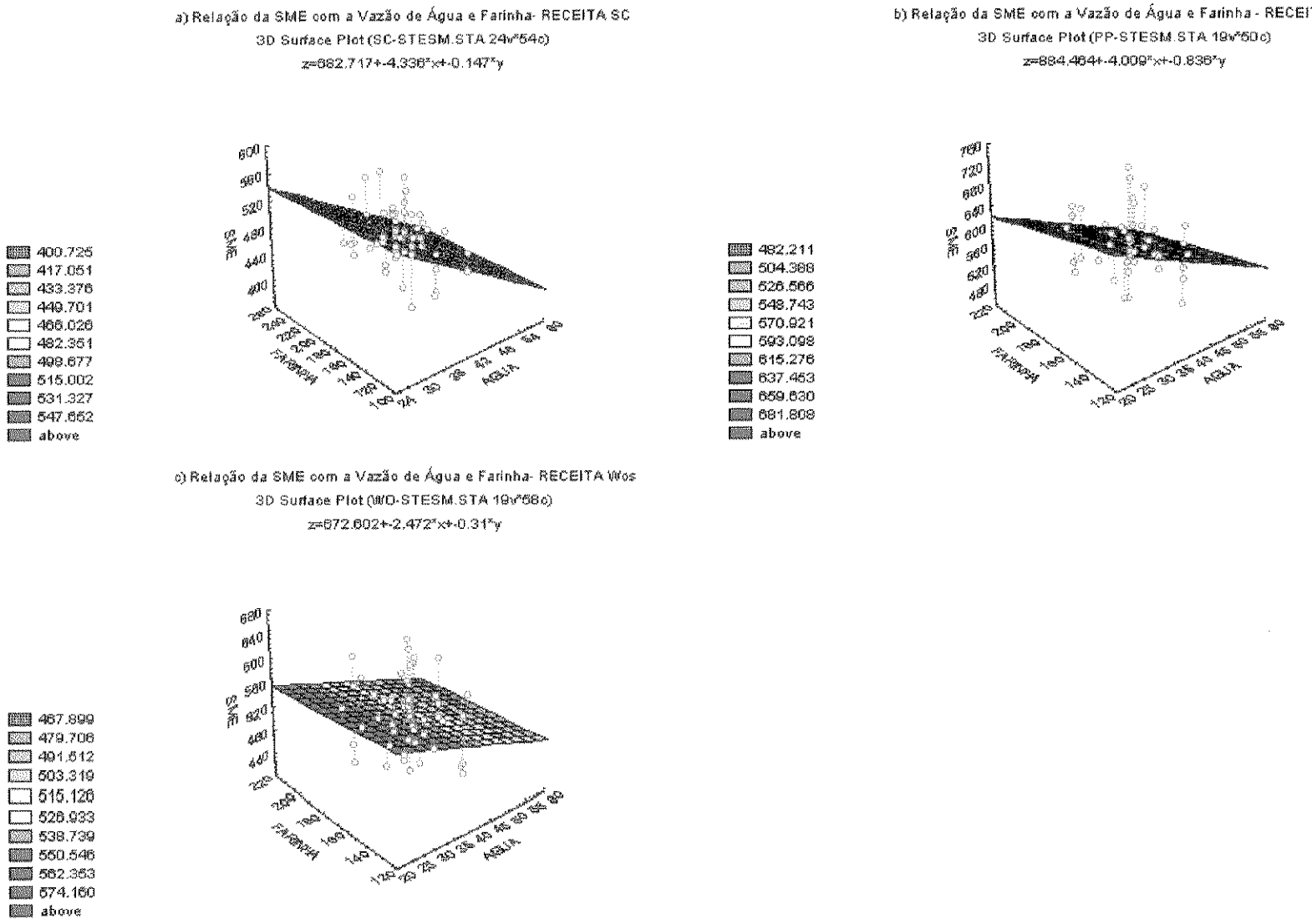


Figura 78: Relação entre a Vazão de Água e Farinha em kg/h para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

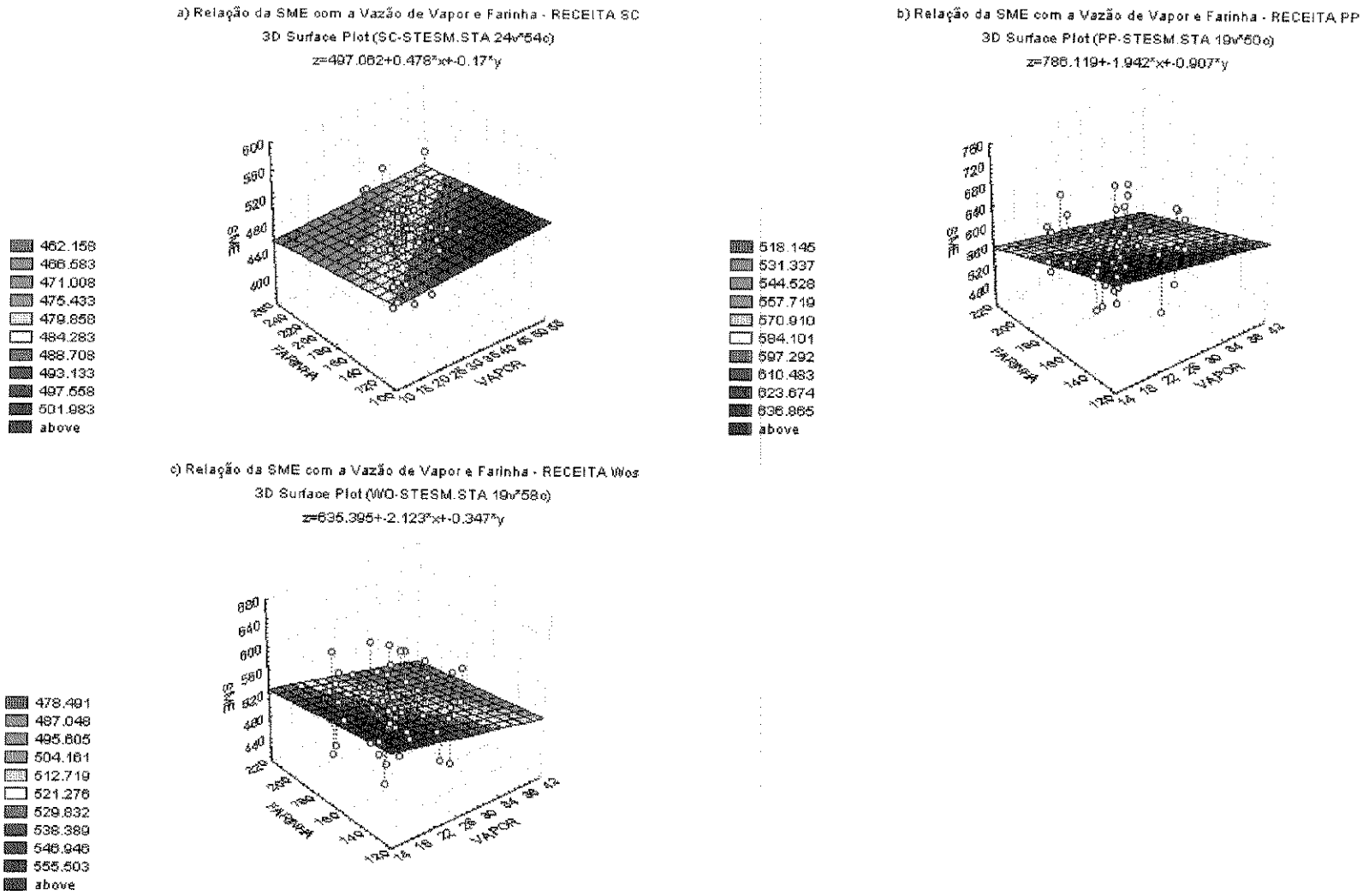


Figura 79: Relação entre a Vazão de Vapor e Farinha em kg/h para a Energia Mecânica Especifica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

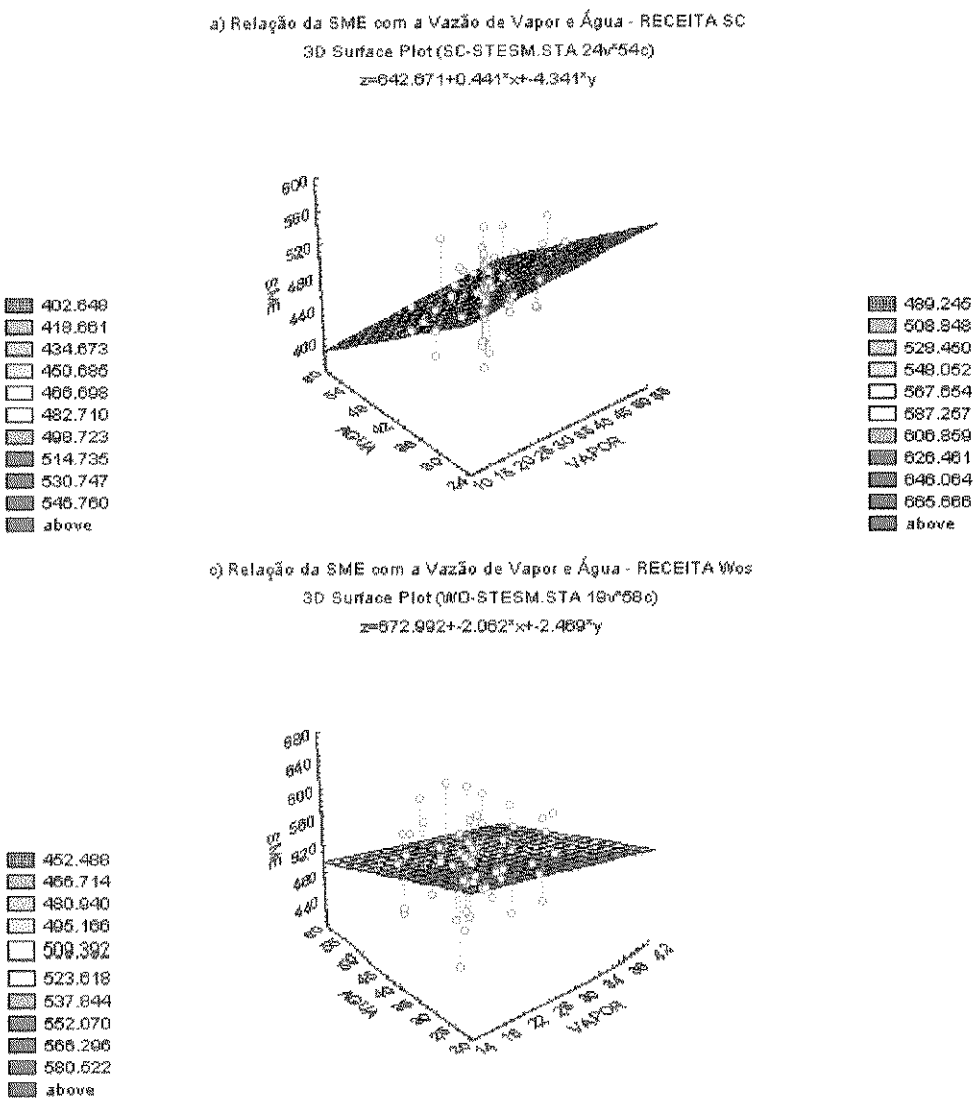


Figura 80: Relação entre a Vazão de Vapor e Água em kg/h para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

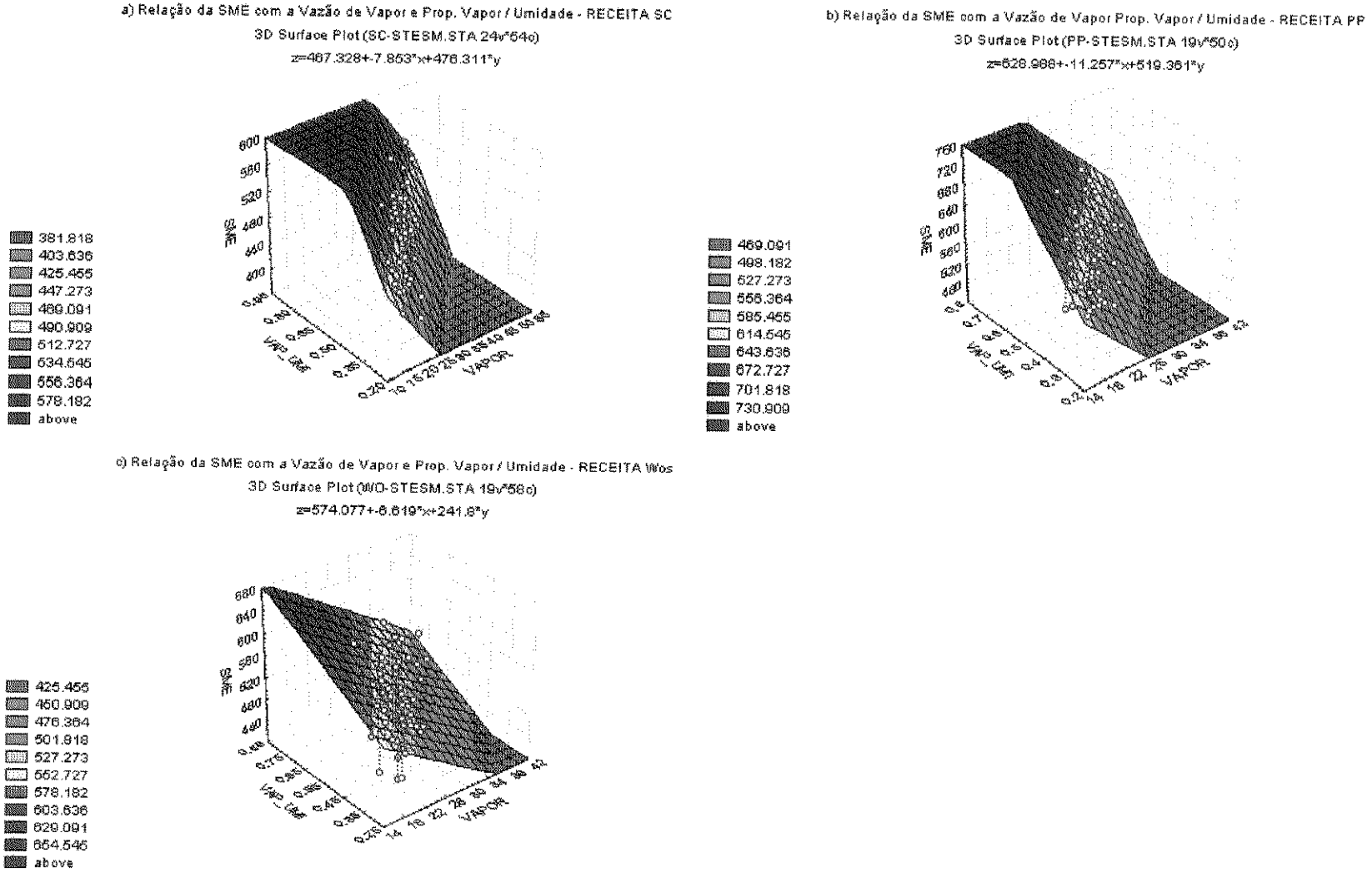


Figura 81: Relação entre a Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

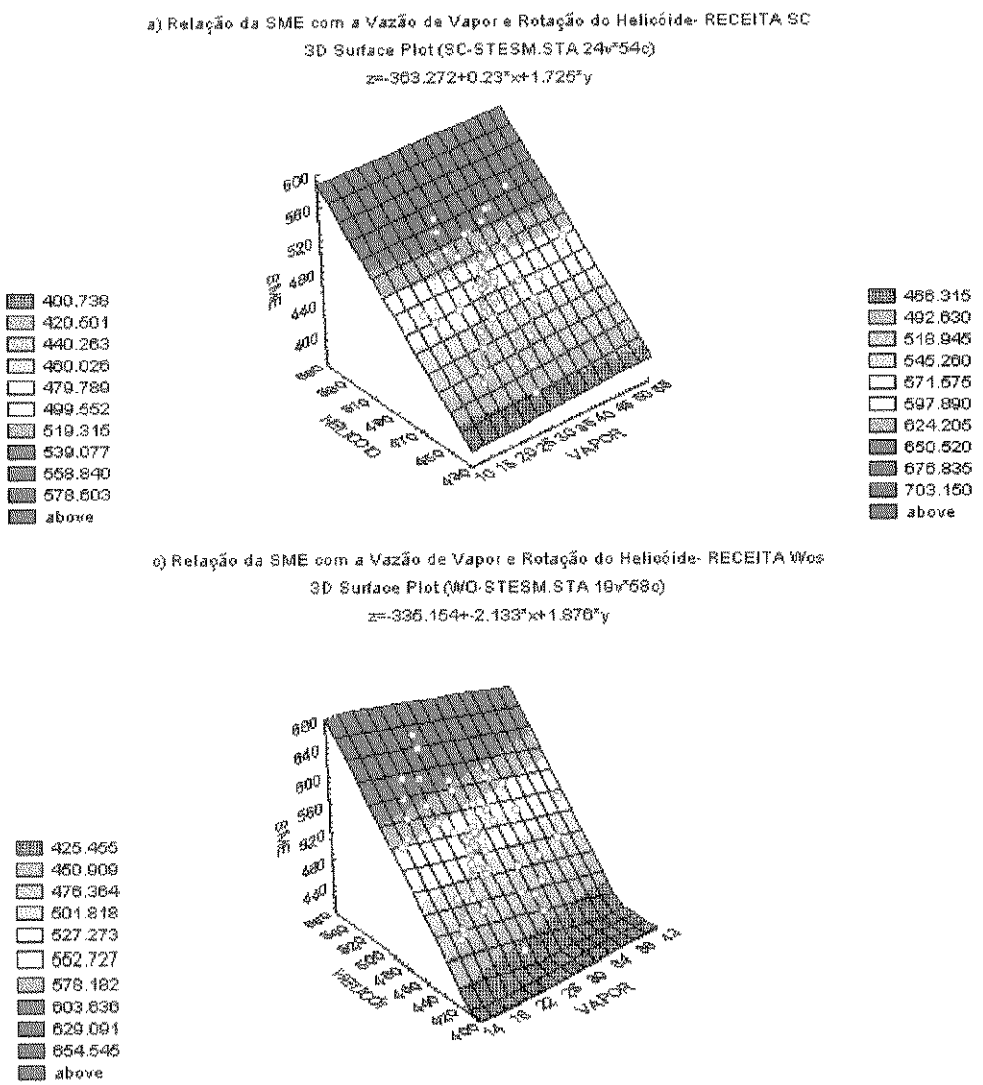


Figura 82: Relação entre a Vazão de Vapor em kg/h e Rotação de Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

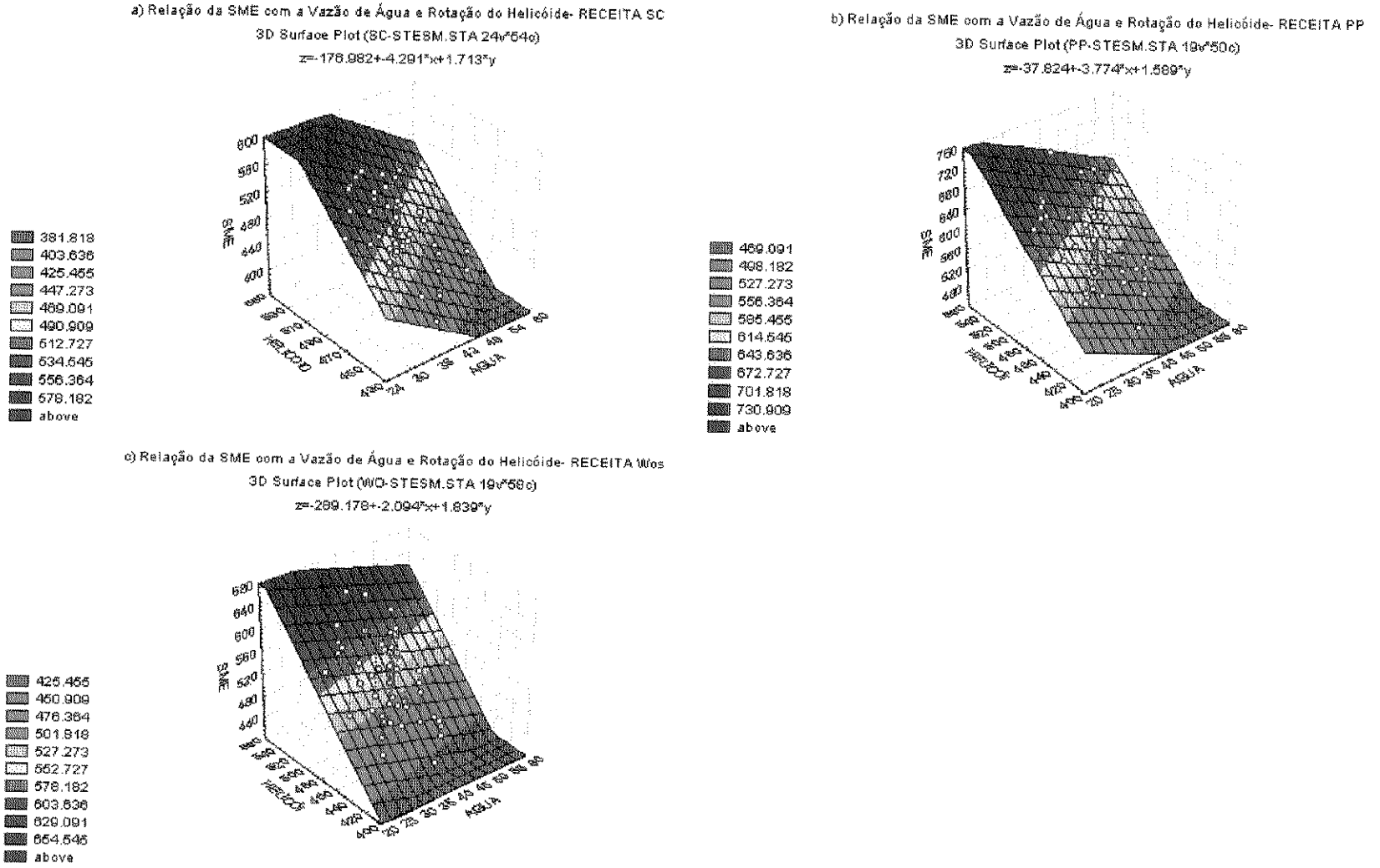


Figura 83: Relação entre a Vazão de Água em kg/h e Rotação de Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

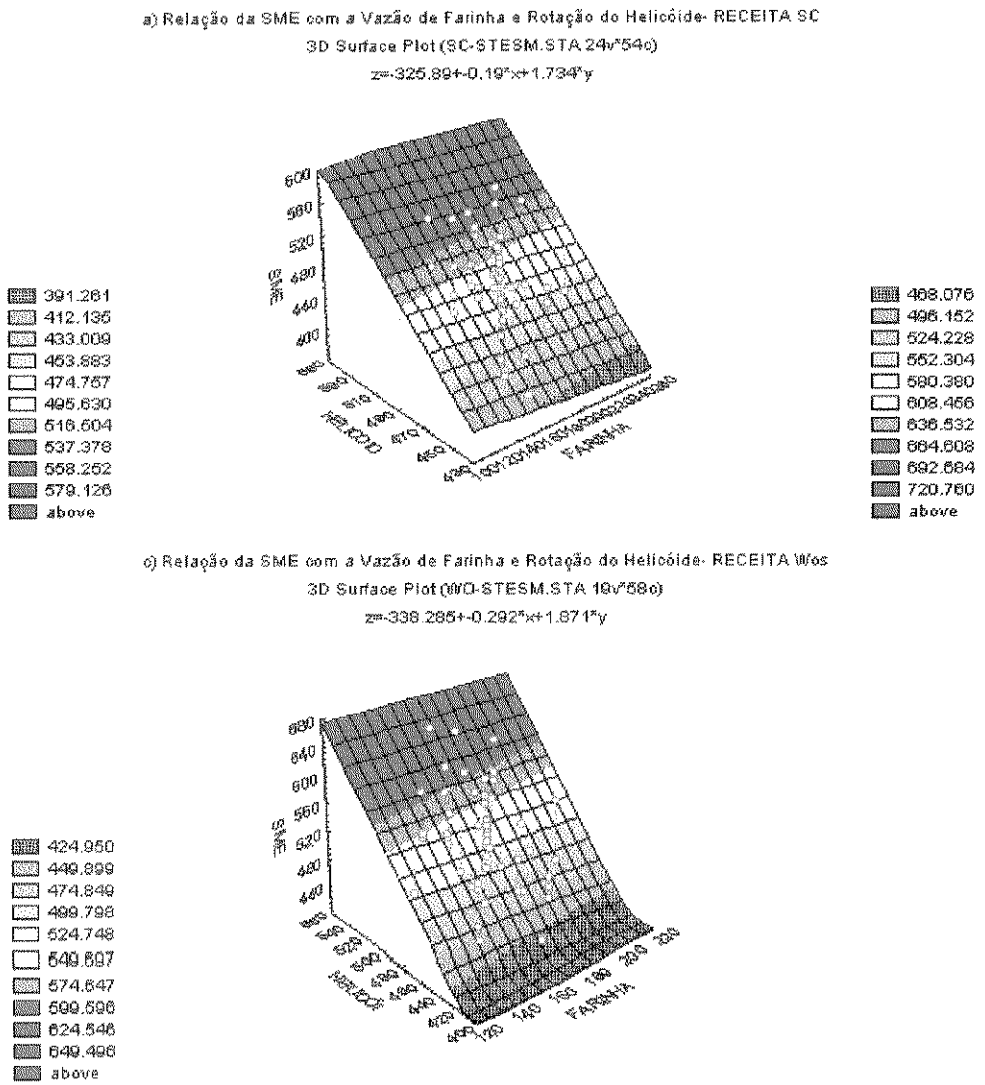


Figura 84: Relação entre a Vazão de Farinha em kg/h e Rotação de Helicóide em rpm para a Energia Mecânica Específica (SME) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

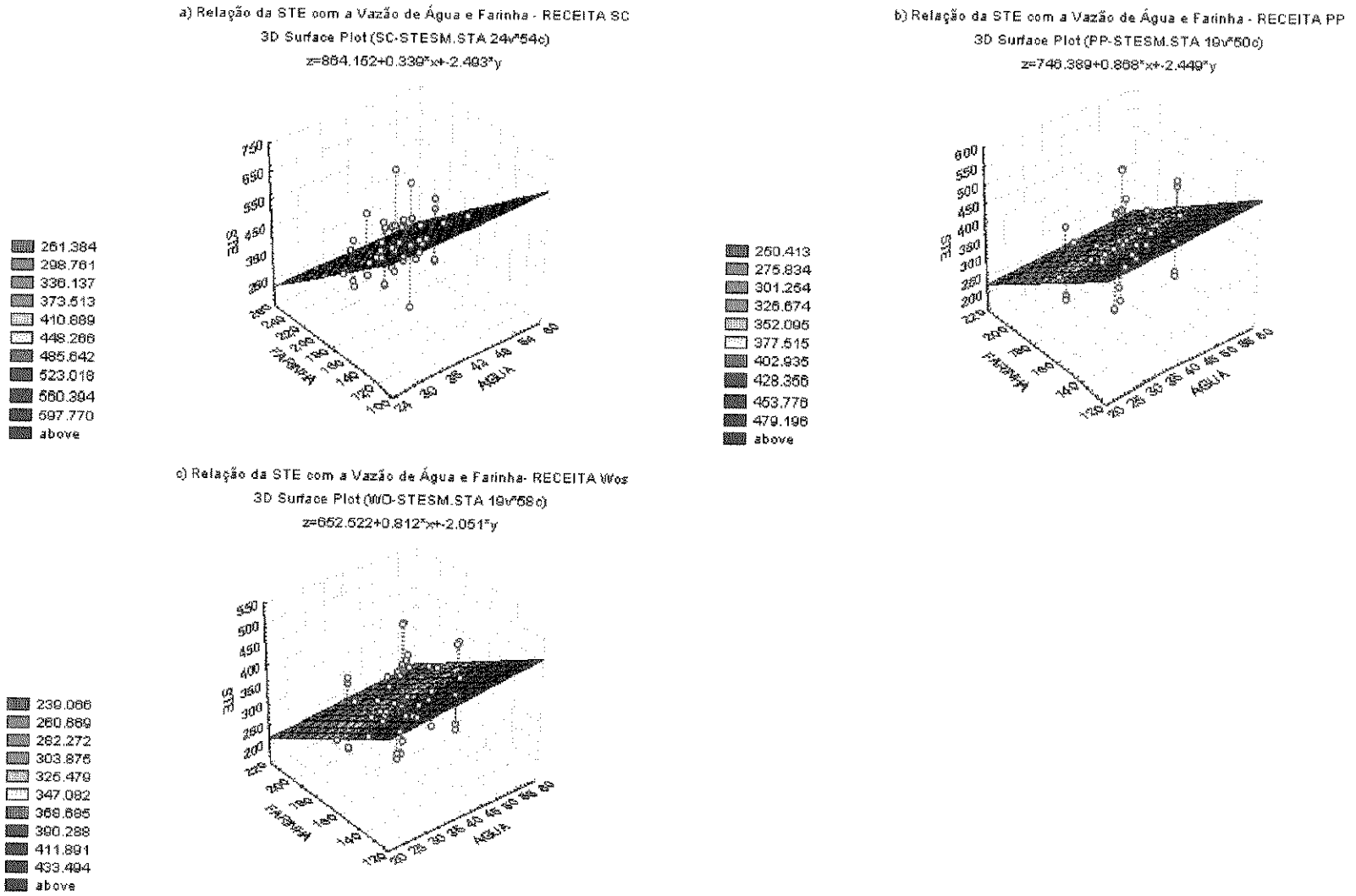


Figura 85: Relação entre a Vazão de Água e Farinha em kg/h para a Energia Térmica Específica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

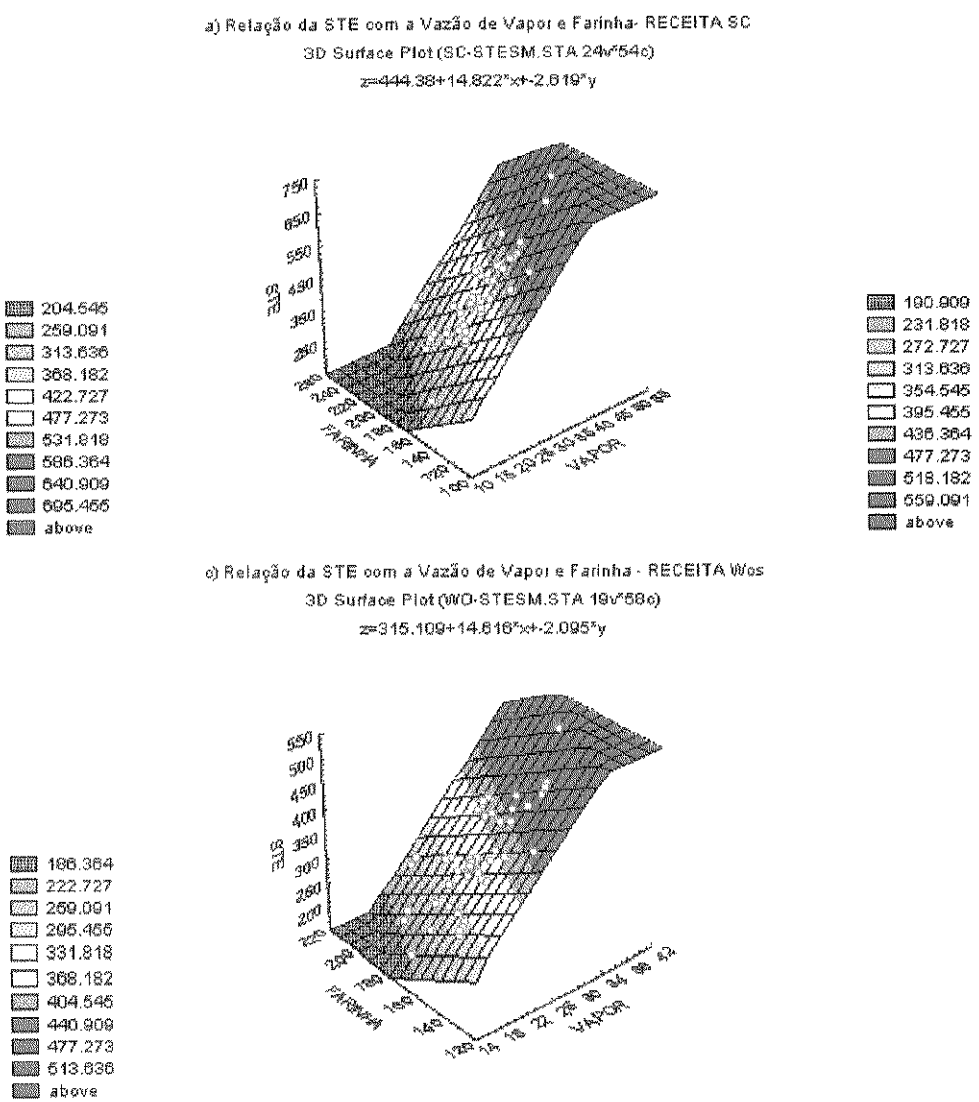


Figura 86: Relação entre a Vazão de Vapor e Farinha em kg/h para a Energia Térmica Específica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

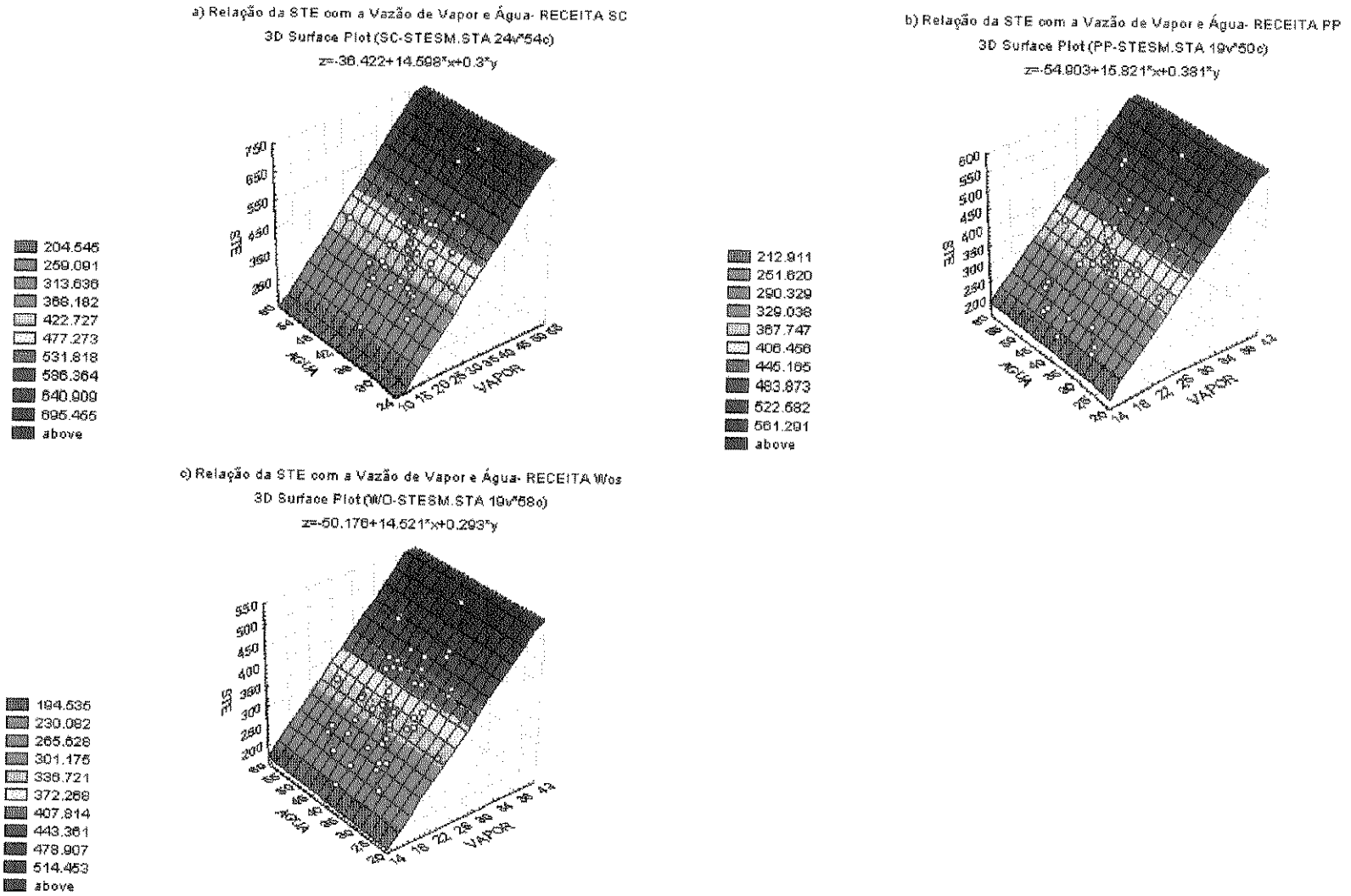


Figura 87: Relação entre a Vazão de Vapor e Água em kg/h para a Energia Térmica Especifica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

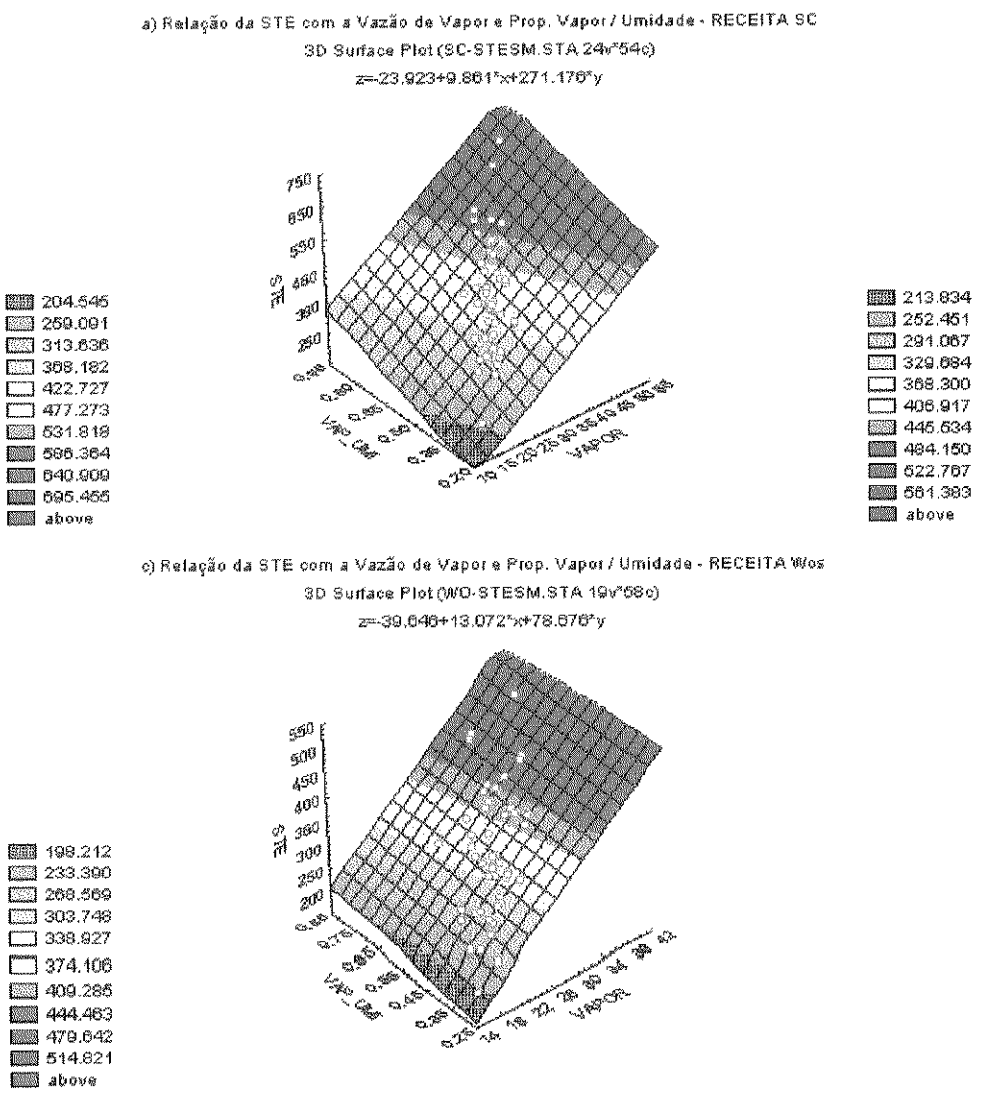


Figura 88: Relação entre a Vazão de Vapor em kg/h e Proporção Vapor/Umidade para a Energia Térmica Específica (STE) em kJ/kg para as Receitas (a) SC, (b) PP e (c) Wos.

XII) ANEXO VI

O Anexo VI relaciona as relações estatísticas significativas para a Temperatura e Pressão de Saída.

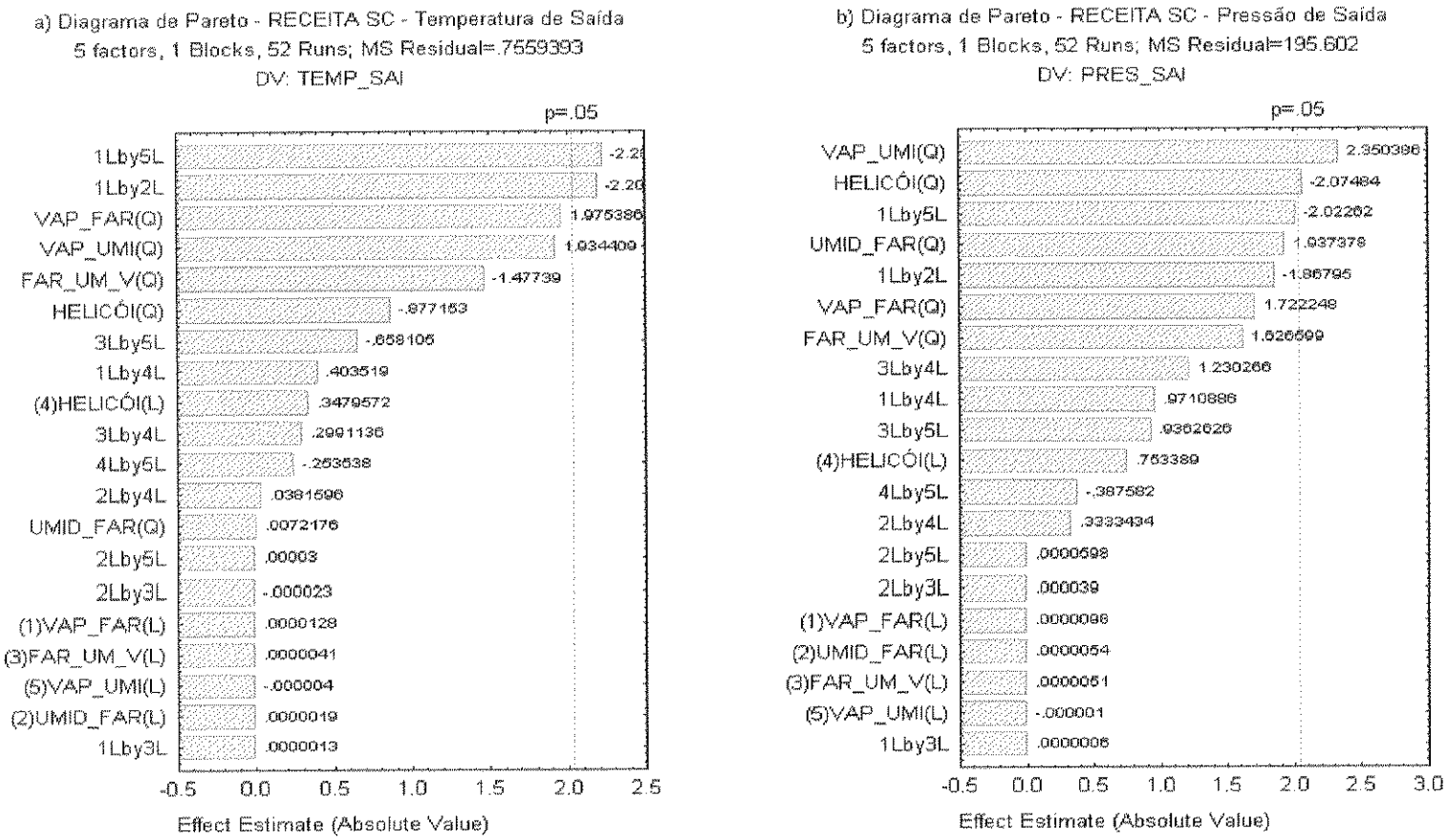


Figura 89: Diagrama de Pareto das Variáveis Manipulativas para a (a) Temperatura (^{0}C) e (b) Pressão (psi) de Saida na receita SC.

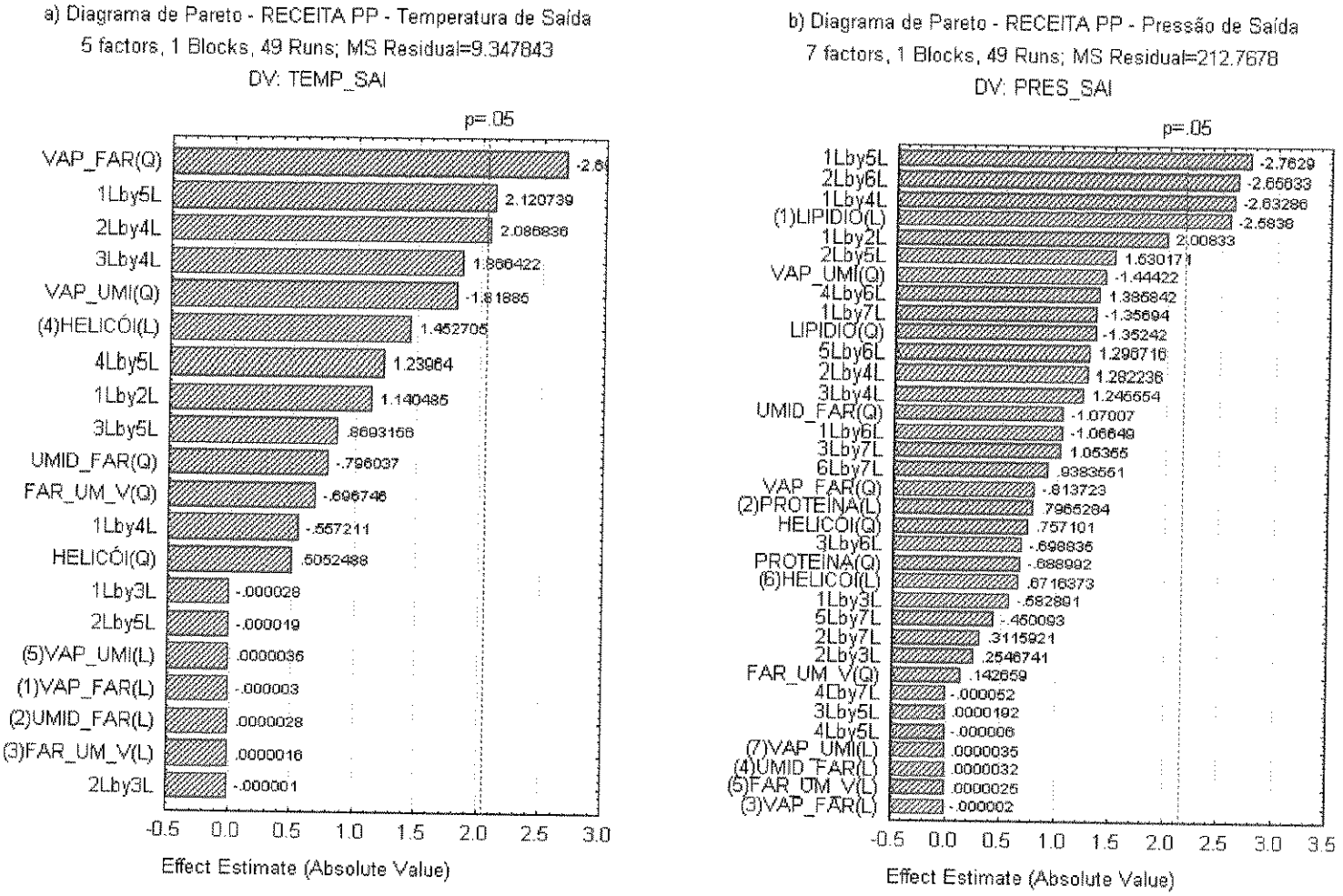


Figura 90: Diagrama de Pareto das Variáveis Manipulativas para a (a) Temperatura (^{0}C) e (b) Pressão (psi) de Saída na Receita PP.

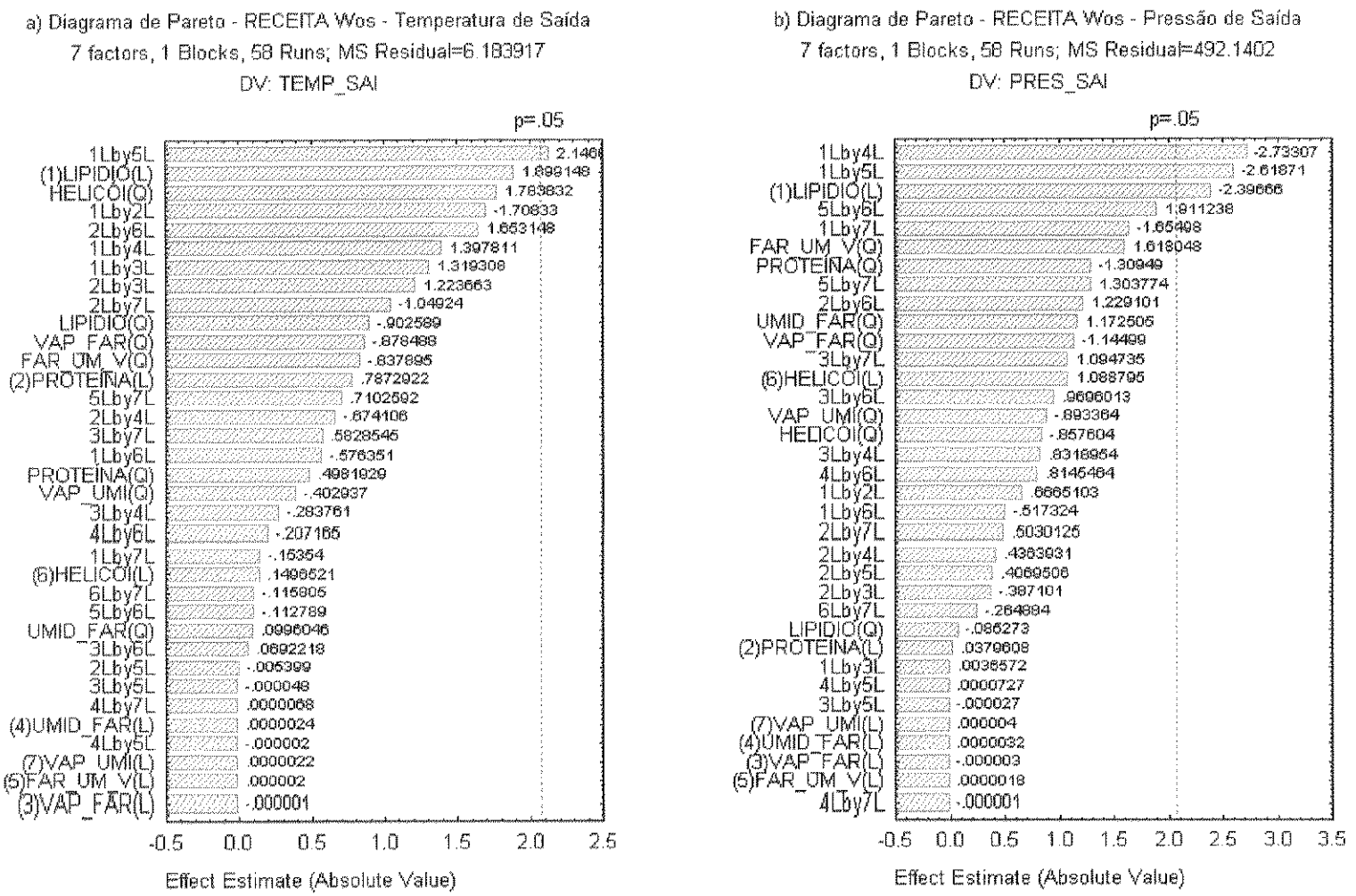


Figura 91: Diagrama de Pareto das Variáveis Manipulativas para a (a) Temperatura (^{0}C) e (b) Pressão (psi) de Saída na receita Wos.

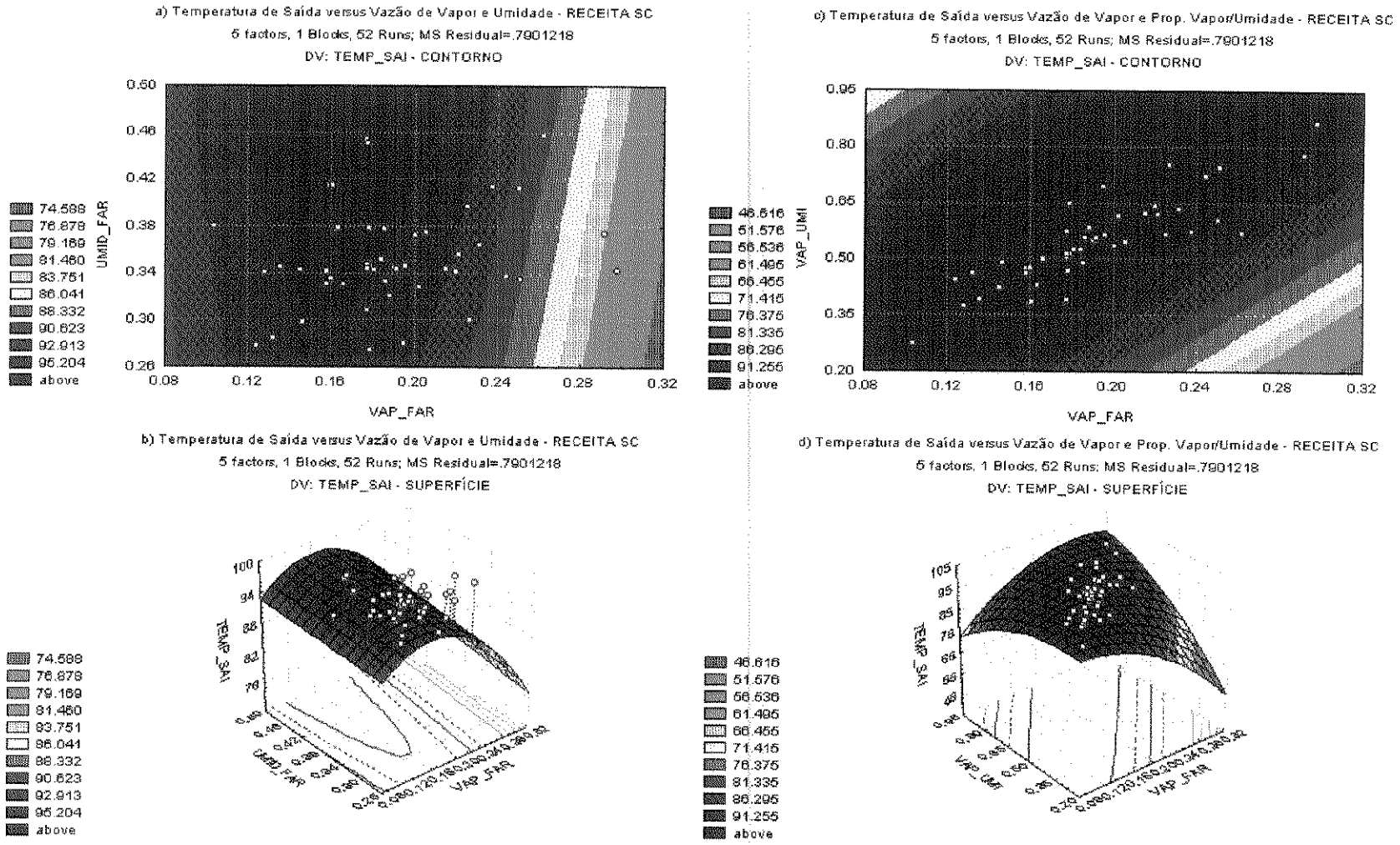


Figura 92: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Vazão de Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Vapor e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^0C) de Saída na Receita SC.

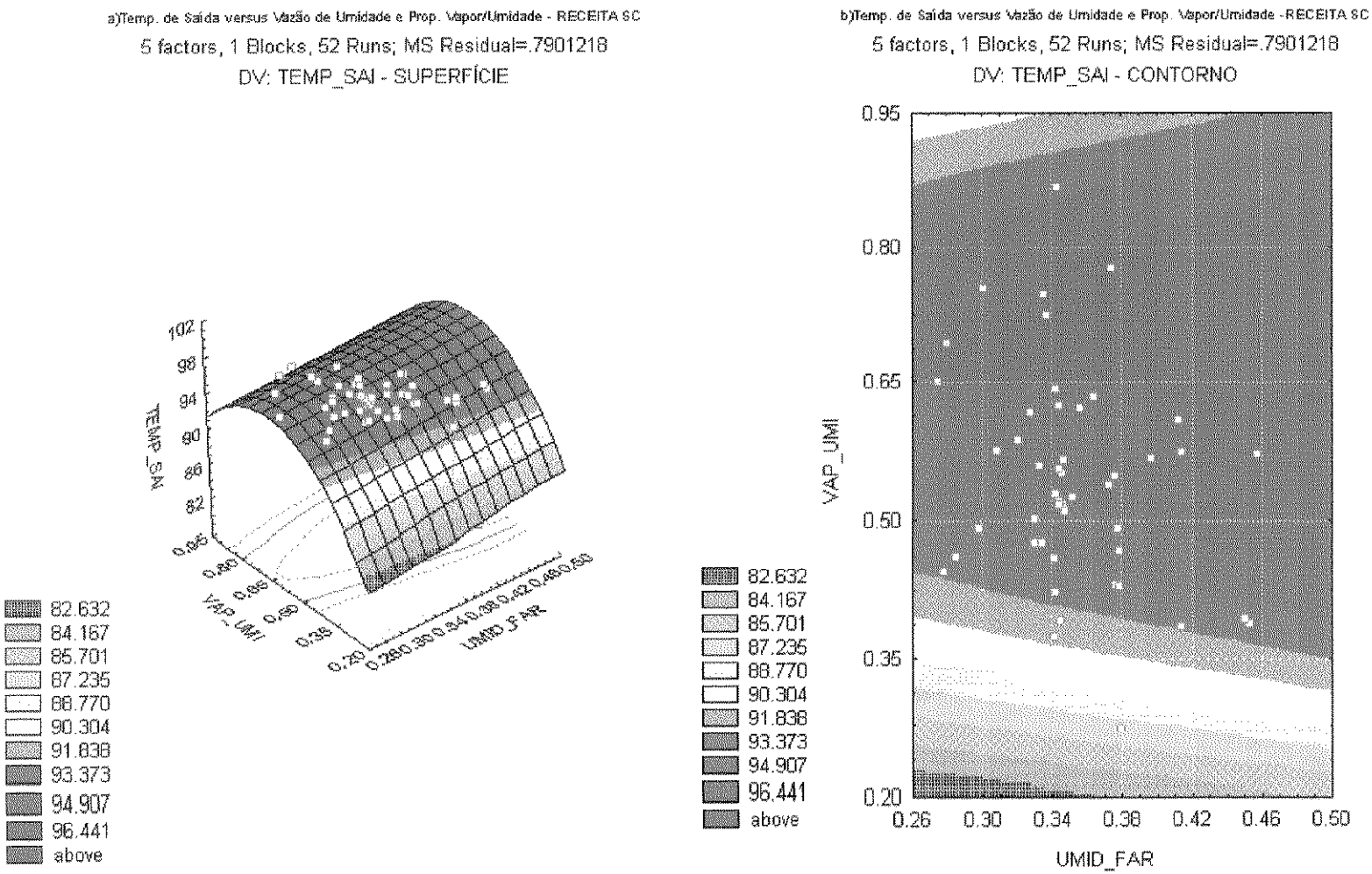


Figura 93: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^0C) de Saída na Receita SC.

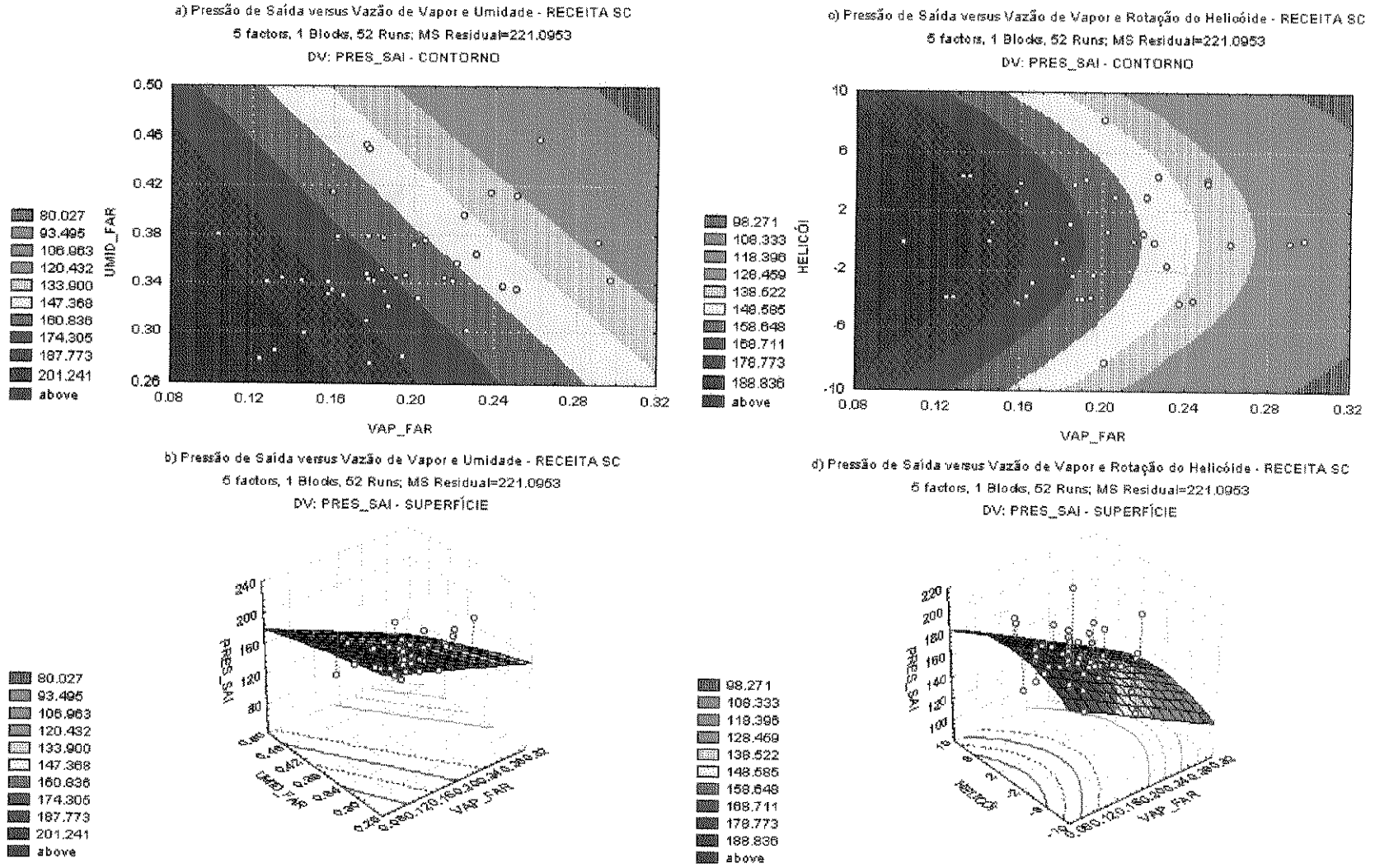


Figura 94: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Vapor em e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita SC.

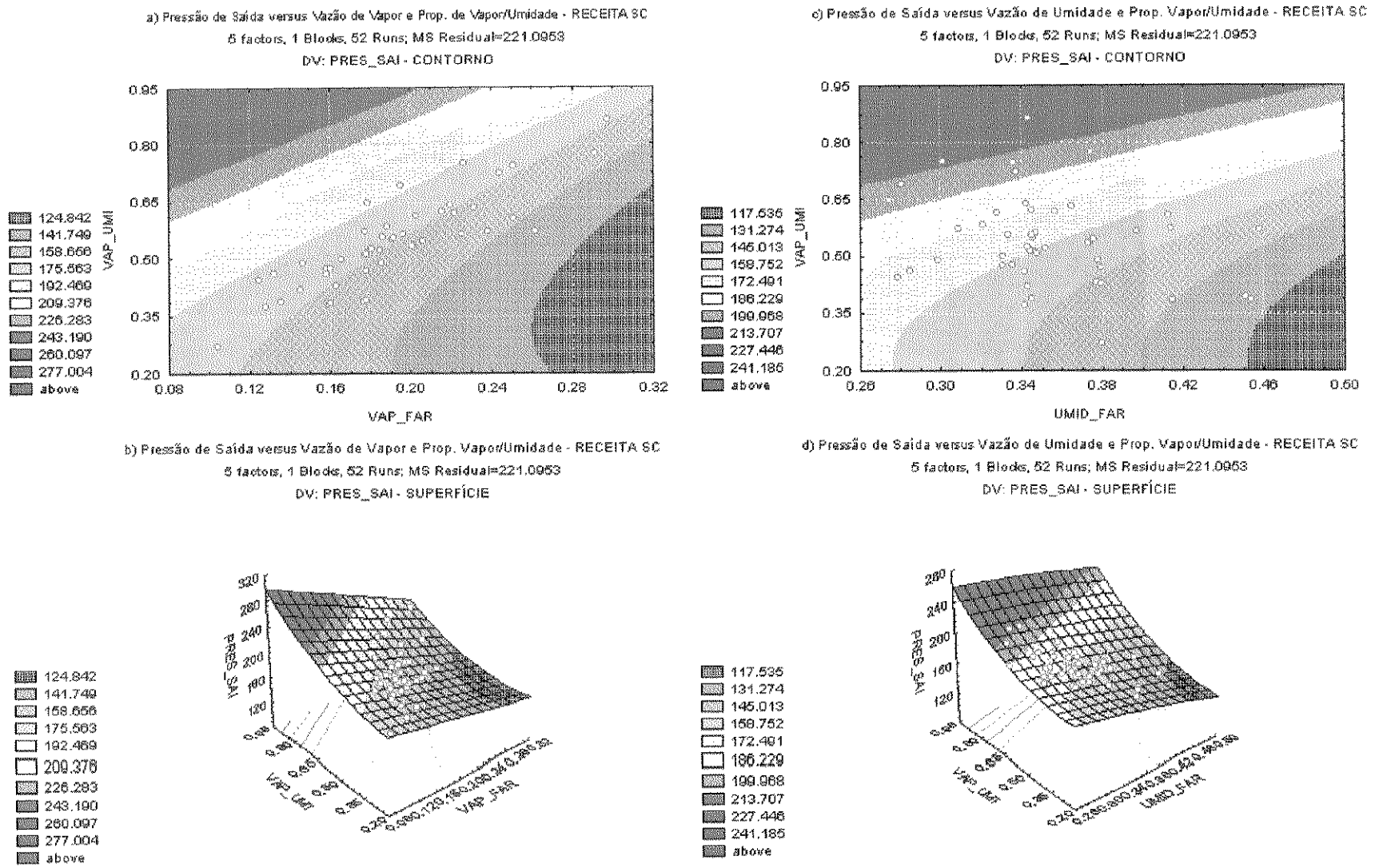


Figura 95: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Proporção Vapor / Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Proporção Vapor / Umidade para a Pressão (psi) de Saída na Receita SC.

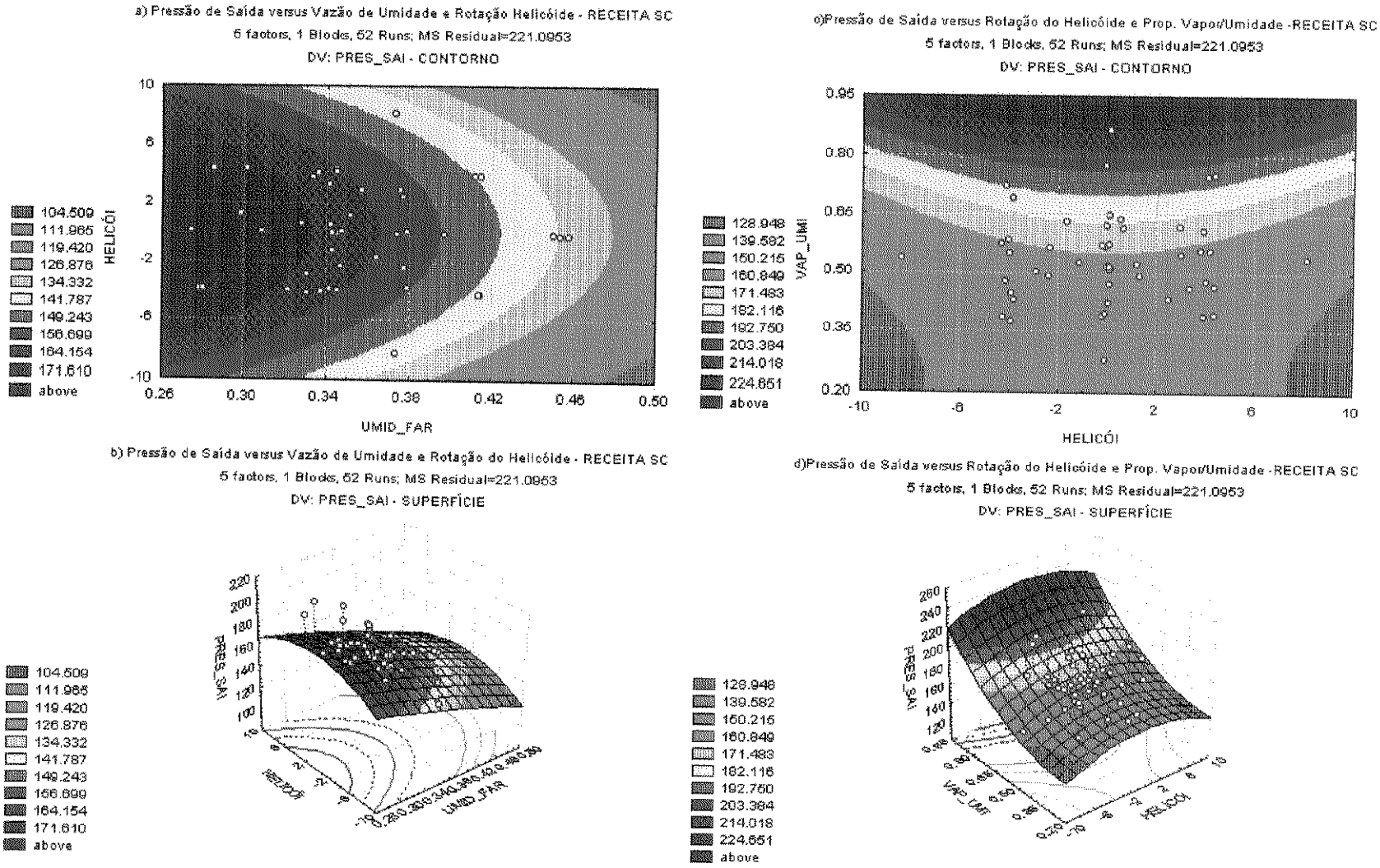


Figura 96: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide e (c e d) Influência da Rotação do Helicóide e Proporção vapor / Umidade para a Pressão (psi) de Saída na Receita SC.

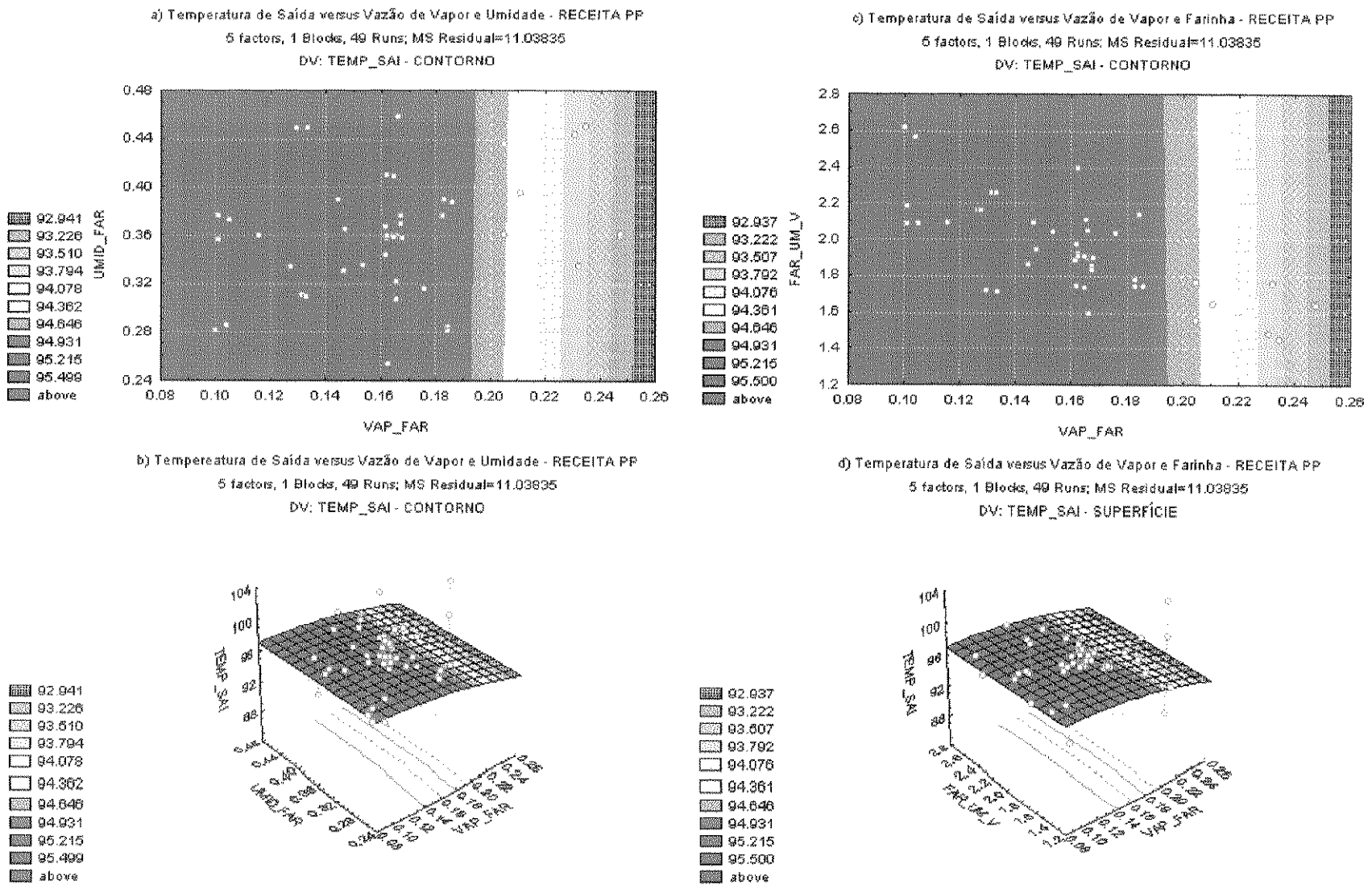


Figura 97: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Vapor e Farinha para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP.

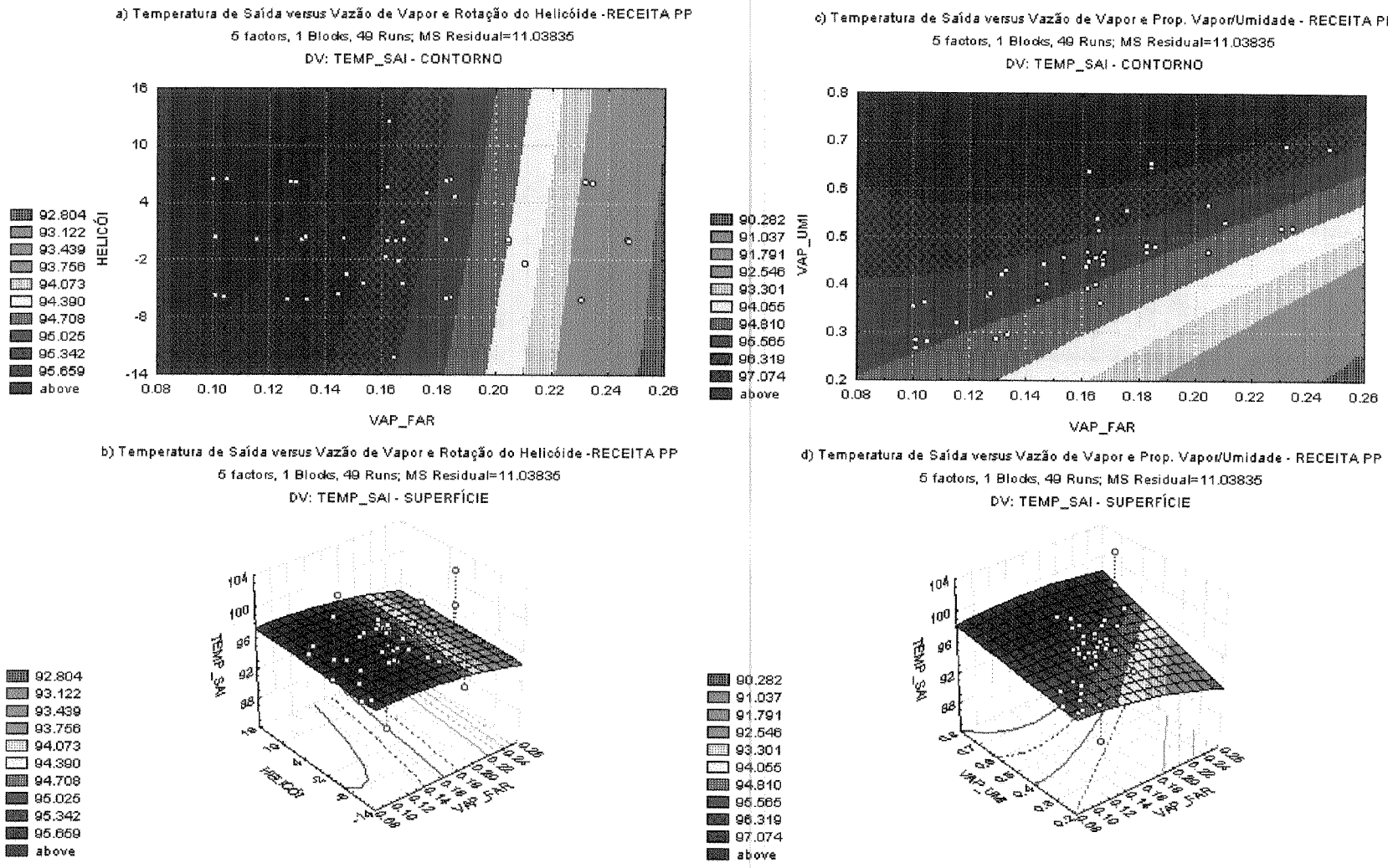


Figura 98: (a e b) Influência da Vazão de Vapor e Rotação do Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Vapor e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP.

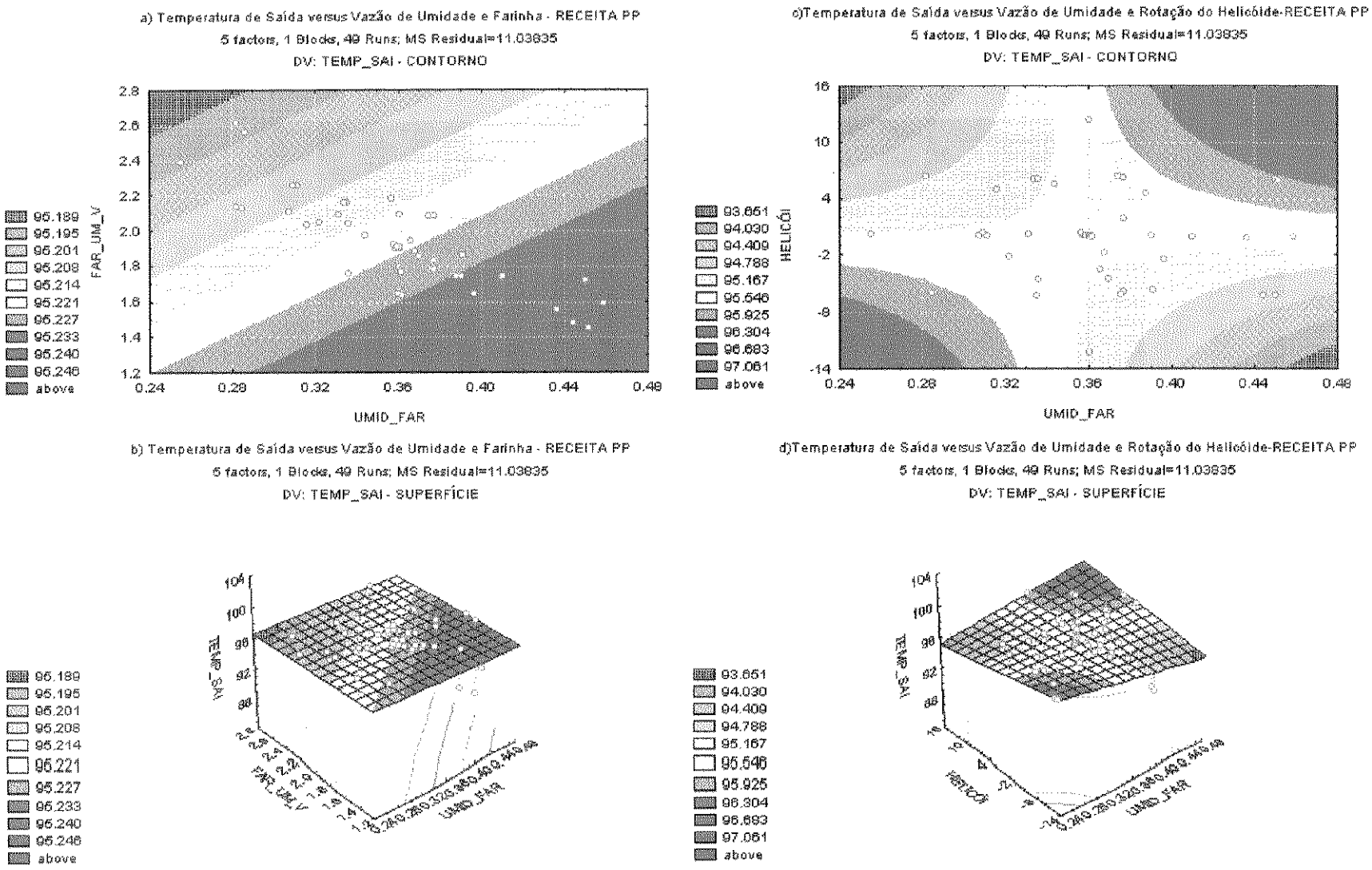


Figura 99: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Farinha e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^0C) de Saída na Receita PP.

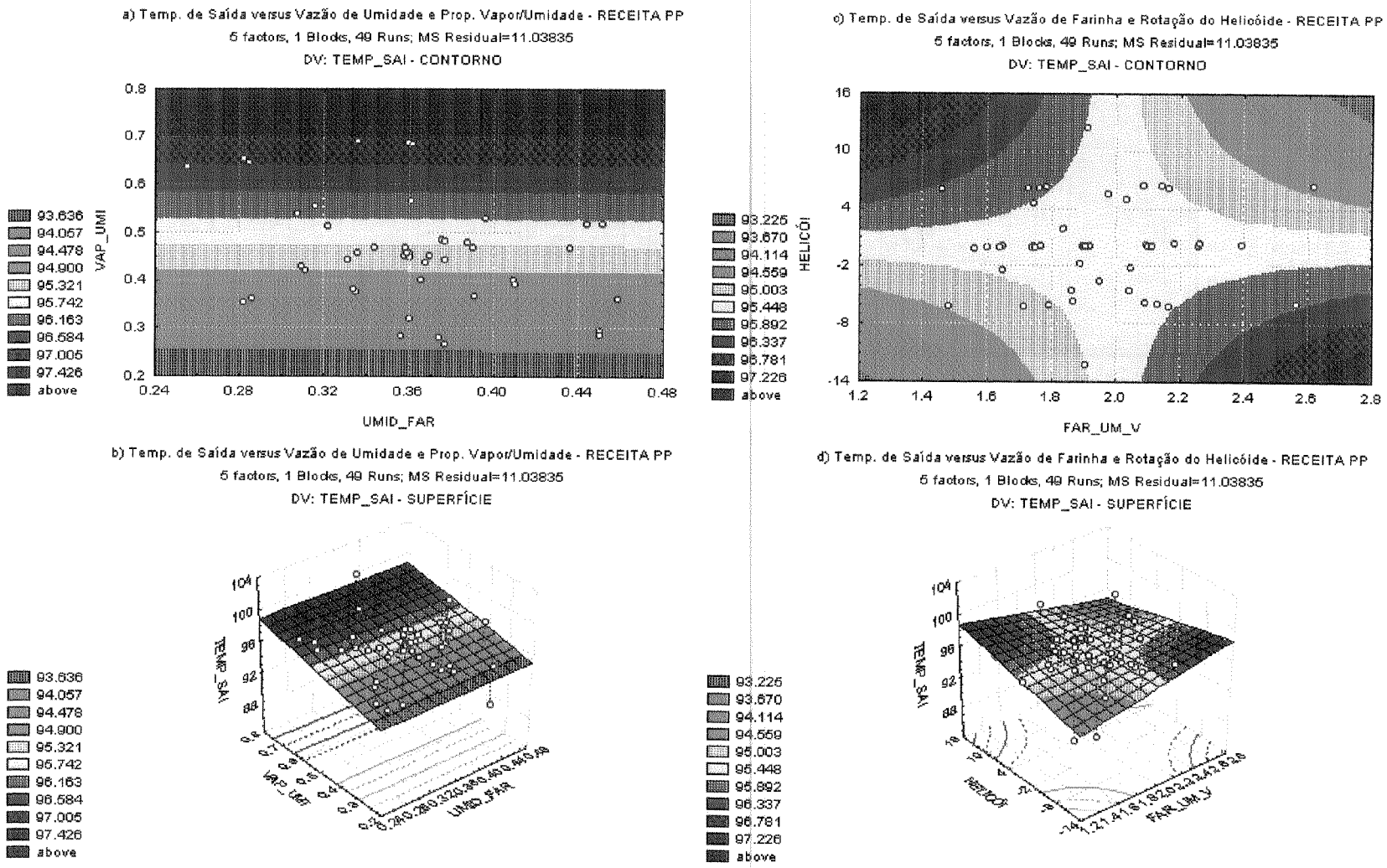
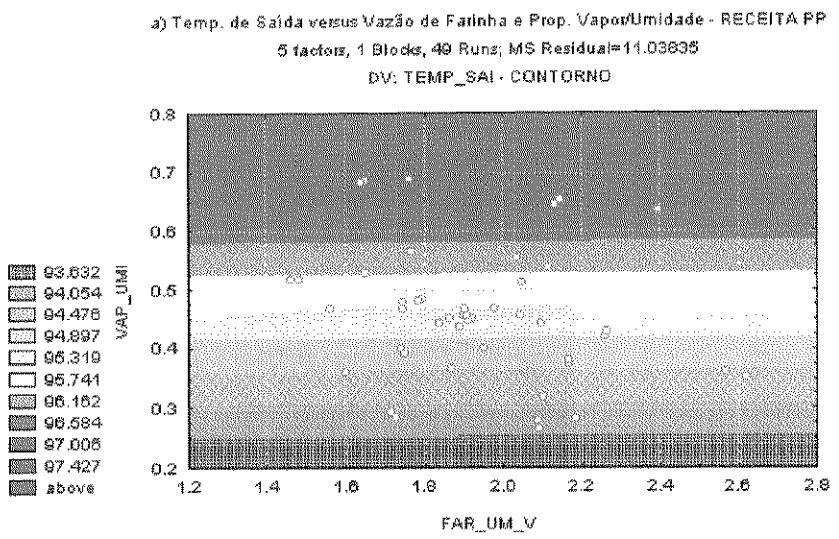
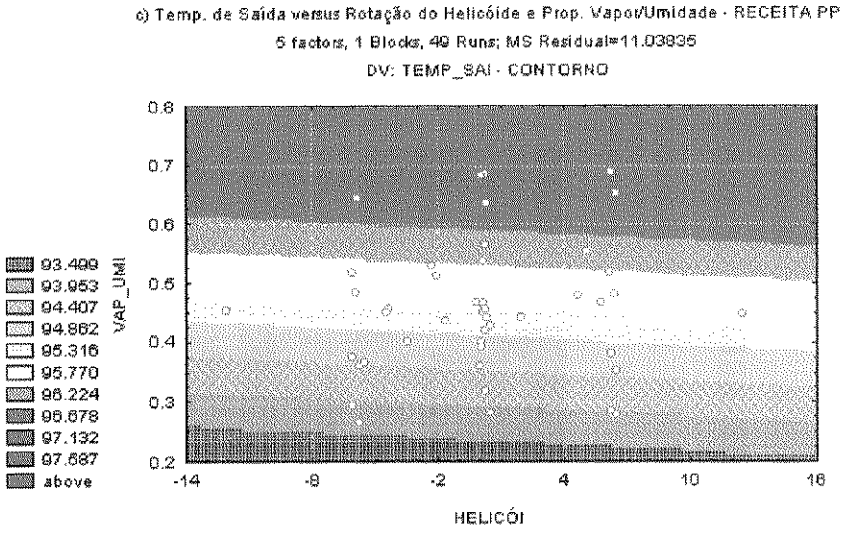
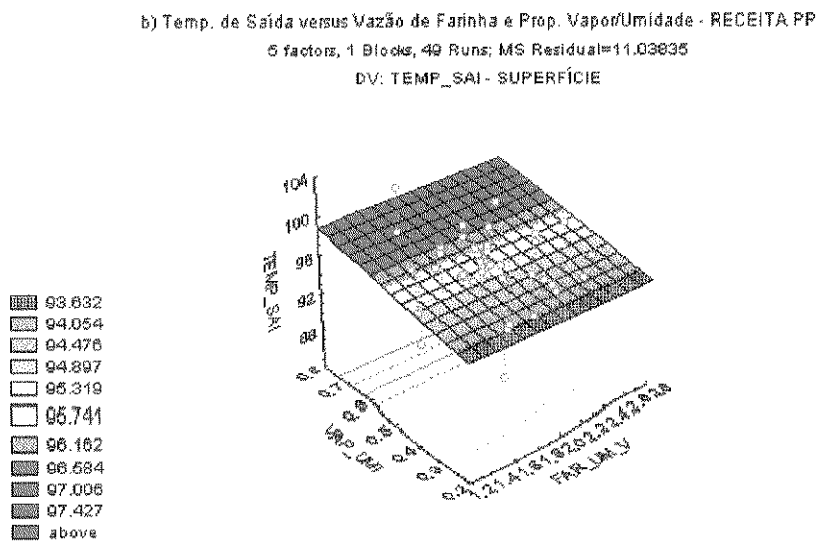


Figura 100: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Proporção Vapor / Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Farinha e Rotação do Helicóide para a Temperatura (^{0}C) de Saída na Receita PP.







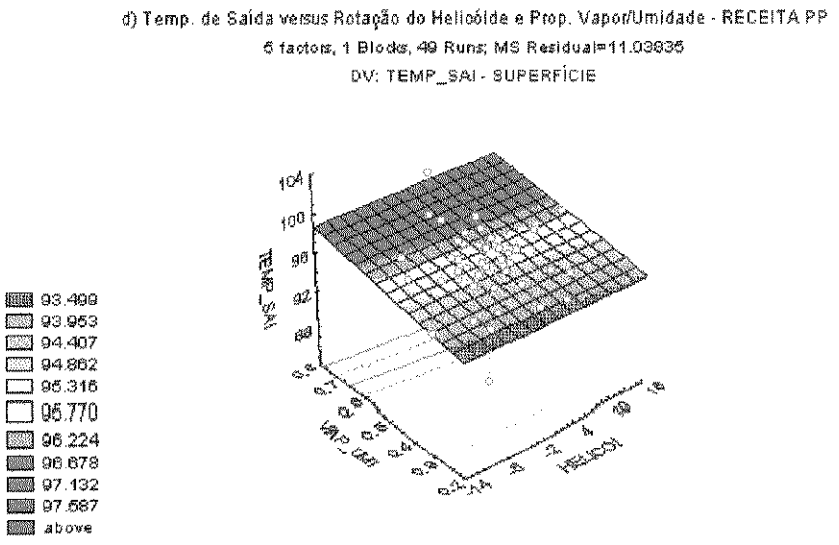


Figura 101: (a e b) Influência da Vazão de Farinha e Proporção Vapor / Umidade e (c e d) Influência da Rotação do Helicóide e Proporção Vapor / Umidade para a Temperatura (^0C) de Saída na Receita PP.

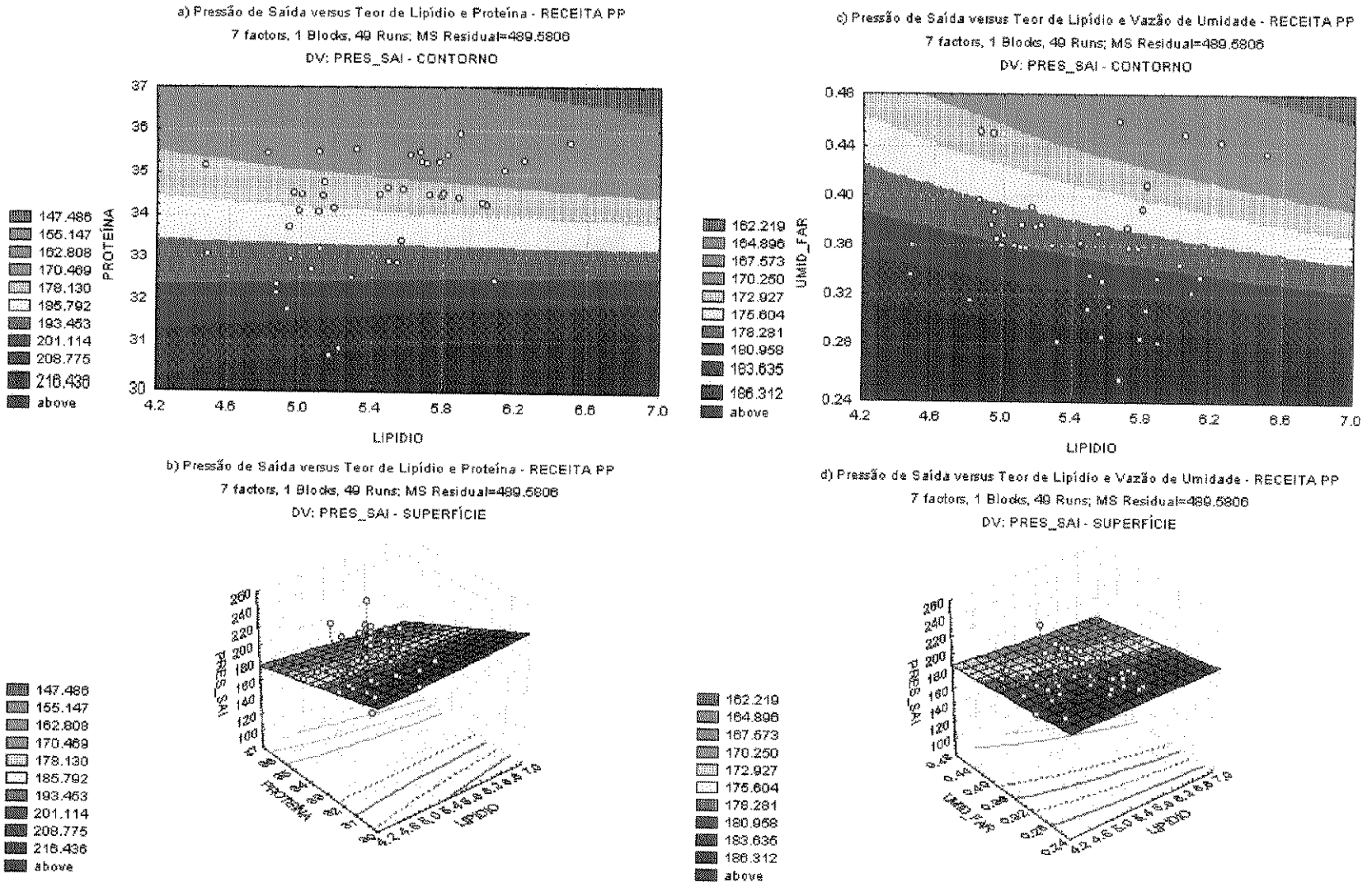


Figura 102: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Proteína e (c e d) Influência da Vazão de Lipídio e Umidade para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP.

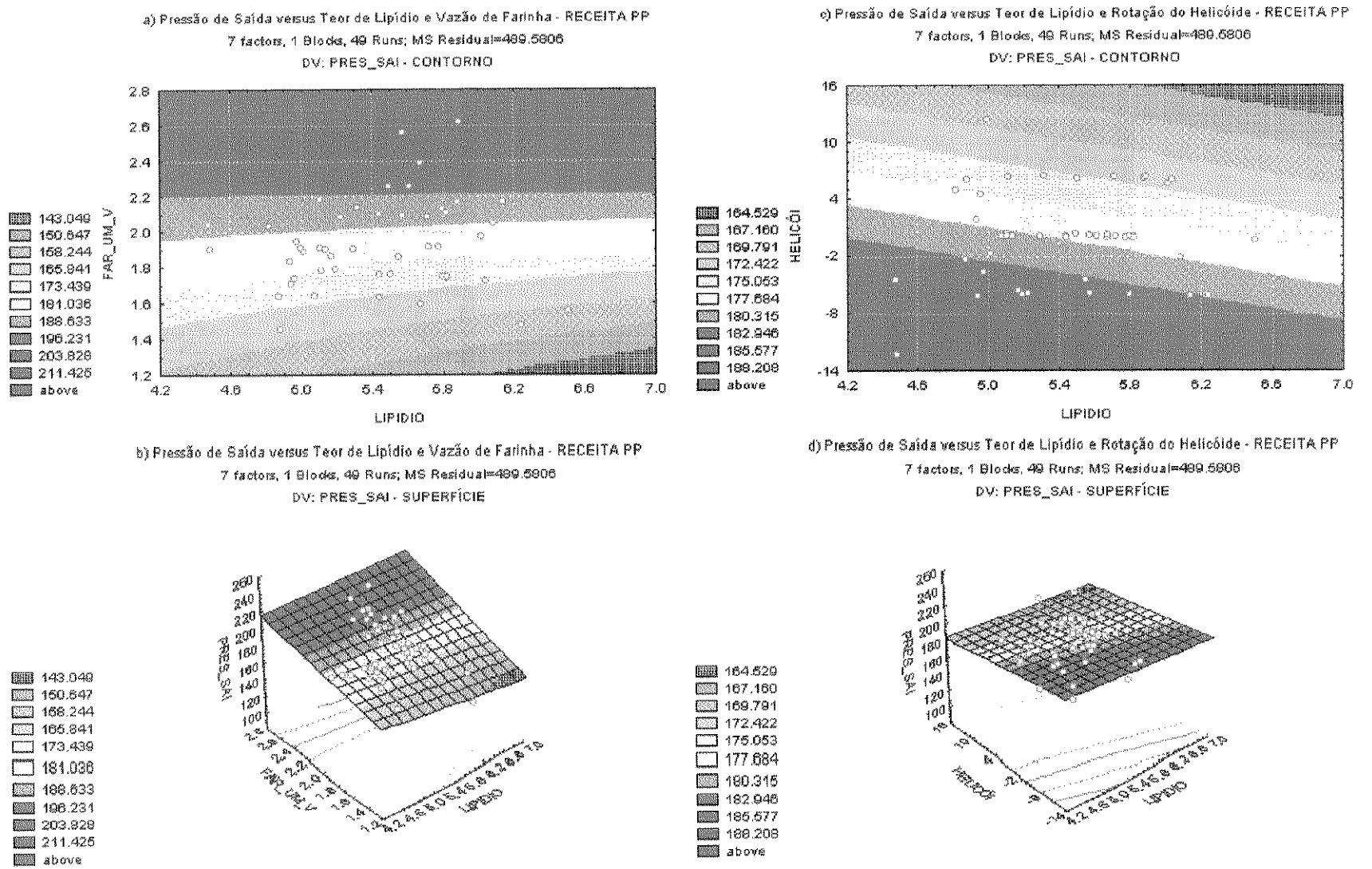


Figura 103: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Farinha e (c e d) Influência da Vazão de Lipídio e Rotação do Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP.

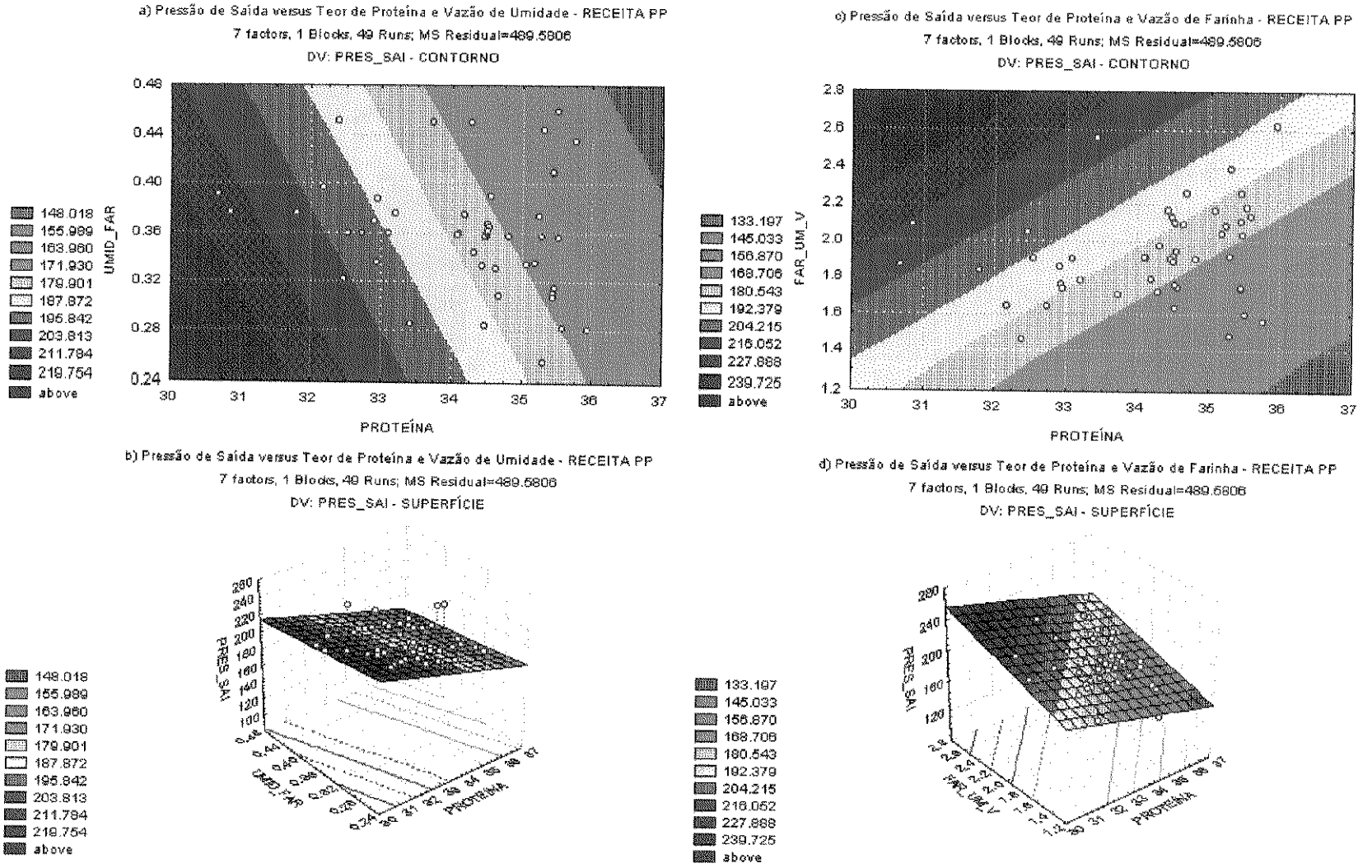


Figura 104: (a e b) Influência da Vazão de Proteína e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Proteína e Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP.

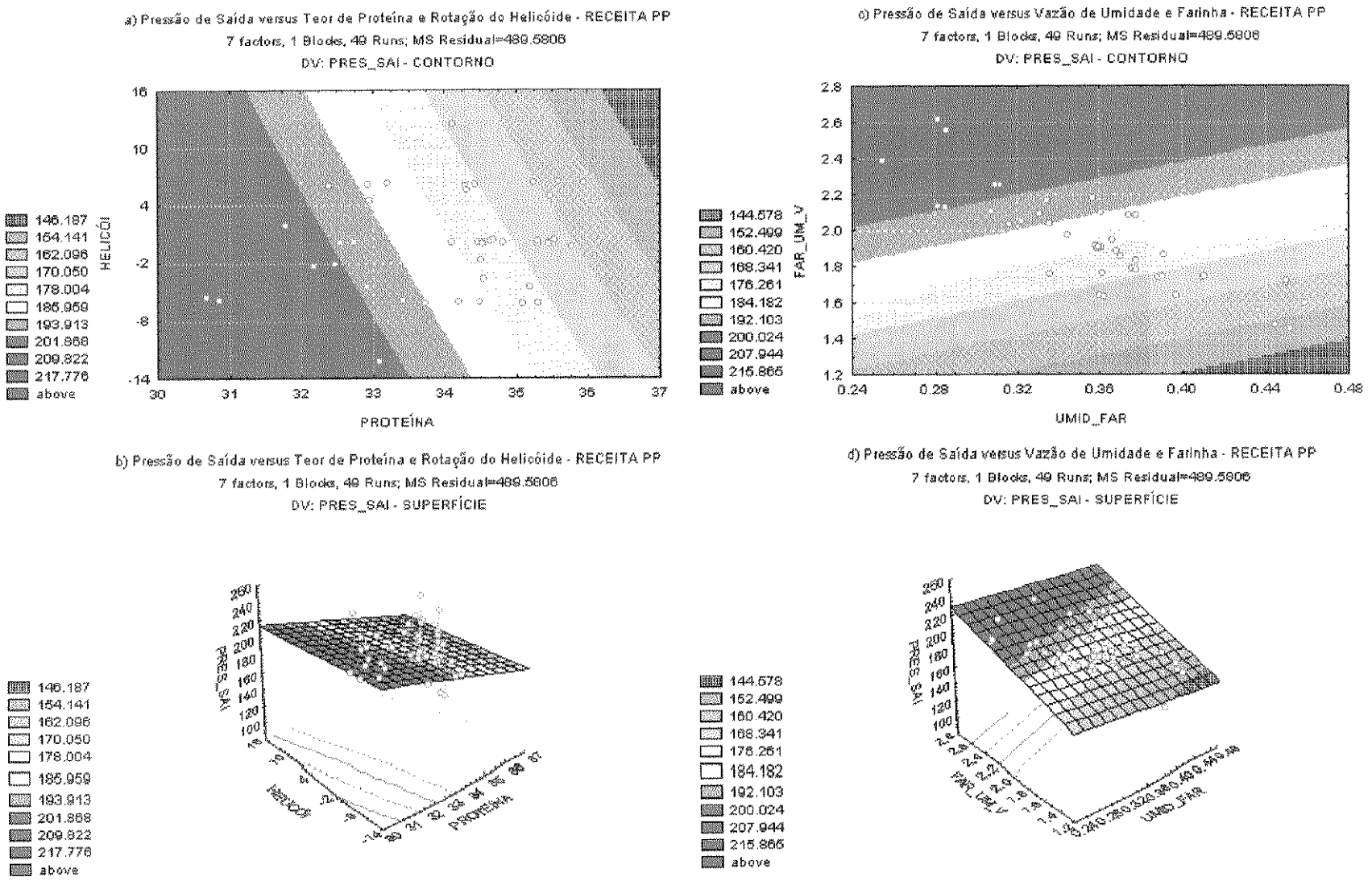


Figura 105: (a e b) Influência da Vazão de Proteína e Rotação de Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP.

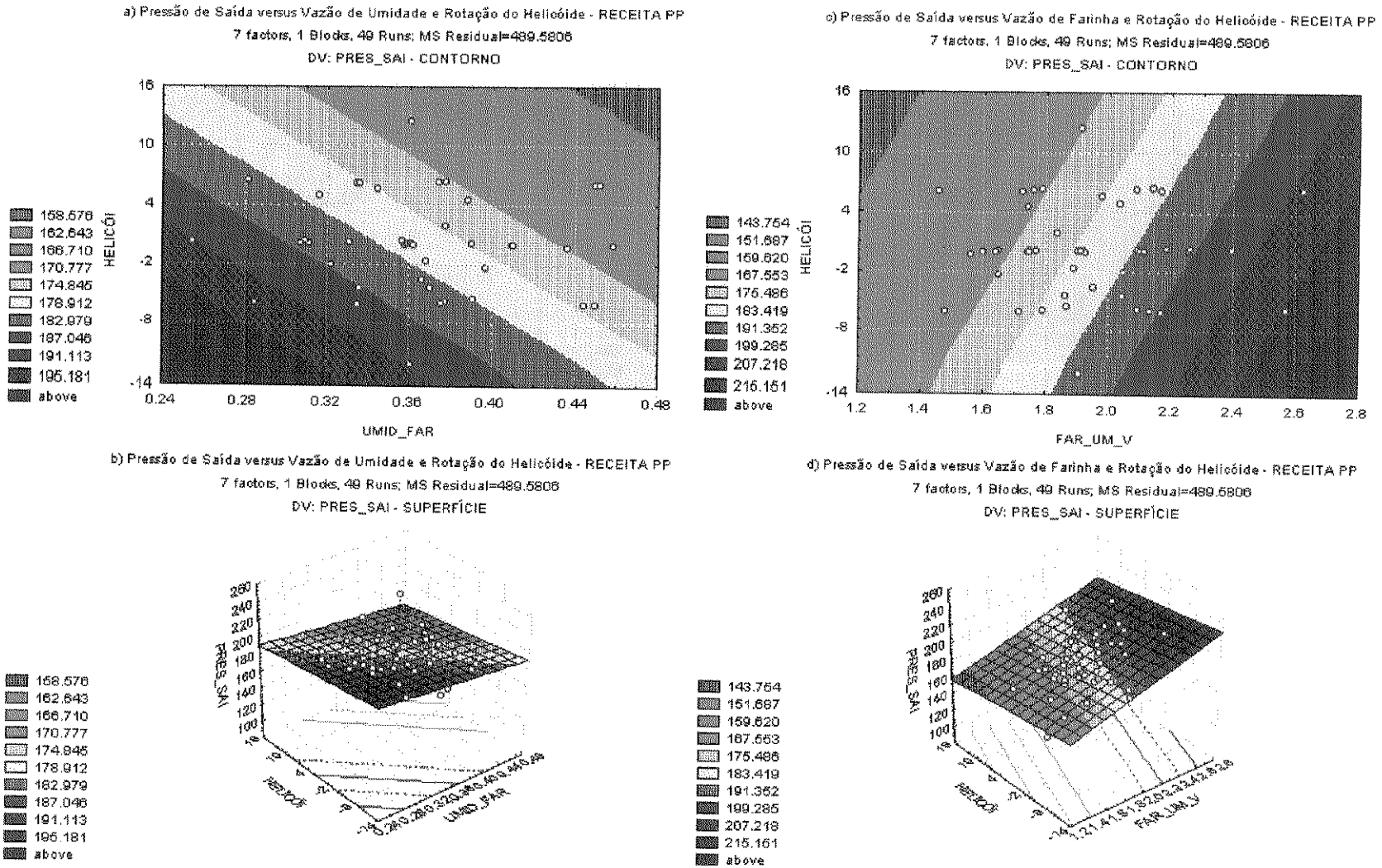


Figura 106: (a e b) Influência da Vazão de Umidade e Rotação de Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Farinha e Rotação de Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita PP.

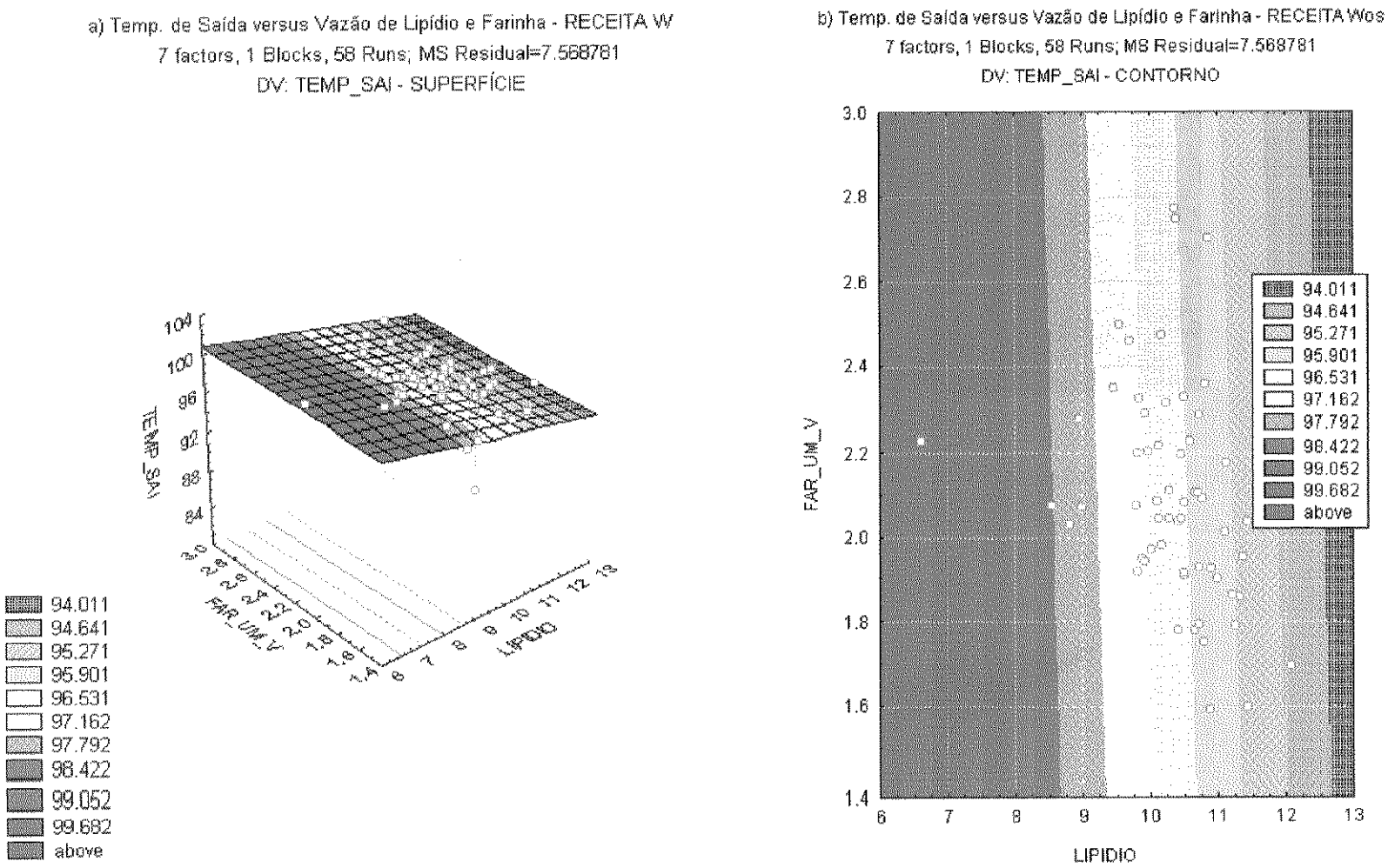


Figura 107: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Farinha para a Temperatura (^0C) de Saída na Receita Wos.

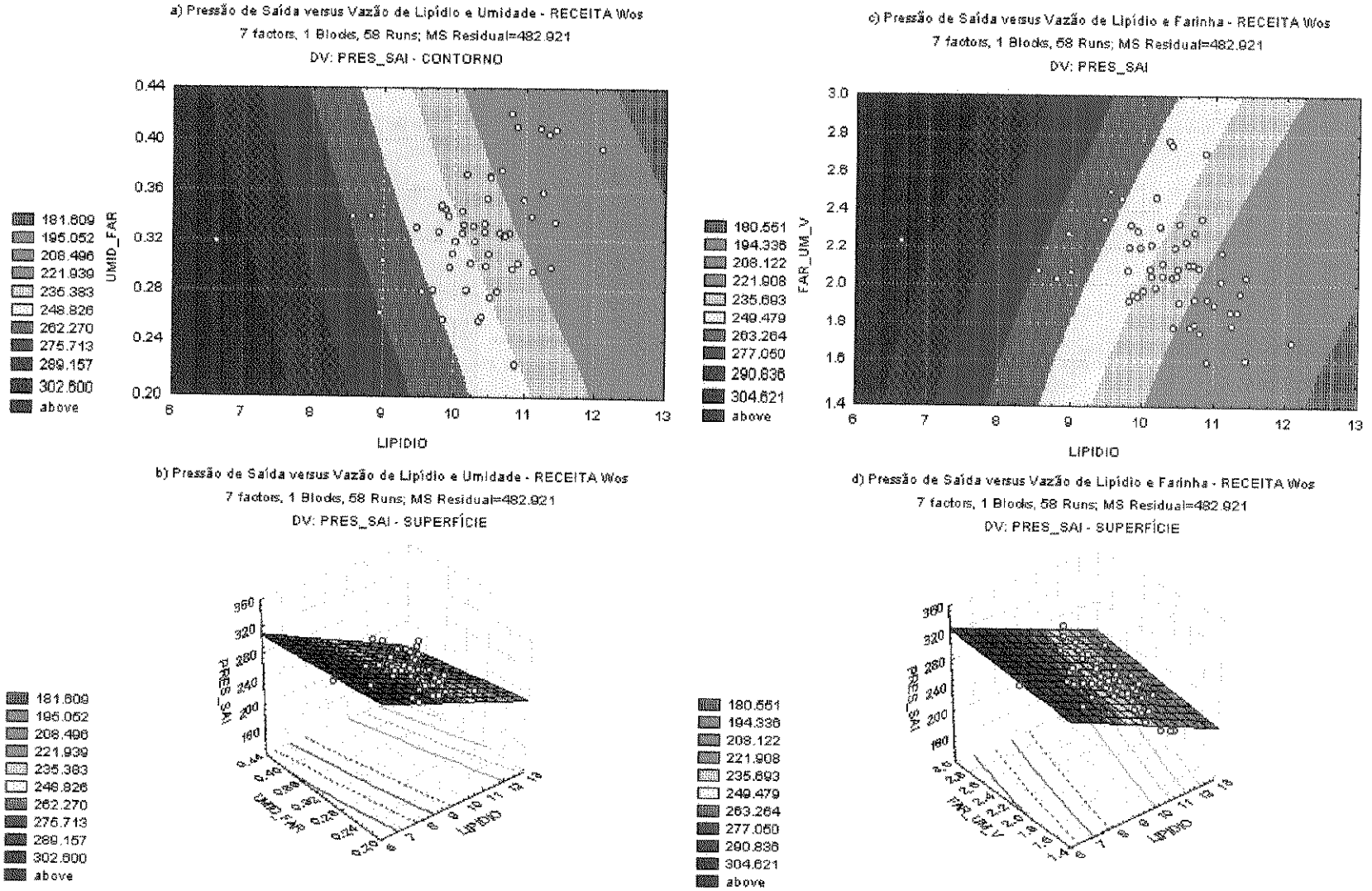


Figura 108: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Umidade e (c e d) Influência da Vazão de Lipídio e Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita Wos.

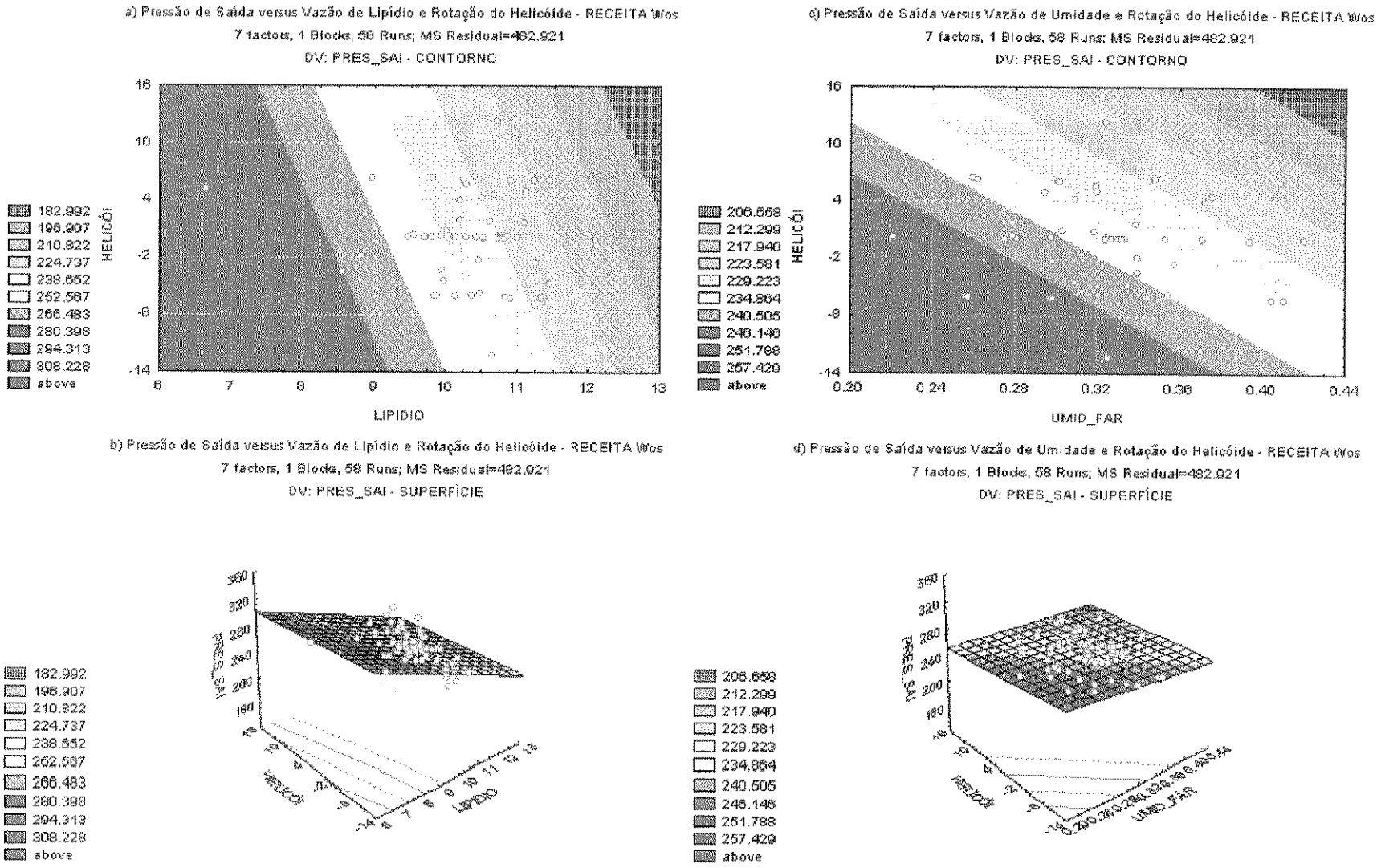
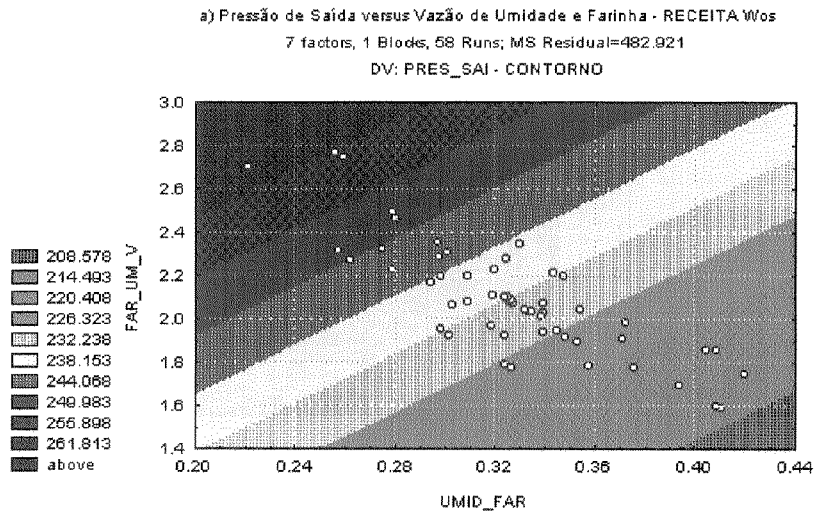
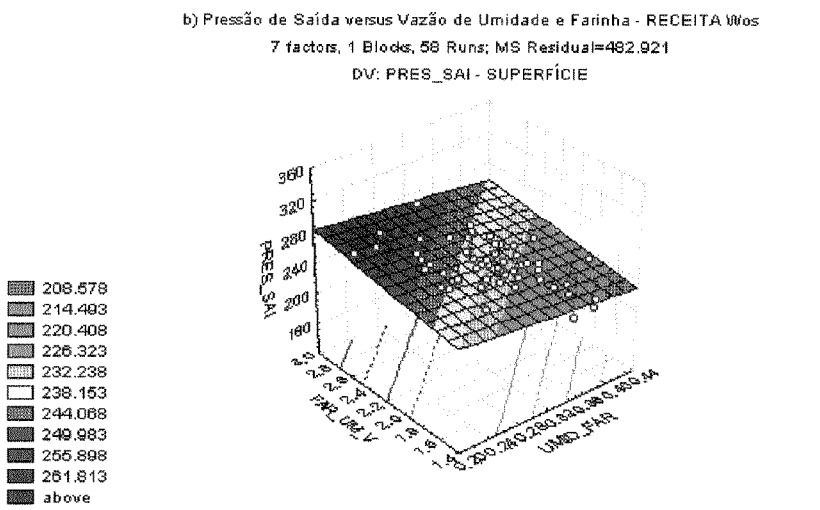
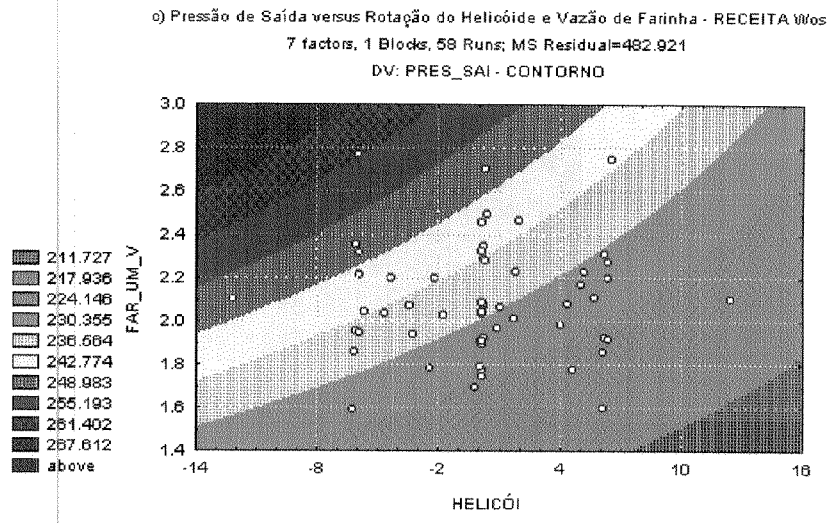


Figura 109: (a e b) Influência da Vazão de Lipídio e Rotação de Helicóide e (c e d) Influência da Vazão de Umidade e Rotação de Helicóide para a Pressão (psi) de Saída na Receita Wos.







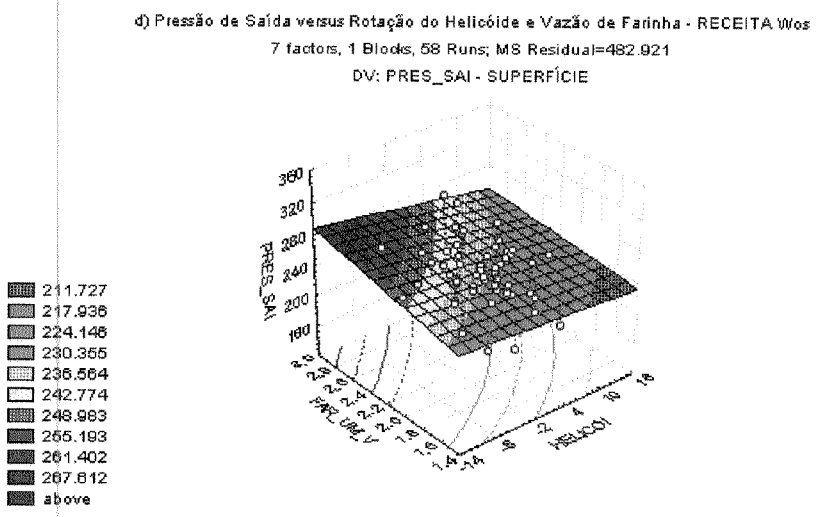


Figura 110: (a e b) Influência da Vazão Umidade e Farinha e (c e d) Influência da Rotação de Helicóide e Vazão de Farinha para a Pressão (psi) de Saída na Receita Wos.

XIII) ANEXO VII

O Anexo VII mostra as figuras com o comportamento de Temperatura e Pressão ao longo do extrusor.

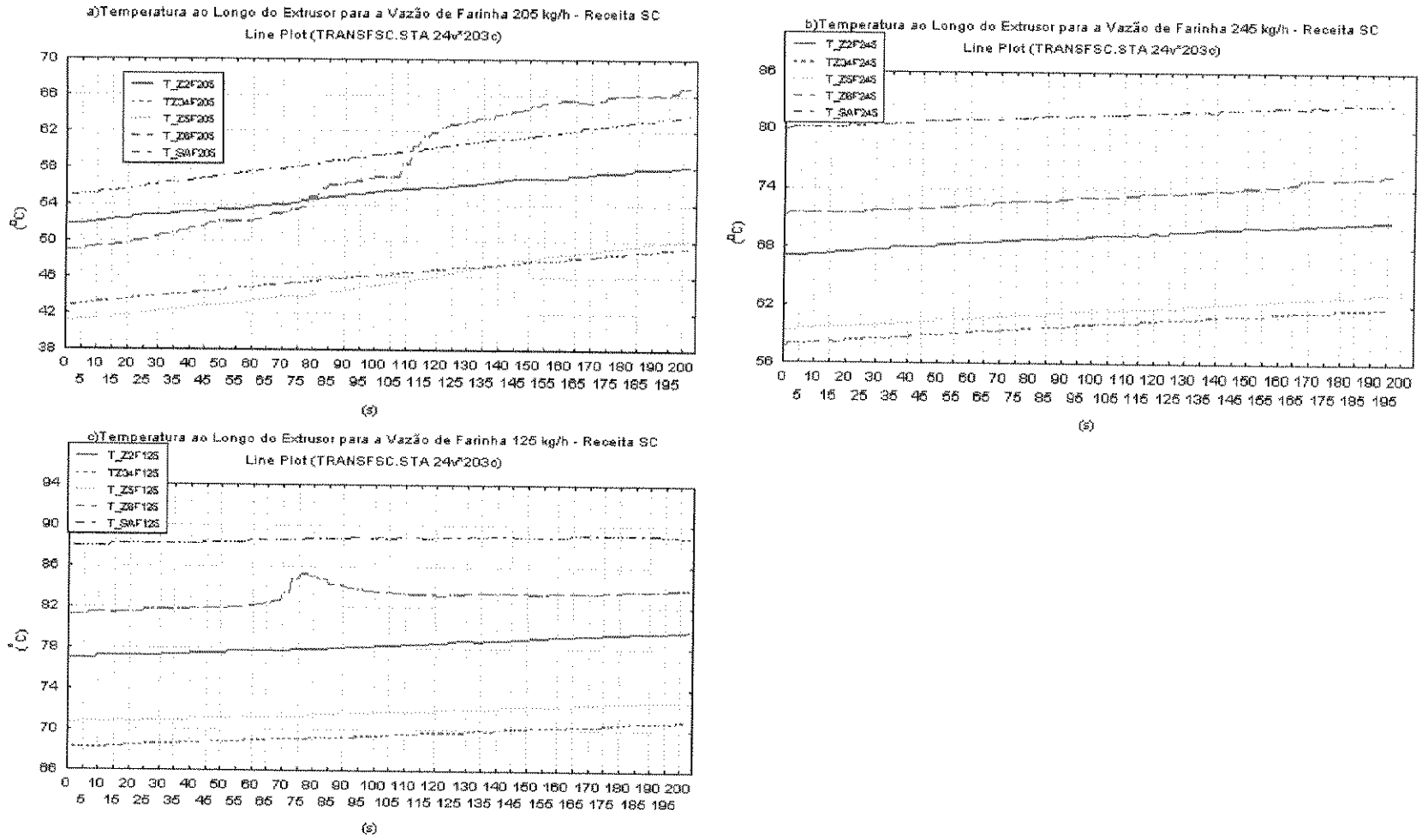


Figura 111: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 205 kg/h , (b) 245 kg/h e (c) 125 kg/h para a Receita SC.

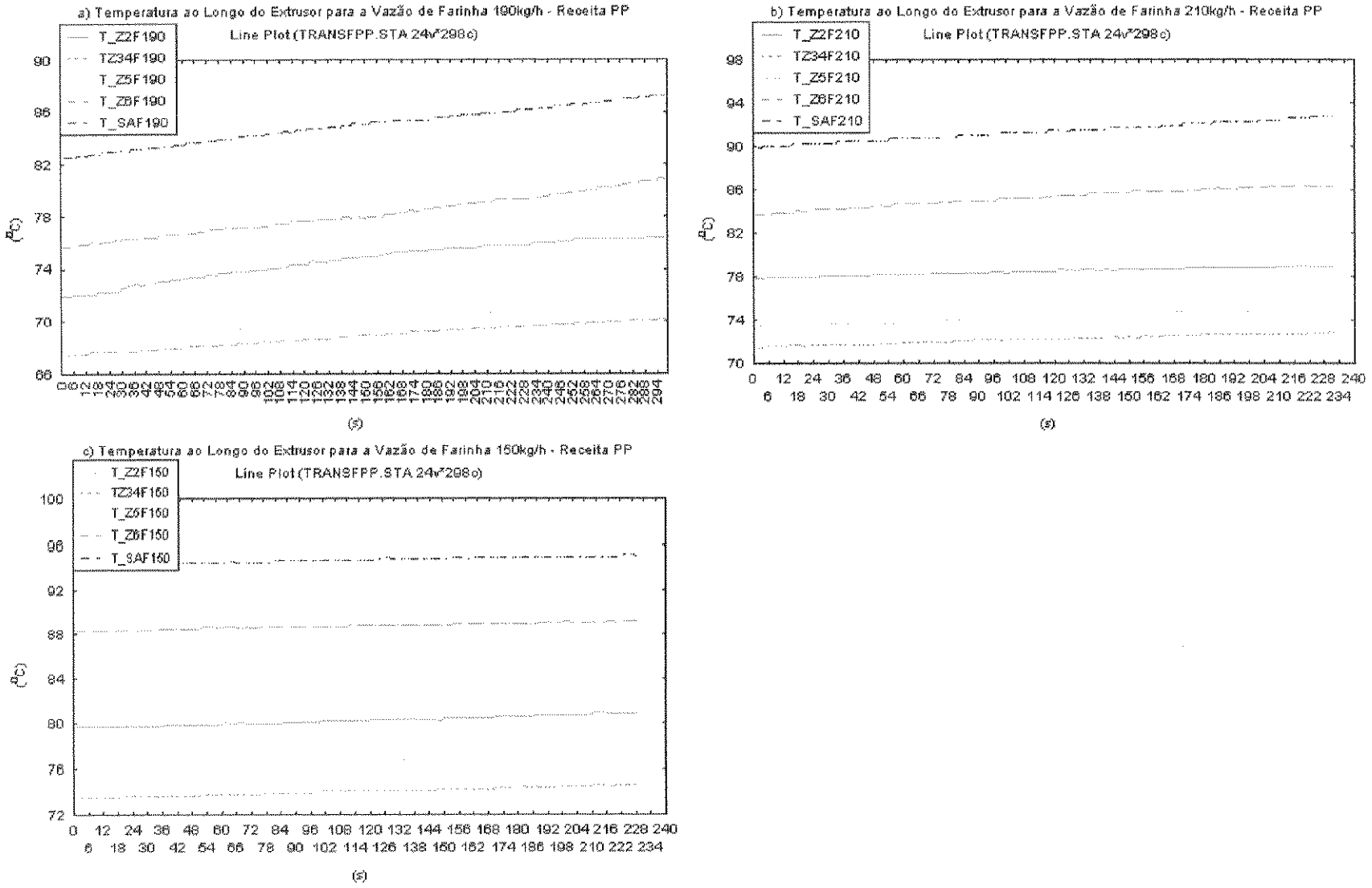


Figura 112: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita PP.

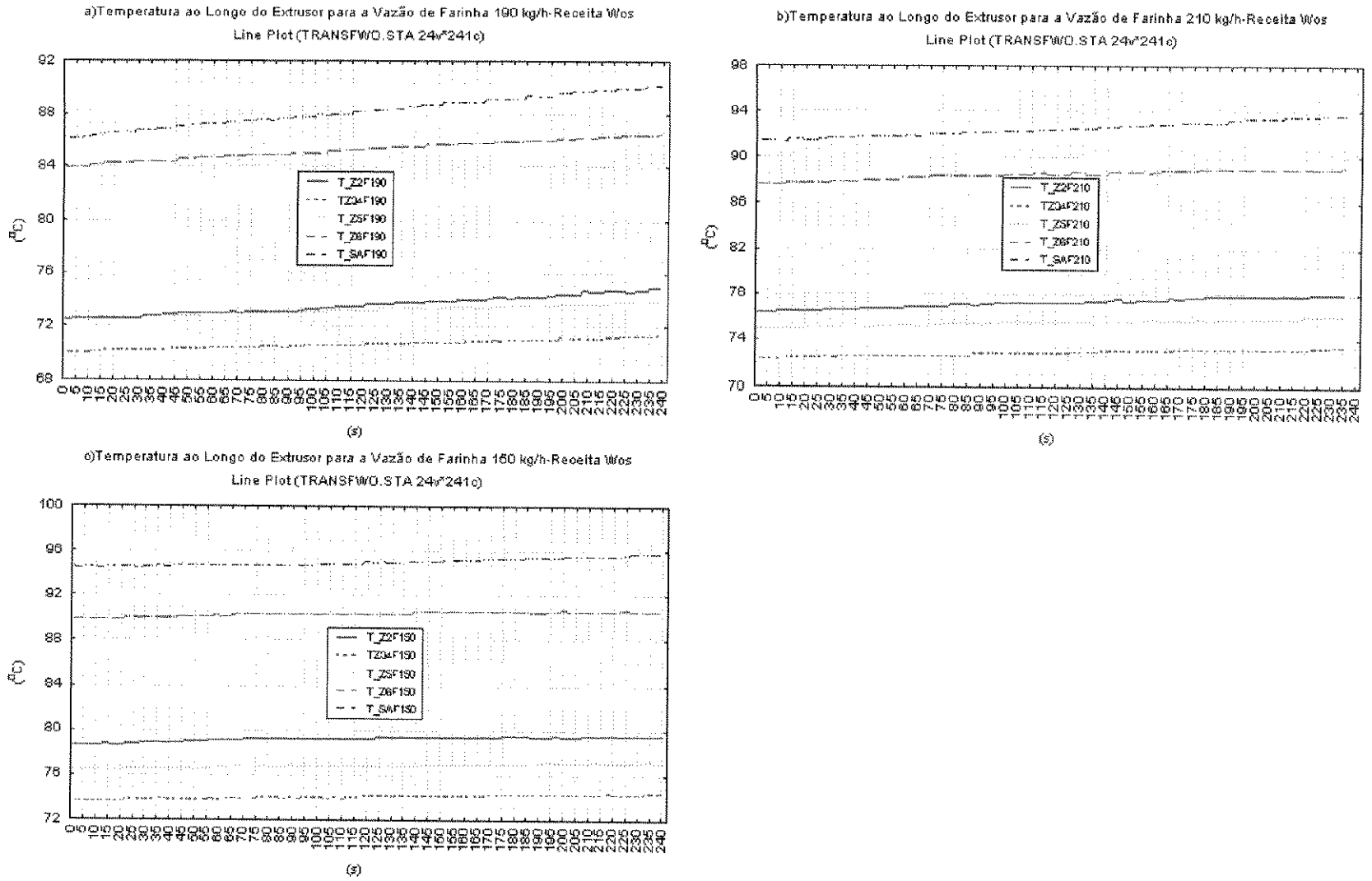


Figura 113: Temperatura (^0C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita Wos.

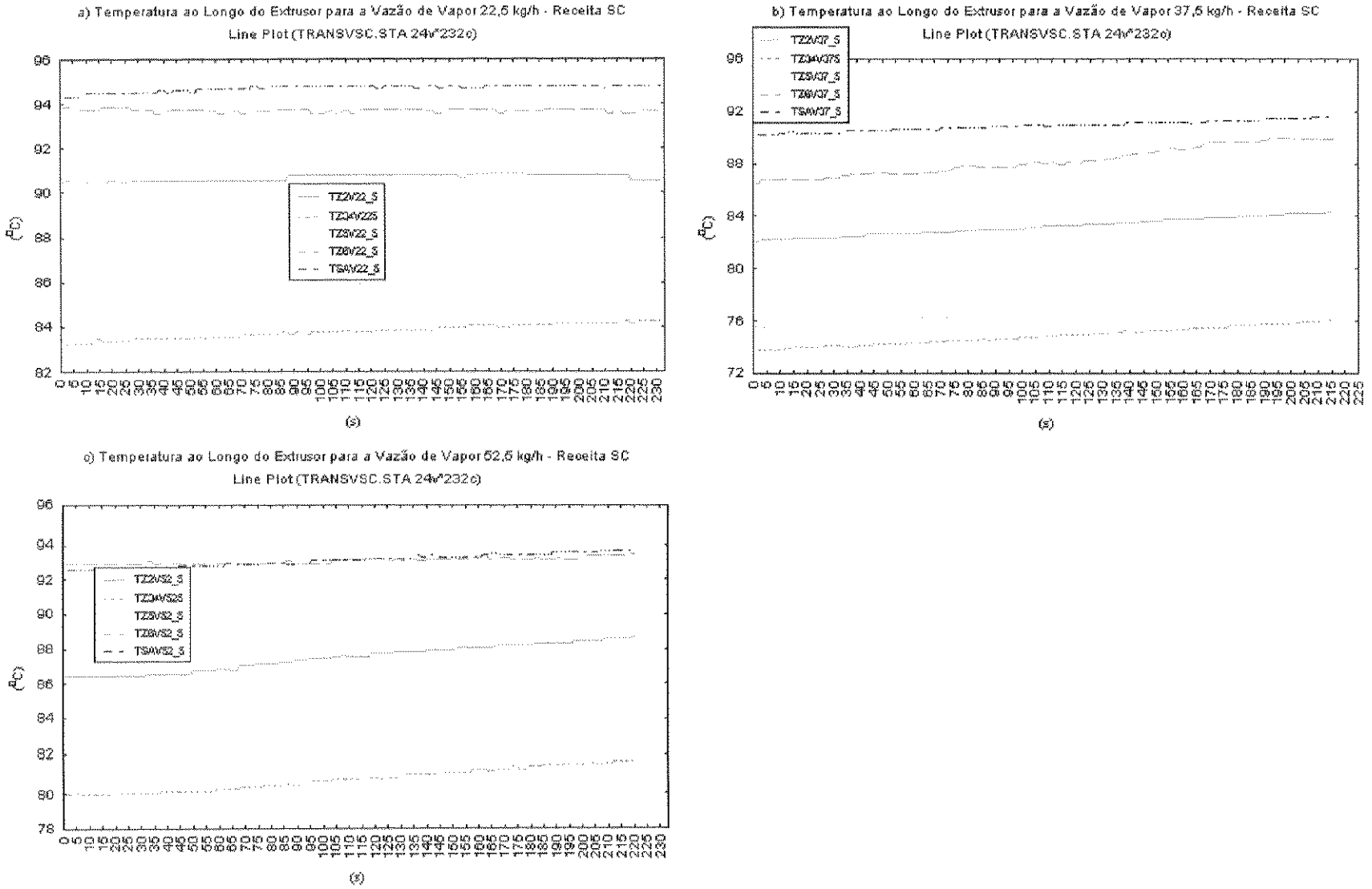


Figura 114: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 22,5 kg/h , (b) 37,5 kg/h e (c) 52,5 kg/h para a Receita SC.

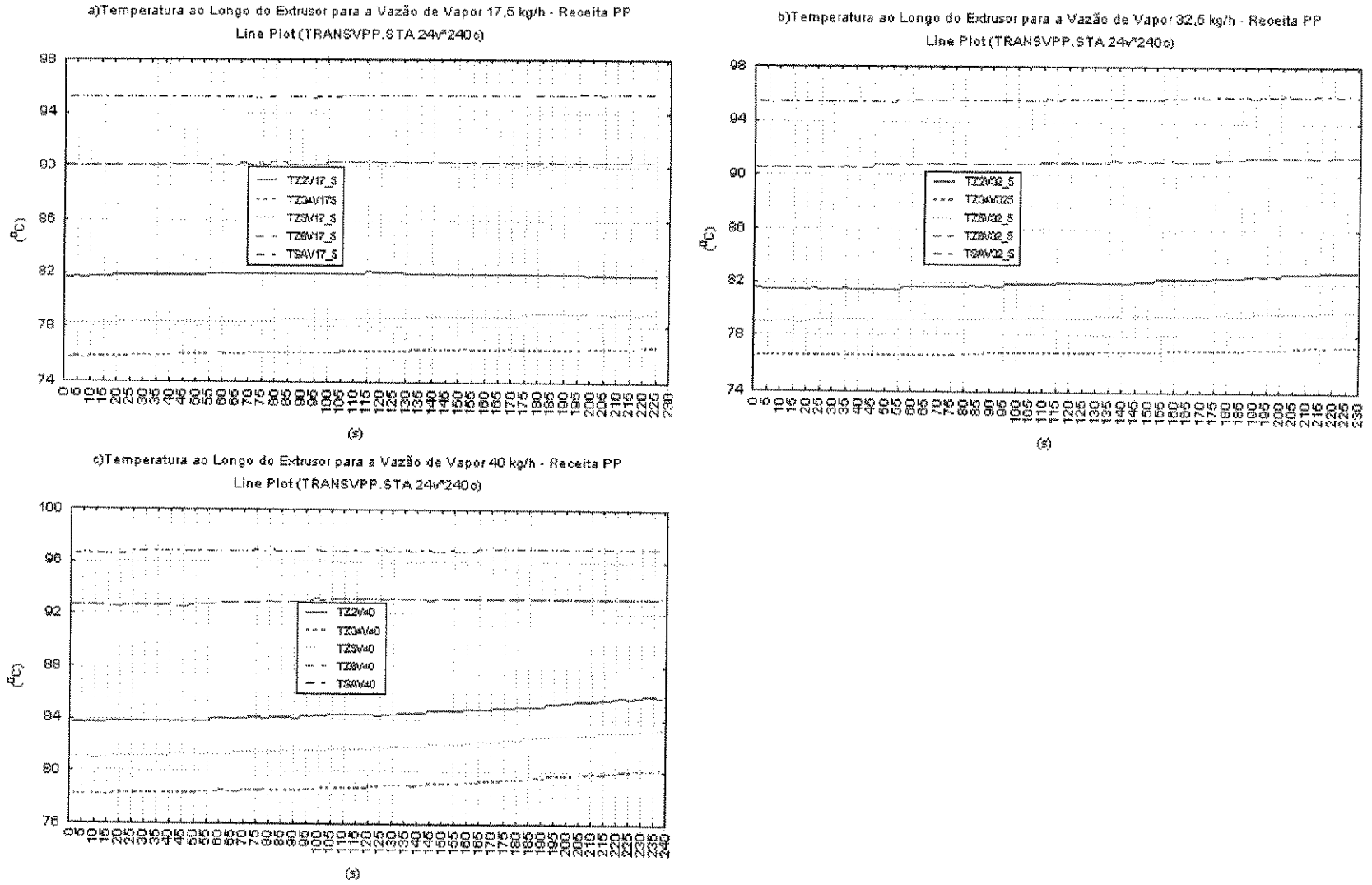


Figura 115: Temperatura (^0C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita PP.

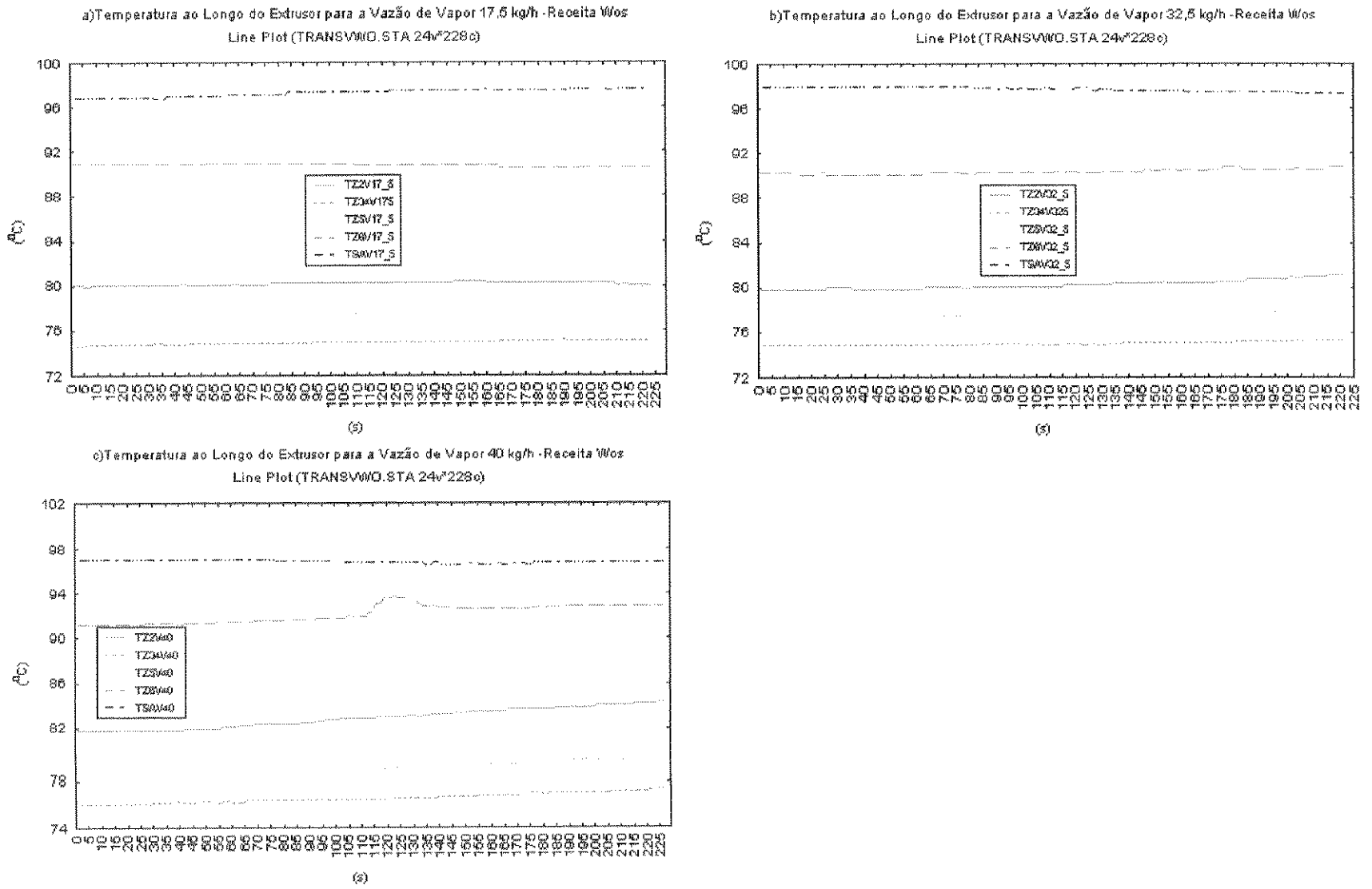


Figura 116: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita Wos.

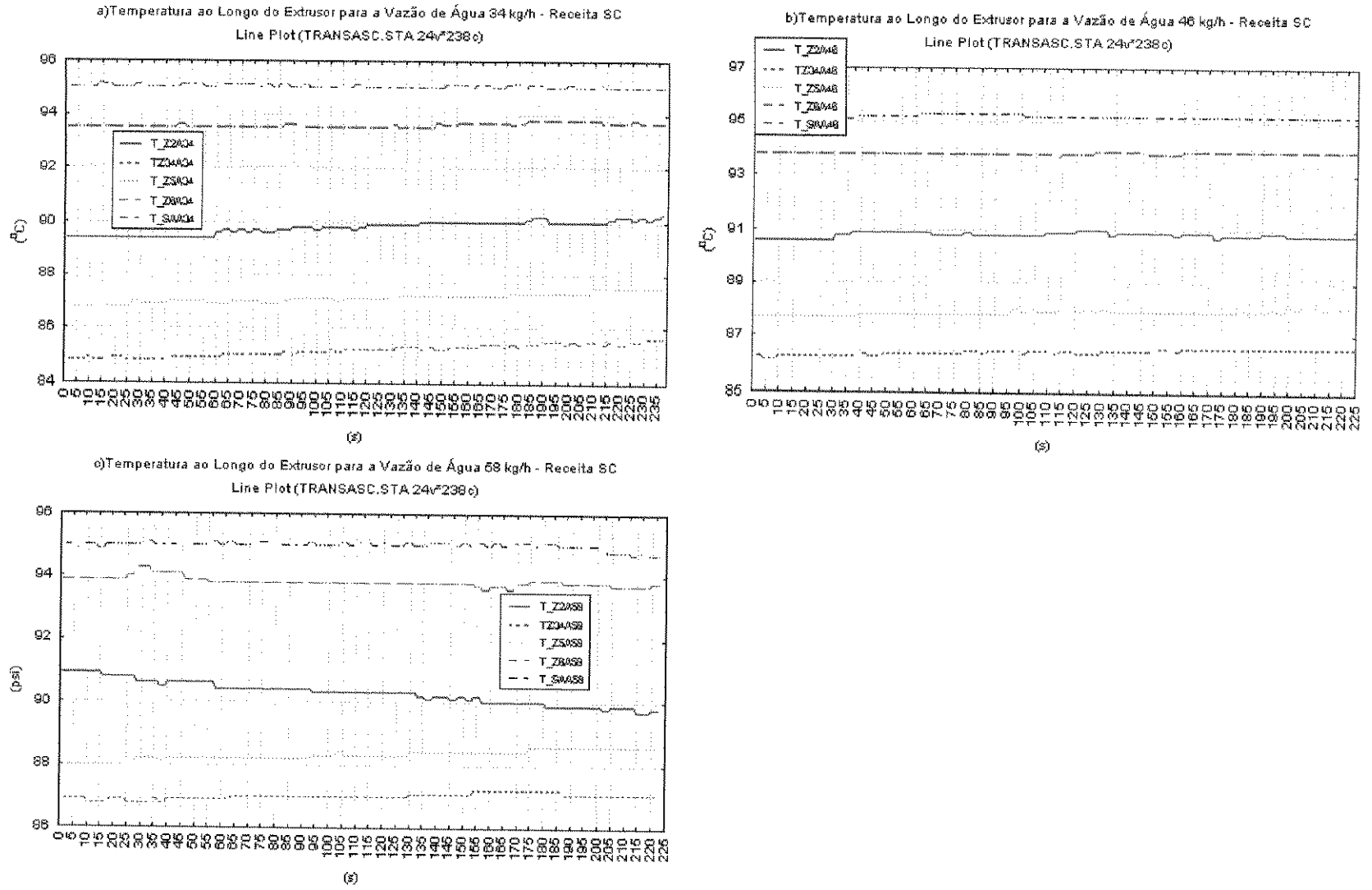


Figura 117: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 34 kg/h , (b) 46 kg/h e (c) 58 kg/h para a Receita SC.

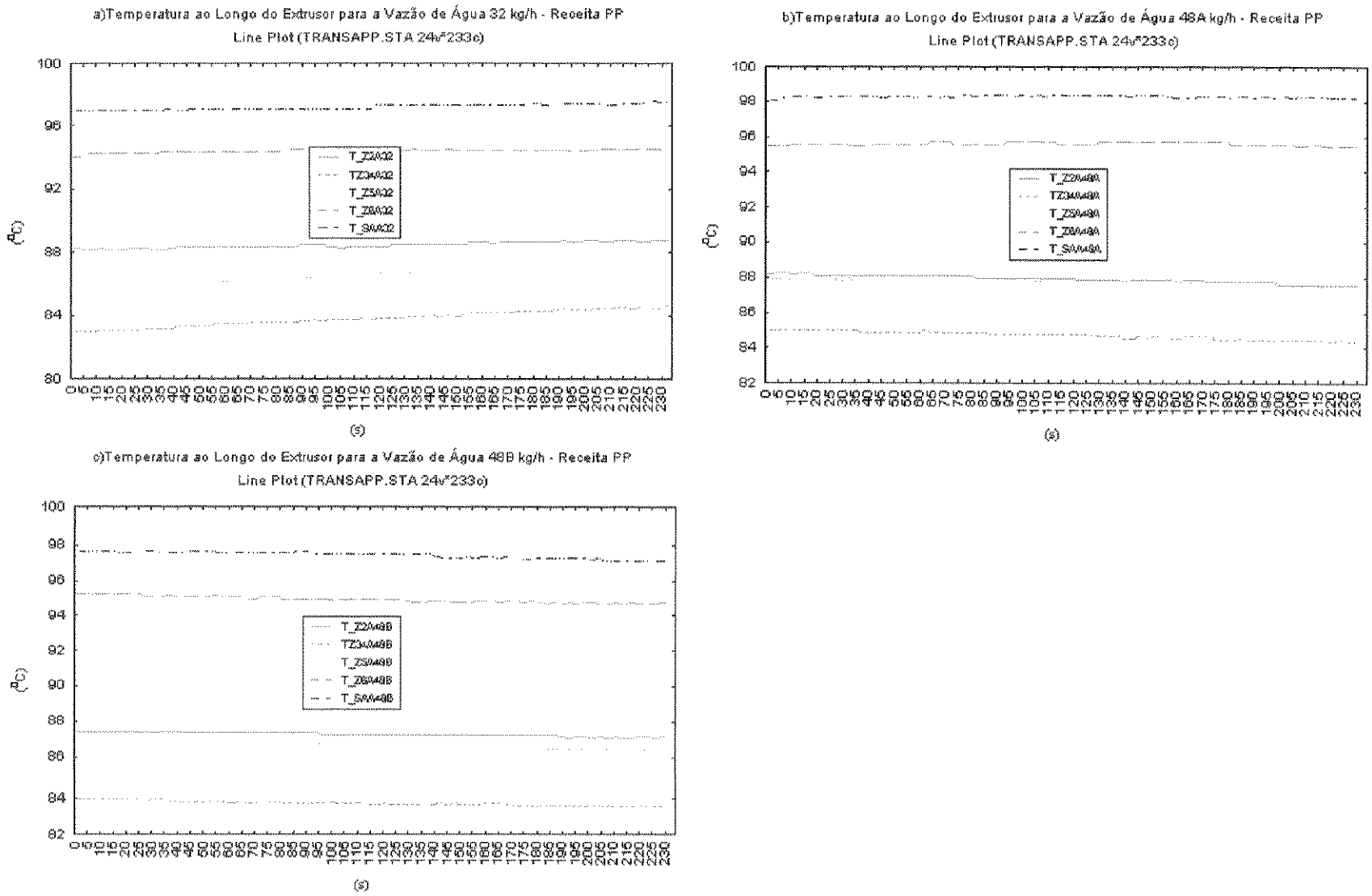


Figura 118: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita PP.

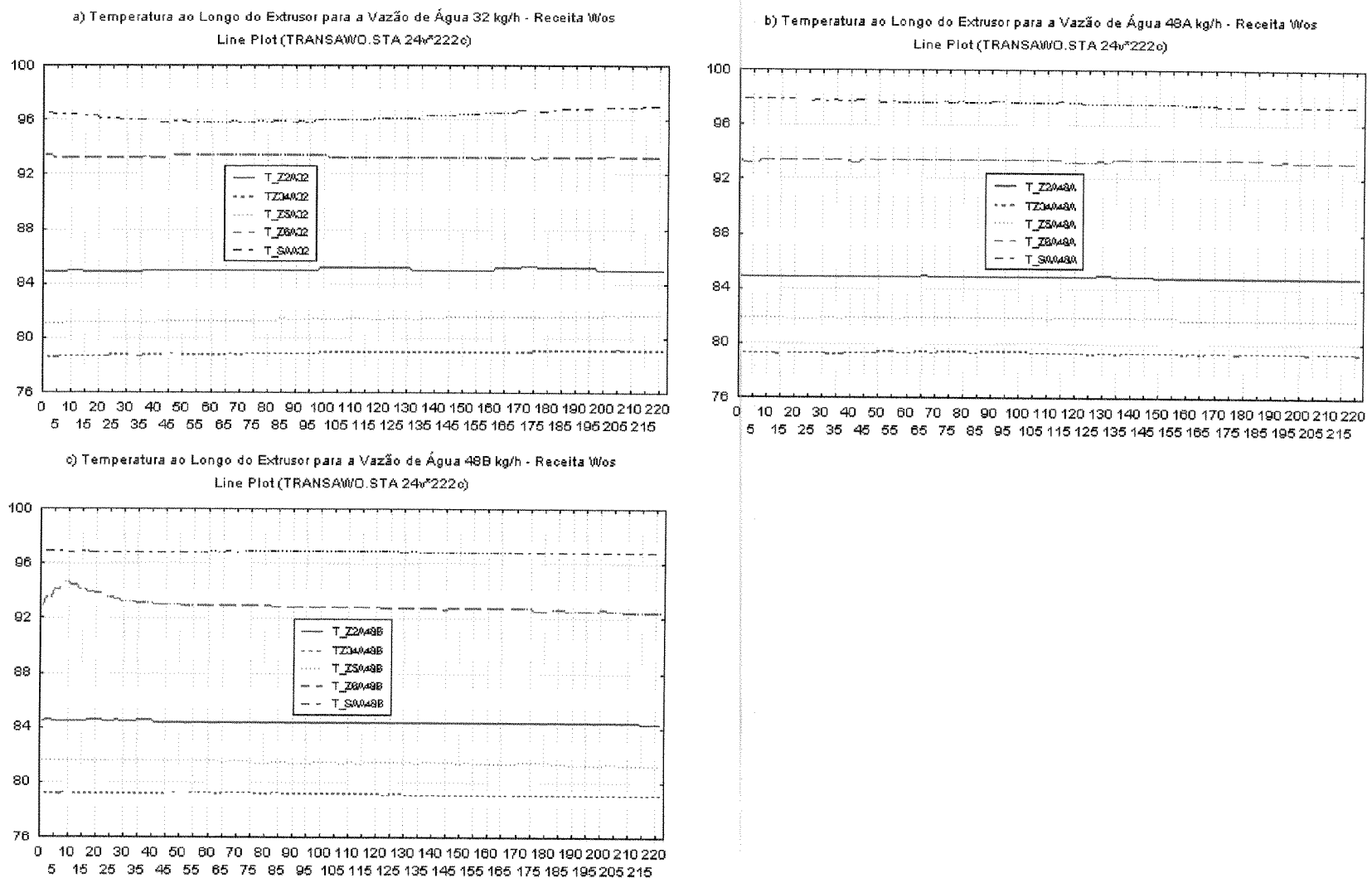


Figura 119: Temperatura (^{0}C) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita Wos.

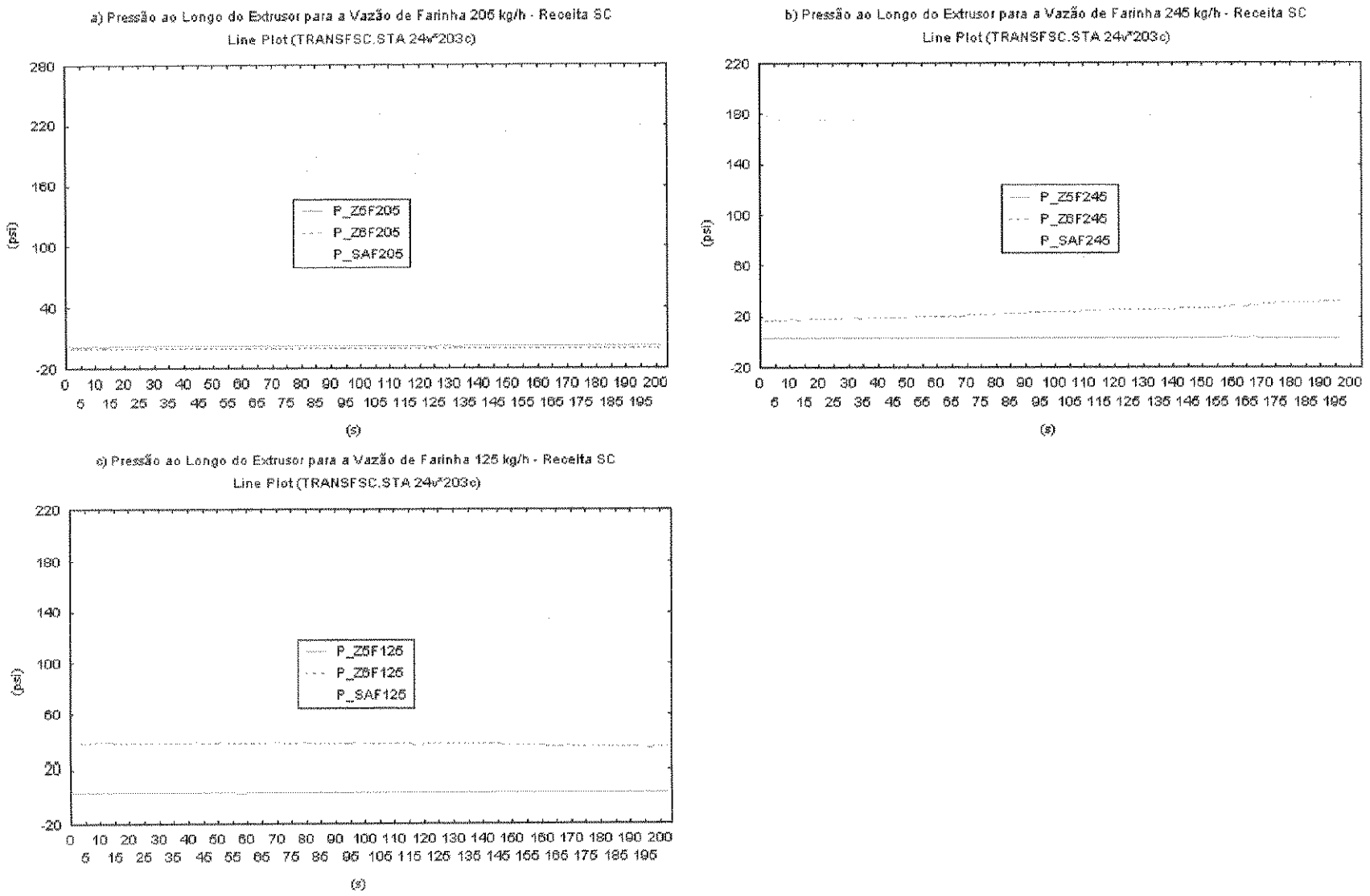


Figura 120: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 205 kg/h , (b) 245 kg/h e (c) 125 kg/h para a Receita SC.

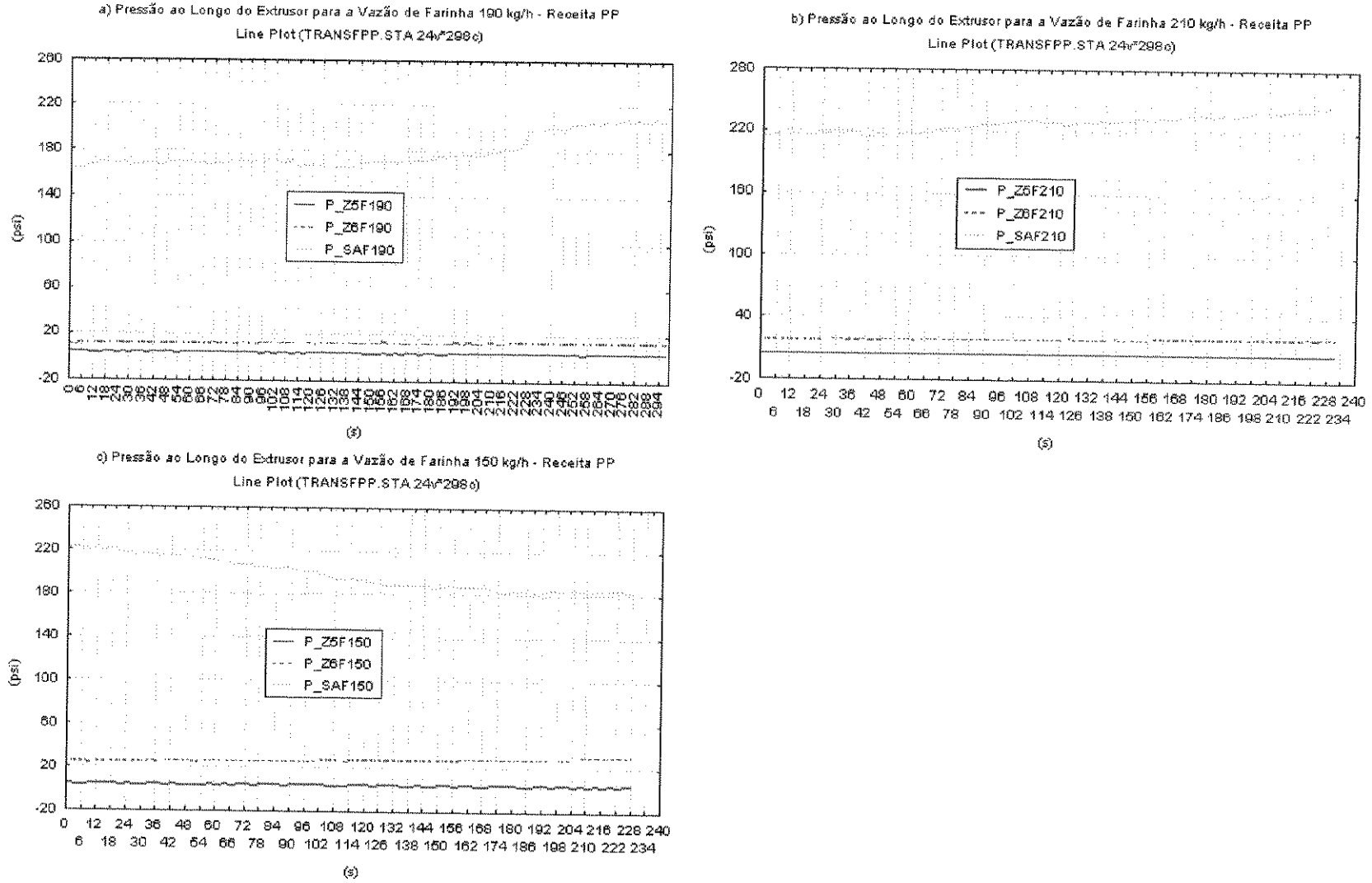


Figura 121: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita PP.

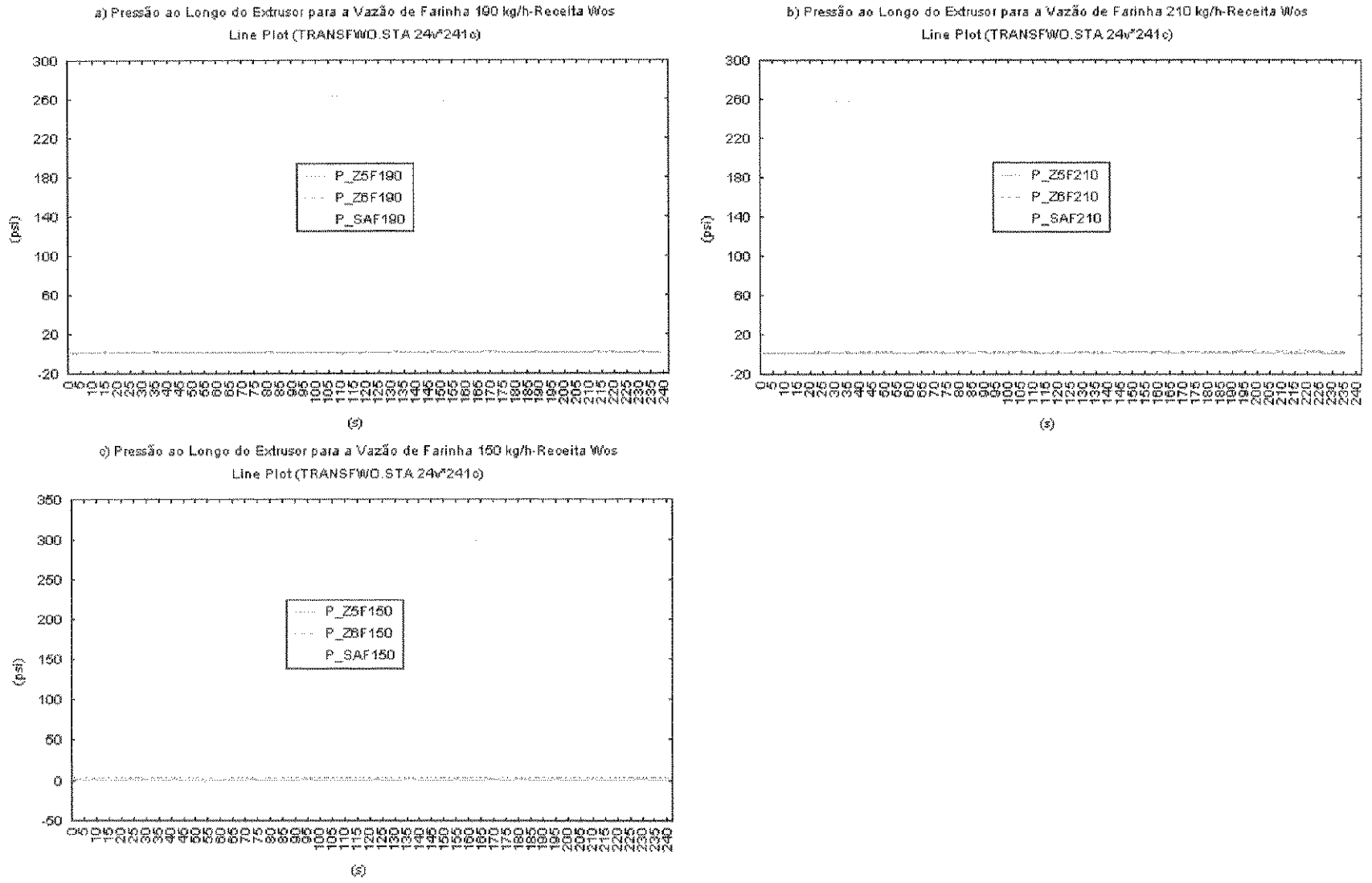


Figura 122: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Farinha a (a) 190 kg/h , (b) 210 kg/h e (c) 150 kg/h para a Receita Wos.

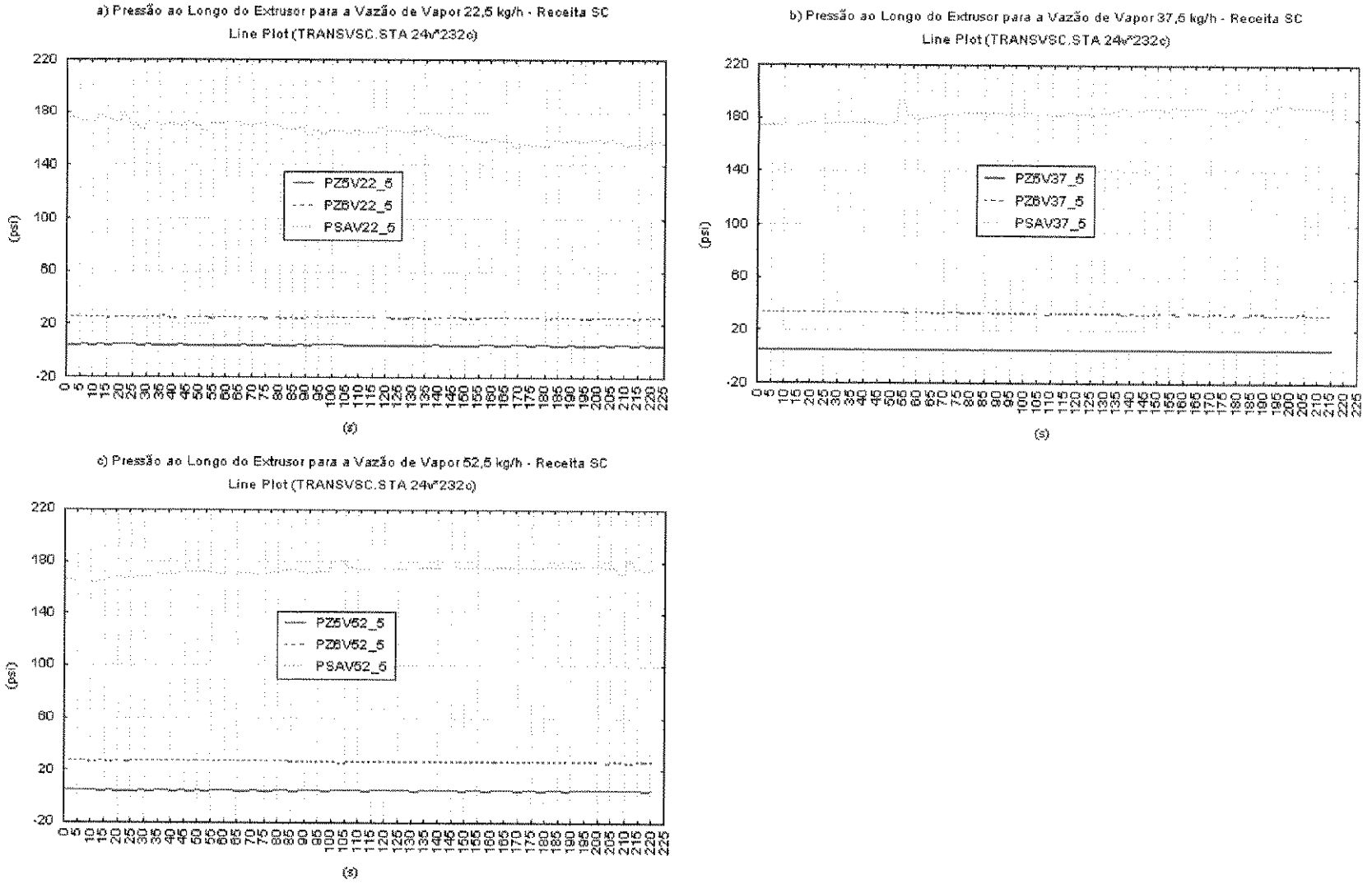


Figura 123: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 22,5 kg/h , (b) 37,5 kg/h e (c) 52,5 kg/h para a Receita SC.

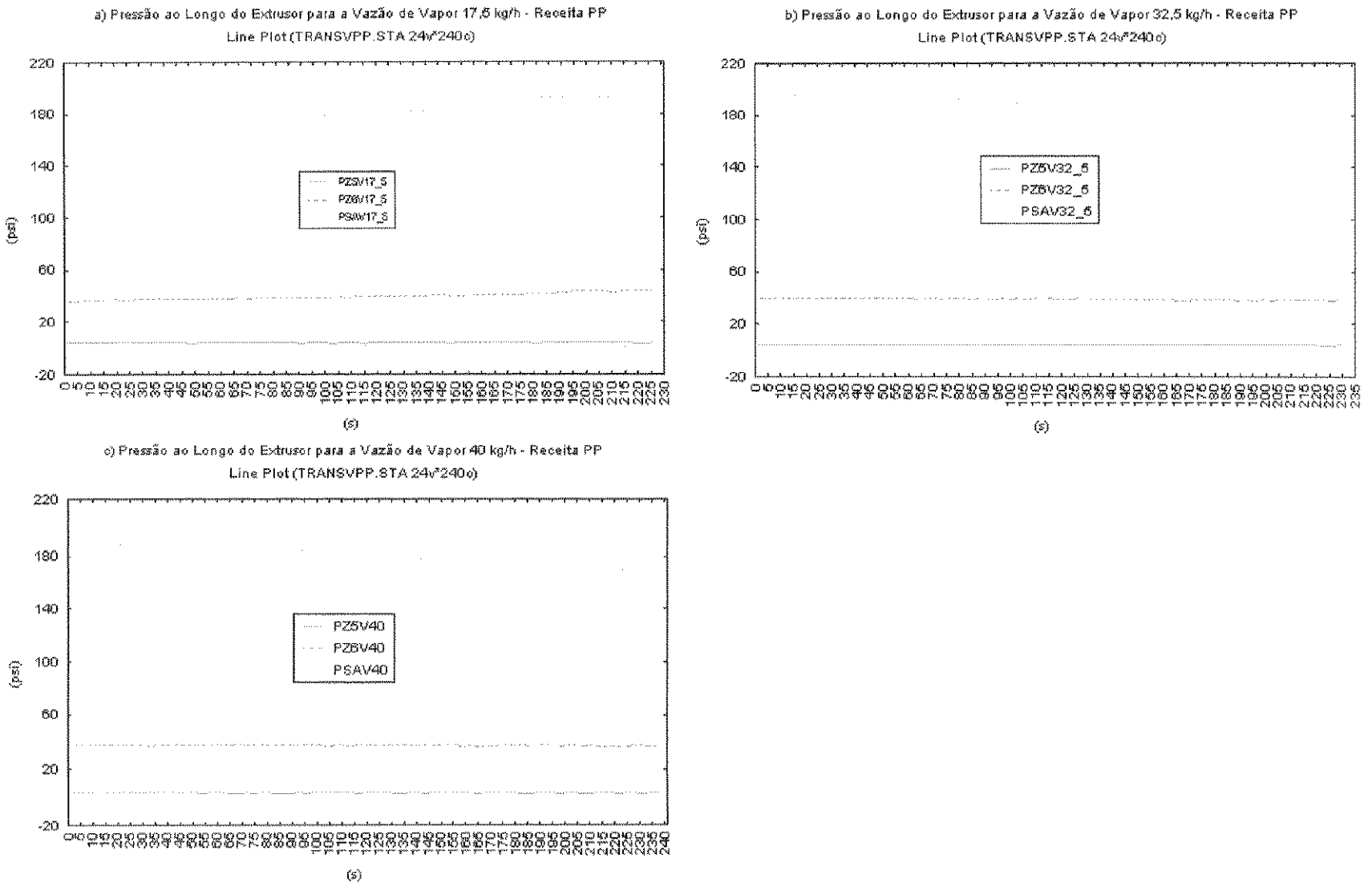


Figura 124: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita PP.

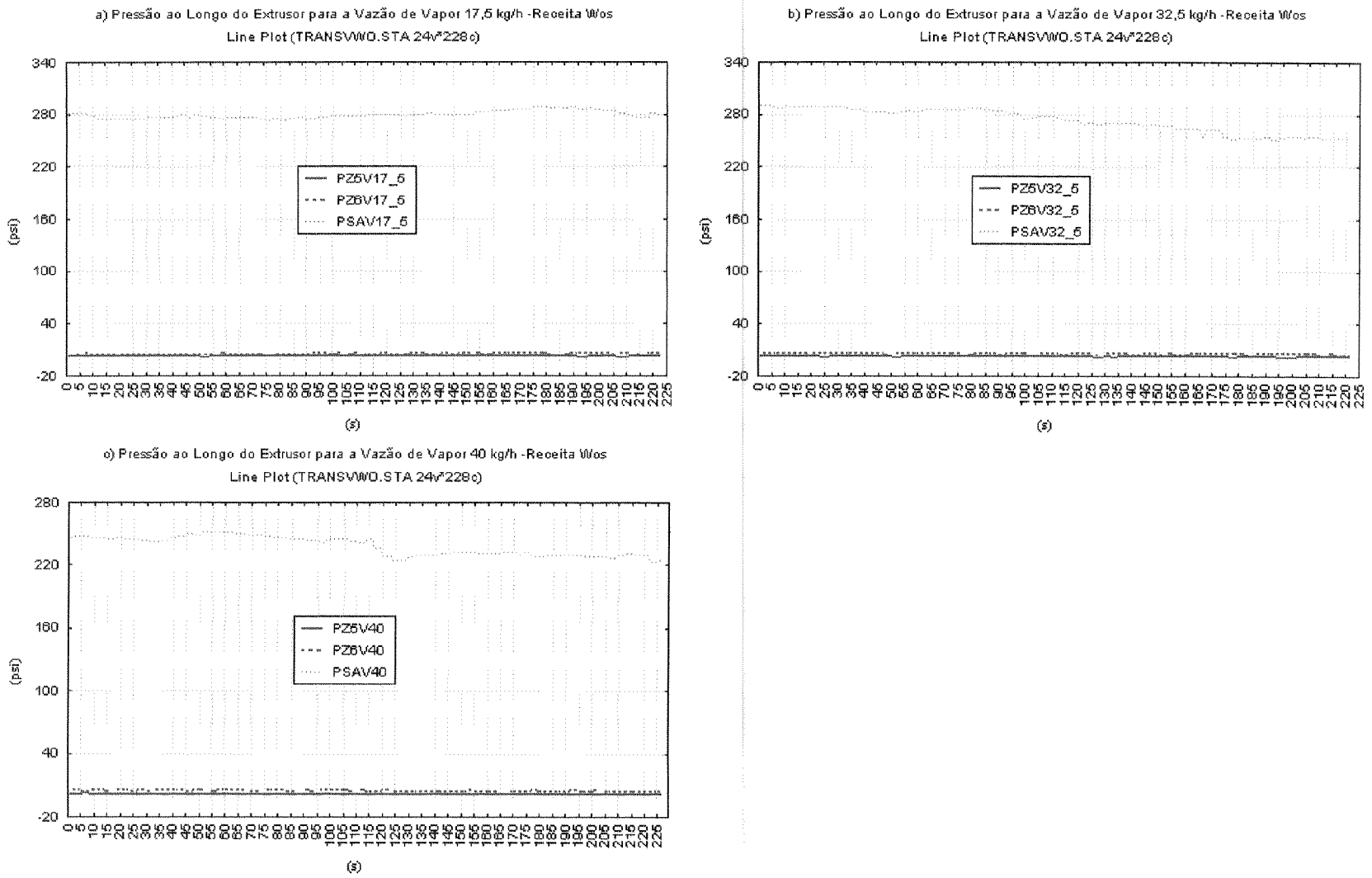


Figura 125: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Vapor a (a) 17,5 kg/h , (b) 32,5 kg/h e (c) 40 kg/h para a Receita Wos.

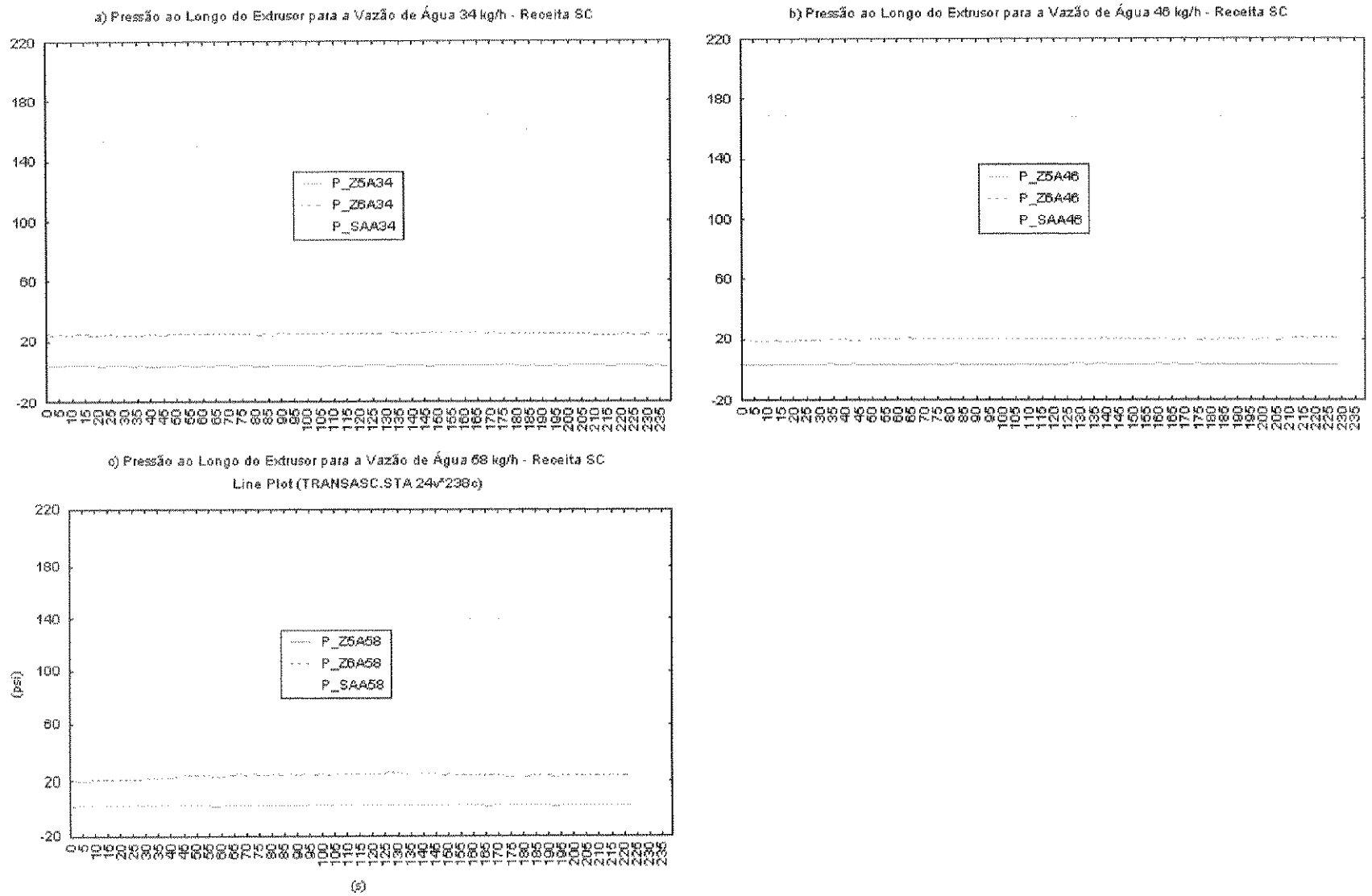


Figura 126: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 34 kg/h , (b) 46 kg/h e (c) 58 kg/h para a Receita SC.

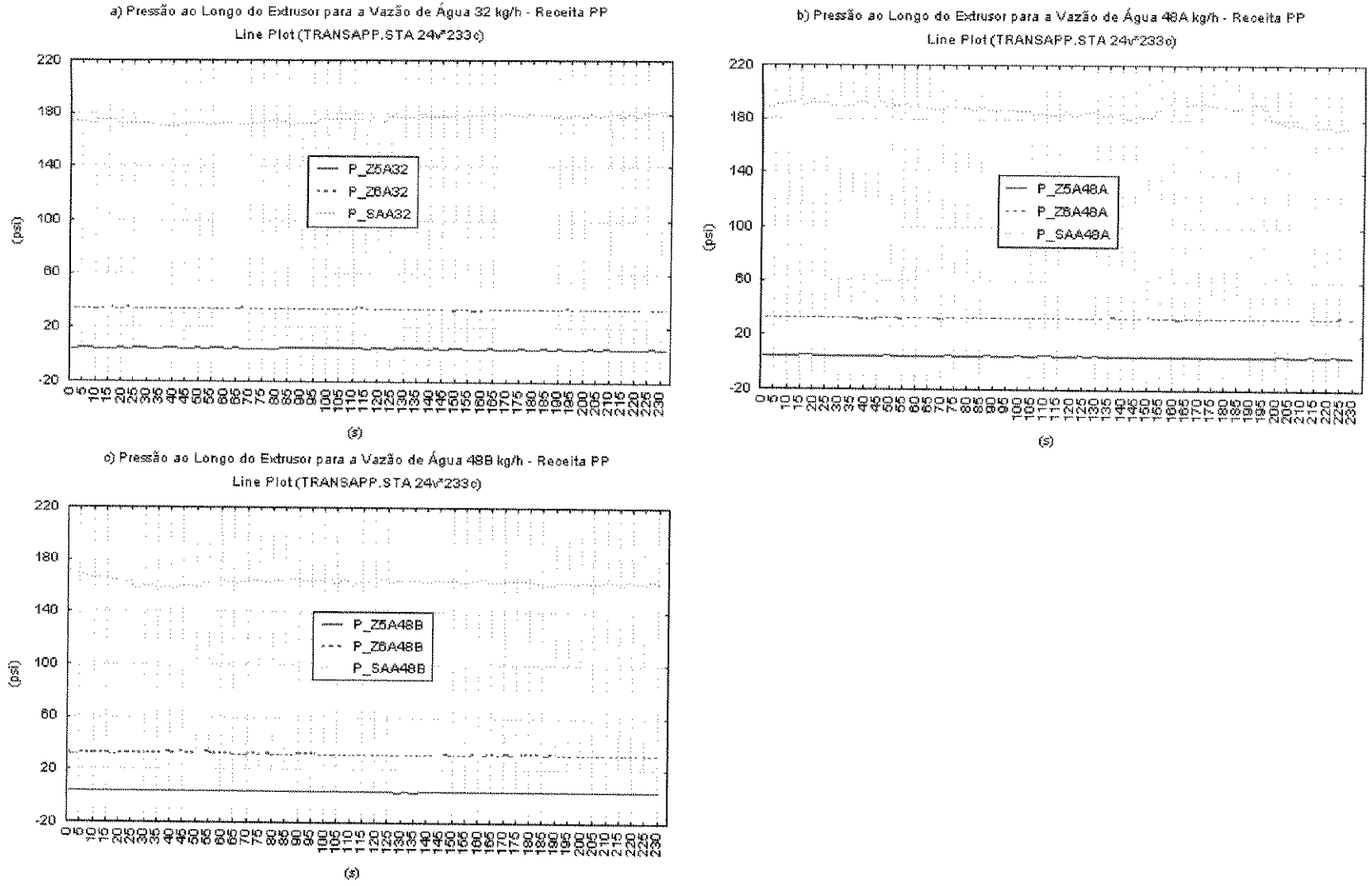


Figura 127: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita PP.

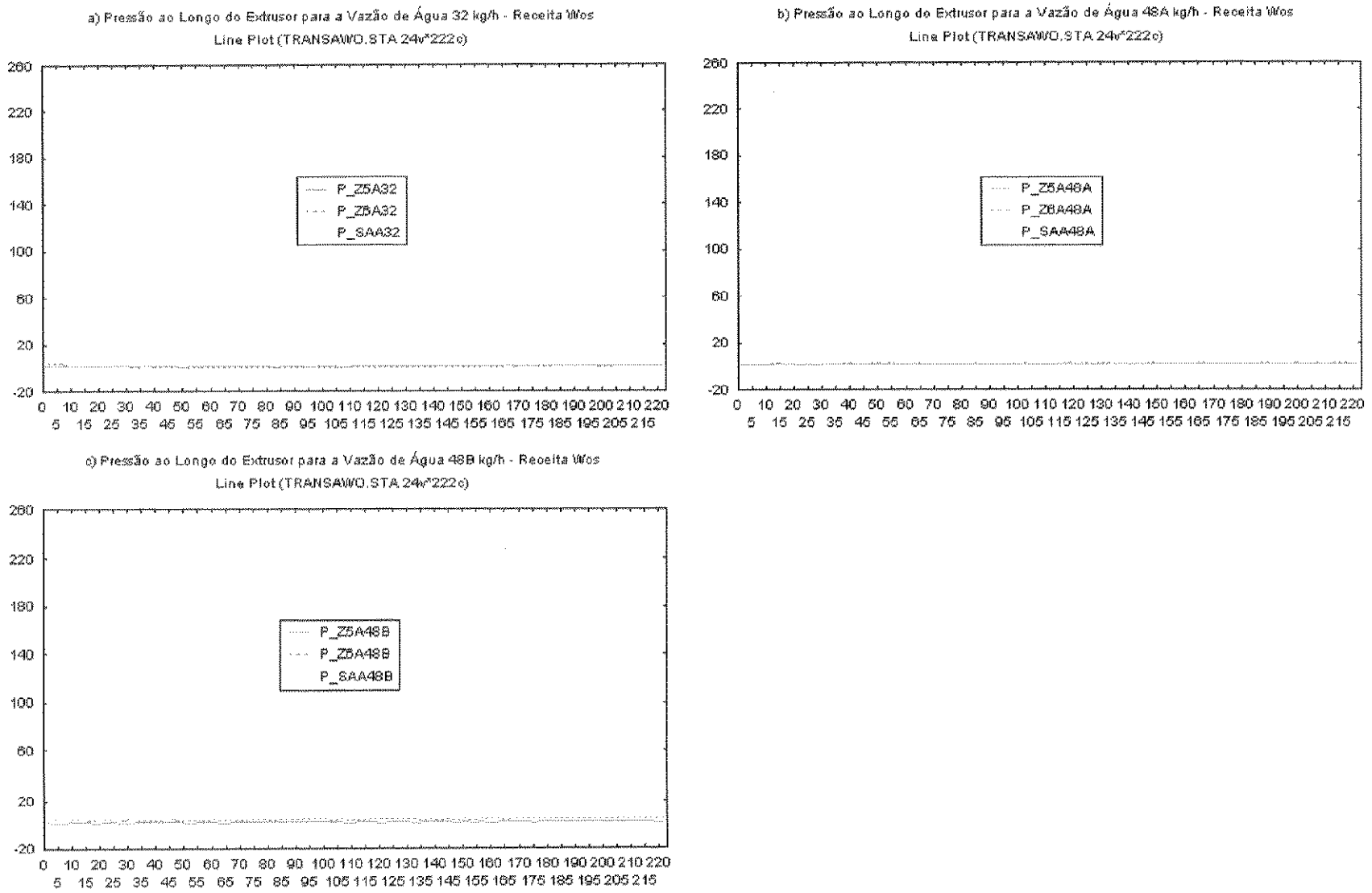


Figura 128: Pressão (psi) ao longo do Extrusor devido a Vazão de Água a (a) 32 kg/h , (b) 48A kg/h e (c) 48B kg/h para a Receita Wos

XIV) ANEXO VIII

O Anexo VIII relaciona os parâmetros ganho (k_E), tempo morto (t_D) e tempo de subida (tr) para as curvas respostas associadas as pertubações individuais.

Quadro 48: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Farinha em kg/h na Receita SC.

RECEITA SC		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Farinha	205		0.99	0.04	0.41	19.36	145.36		0.59	37.10	1.63	24.72	157.97
	245	0.95	0.98	0.00	0.04	15.73	128.51	0.95	0.53	0.00	0.26	60.67	135.33
	125		0.96	0.00	0.02	9.90	89.50		0.96	0.00	0.69	25.47	159.62
	205		0.99	0.04	0.41	19.11	145.74		0.59	36.60	1.63	24.56	158.38
	245	0.98	0.98	0.00	0.04	15.45	128.75	0.98	0.53	0.89	0.26	59.19	136.81
	125		0.96	0.00	0.02	9.69	90.02		0.96	0.39	0.69	25.20	159.86
	205		0.99	0.04	0.41	18.93	146.06		0.59	36.59	1.63	24.44	158.72
	245	1.00	0.98	0.00	0.04	15.25	128.95	1.00	0.53	0.89	0.26	58.69	137.31
	125		0.96	0.00	0.02	9.61	90.21		0.96	0.38	0.69	25.02	160.11
	205		0.99	0.04	0.42	18.75	146.42		0.59	36.59	1.64	24.32	159.00
	245	1.02	0.98	0.00	0.04	15.07	129.33	1.02	0.53	0.89	0.26	58.47	137.53
	125		0.96	0.00	0.02	9.42	91.11		0.96	0.38	0.69	24.84	160.40
	205		0.99	0.03	0.42	18.49	146.94		0.59	36.58	1.64	24.13	159.61
	245	1.05	0.98	0.00	0.04	14.76	129.61	1.05	0.53	0.89	0.26	57.84	138.16
	125		0.96	0.00	0.02	9.16	91.33		0.96	0.38	0.69	24.56	160.82
	205		1.00	0.19	0.40	9.86	162.71		0.59	44.89	1.64	23.32	162.08
	245	1.20	0.99	0.00	0.04	8.21	139.08	1.20	0.53	1.15	0.26	54.74	141.26
	125		0.96	0.00	0.02	3.53	97.66		0.97	2.24	0.69	23.36	162.80
	205		0.99	0.37	0.45	14.14	146.59		0.59	36.56	1.65	22.64	164.27
	245	1.35	0.98	0.00	0.04	10.50	124.22	1.35	0.52	0.89	0.26	51.66	144.34
	125		0.96	0.00	0.02	6.14	95.06		0.97	0.35	0.69	22.26	164.59
	205		1.00	0.02	0.42	15.22	153.76		0.69	36.55	1.66	22.07	166.21
	245	1.50	0.99	0.00	0.04	10.98	133.10	1.50	0.52	0.90	0.26	48.69	147.31
	125		0.96	0.00	0.02	6.21	93.75		0.97	0.34	0.69	21.28	166.23
	205		0.98	1.13	0.26	-48.70	124.55		0.59	36.56	1.69	19.61	176.66
	245	3.00	0.98	0.01	0.03	-46.64	120.35	3.00	0.50	0.91	0.24	26.76	168.14
	125		0.96	0.00	0.02	-36.67	106.87		0.97	0.28	0.69	15.27	177.14
	205		1.00	0.04	0.41	0.00	153.80		0.59	40.22	1.59	0.00	181.25
	245	1 ordem	0.94	0.00	0.04	0.00	78.44	1 ordem	0.45	0.98	0.21	0.00	145.64
	125		0.90	0.00	0.02	0.00	44.35		0.96	0.41	0.65	0.00	168.46
	205		0.99	0.02	0.42	9.38	145.88		0.69	39.00	1.64	16.84	157.26
	245	1-tmorto	0.93	0.00	0.04	11.98	73.12	1-tmorto	0.45	0.98	0.21	5.74	138.98
	125		0.89	0.00	0.02	10.10	41.60		0.96	0.34	0.67	11.06	152.40

Quadro 49: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Vapor kg/h na Receita SC.

RECEITA SC		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Vapor	37.5		0.97	0.02	0.17	19.61	151.49		0.78	0.02	1.74	11.55	103.51
	52.5	0.95	0.97	0.00	0.05	21.98	161.66	0.95	0.74	0.00	0.43	9.19	83.67
	22.5		0.86	0.01	0.07	5.46	53.10		0.87	0.01	2.61	19.41	155.98
	37.5		0.97	0.02	0.17	19.34	151.87		0.78	18.47	1.75	11.27	103.79
	52.5	0.98	0.97	0.00	0.05	21.67	161.94	0.98	0.74	1.30	0.43	8.92	83.69
	22.5		0.86	0.01	0.07	5.82	52.86		0.87	23.48	2.61	19.11	156.41
	37.5		0.97	0.02	0.17	19.14	152.21		0.78	18.43	1.75	11.08	104.01
	52.5	1.00	0.97	0.00	0.05	21.43	162.14	1.00	0.74	1.30	0.43	8.73	83.72
	22.5		0.86	0.01	0.07	5.60	52.68		0.87	23.47	2.62	18.90	156.75
	37.5		0.97	0.02	0.17	18.94	152.56		0.78	18.39	1.76	10.89	104.25
	52.5	1.02	0.97	0.00	0.05	21.27	162.64	1.02	0.74	1.30	0.43	8.55	83.75
	22.5		0.86	0.01	0.07	5.31	52.52		0.87	23.45	2.62	18.68	157.13
	37.5		0.97	0.02	0.17	18.65	153.10		0.78	18.34	1.76	10.61	104.52
	52.5	1.05	0.97	0.00	0.05	20.88	162.89	1.05	0.74	1.30	0.43	8.27	83.76
	22.5		0.86	0.01	0.07	5.11	52.26		0.87	23.42	2.62	18.35	157.88
	37.5		0.97	0.05	0.17	9.62	171.23		0.78	18.84	1.78	9.37	106.30
	52.5	1.20	0.97	0.00	0.04	8.51	158.84	1.20	0.74	1.32	0.44	7.07	83.77
	22.5		0.86	0.01	0.07	1.87	54.76		0.87	27.65	2.64	16.83	160.19
	37.5		0.96	0.07	0.18	14.11	151.45		0.79	18.08	1.80	8.32	107.77
	52.6	1.35	0.96	0.01	0.05	15.30	159.15	1.35	0.74	1.30	0.44	6.09	83.57
	22.5		0.86	0.01	0.07	2.99	45.05		0.87	23.18	2.65	15.46	162.31
	37.5		0.97	0.02	0.17	15.05	160.22		0.79	18.05	1.81	7.43	108.97
	52.5	1.50	0.97	0.00	0.05	15.95	165.94	1.50	0.74	1.30	0.44	5.30	83.28
	22.5		0.86	0.01	0.07	3.08	48.69		0.87	23.06	2.65	14.22	164.12
	37.5		0.96	0.22	0.12	-51.87	132.94		0.78	18.27	1.86	2.86	111.66
	52.5	3.00	0.95	0.02	0.03	-53.28	136.26	3.00	0.74	1.33	0.45	1.78	79.64
	22.5		0.83	0.02	0.07	-20.45	70.95		0.86	22.23	2.69	6.91	174.03
	37.5		0.97	0.03	0.17	0.00	139.21		0.78	18.50	1.87	0.00	108.73
	52.6	1 ordem	0.91	0.01	0.04	0.00	94.34	1 ordem	0.73	1.34	0.45	0.00	75.50
	22.5		0.86	0.01	0.07	0.00	41.75		0.87	21.49	2.74	0.00	187.46
	37.5		0.96	0.02	0.17	11.11	130.56		0.78	18.23	1.84	6.08	88.81
	52.5	1-tmorto	0.90	0.01	0.04	18.75	88.50	1-tmorto	0.74	1.32	0.45	4.42	63.77
	22.5		0.86	0.01	0.07	-0.18	41.98		0.87	21.31	2.75	-4.89	201.73

Quadro 50: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Água kg/h na Receita SC.

RECEITA SC		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Água	34		0.01	0.02	0.01	0.75	7.60		0.01	0.02	0.91	0.00	1.21
	46	0.95	0.77	0.01	0.05	3.75	34.11	0.95	0.43	0.01	0.66	9.67	87.97
	58		0.01	0.00	0.00	0.40	3.64		0.87	0.004	1.90	62.00	169.72
	34		0.01	0.02	0.01	0.75	7.44		0.16	60.24	1.09	6.69	64.96
	46	0.98	0.77	0.01	0.05	3.57	33.74	0.98	0.43	21.11	0.66	9.43	88.39
	58		0.01	0.00	0.00	0.39	4.03		0.87	7.37	1.58	51.11	170.57
	34		0.01	0.02	0.01	0.73	7.34		0.16	60.16	1.09	6.62	63.83
	46	1.00	0.77	0.01	0.05	3.47	33.51	1.00	0.43	21.13	0.87	9.26	88.69
	58		0.01	0.00	0.00	0.40	4.17		0.87	7.37	1.58	50.98	170.71
	34		0.01	0.02	0.01	0.71	7.26		0.16	60.09	1.09	6.36	62.85
	46	1.02	0.77	0.01	0.05	3.36	33.32	1.02	0.43	21.16	0.87	9.09	88.96
	58		0.06	0.00	0.00	4.84	47.80		0.87	7.37	1.58	51.03	170.68
	34		0.01	0.02	0.01	0.68	7.13		0.16	59.96	1.09	6.03	61.60
	46	1.05	0.76	0.01	0.05	3.22	32.98	1.05	0.43	21.20	0.87	8.84	89.33
	58		0.06	0.00	0.00	3.80	49.24		0.87	7.37	1.58	51.11	170.63
	34		0.01	0.02	0.01	0.19	6.87		0.16	59.52	1.09	4.82	58.14
	46	1.20	0.75	0.01	0.05	1.13	33.25	1.20	0.42	21.48	0.88	7.67	90.48
	58		0.07	0.00	0.00	4.81	55.53		0.88	28.02	1.58	51.54	170.33
	34		0.01	0.02	0.01	0.00	5.66		0.16	59.09	1.09	4.02	56.59
	46	1.35	0.74	0.01	0.05	1.86	27.59	1.35	0.42	21.52	0.89	6.65	90.68
	58		0.08	0.00	0.00	1.90	57.30		0.87	7.37	1.58	52.01	169.93
	34		0.01	0.02	0.01	0.34	5.93		0.16	58.86	1.09	3.42	55.57
	46	1.50	0.74	0.01	0.05	1.80	29.56	1.50	0.42	21.63	0.89	5.78	90.27
	58		0.09	0.00	0.004	4.39	69.39		0.87	7.37	1.58	52.48	169.49
	34		NaN	NaN	NaN	-1.99	NaN		0.16	58.15	1.10	1.07	50.94
	46	3.00	0.69	0.02	0.05	-9.15	32.69	3.00	0.41	21.91	0.90	1.89	84.29
	58		0.14	0.00	0.00	-30.41	97.25		0.67	7.37	1.59	55.79	166.21
	34		0.01	0.02	0.01	0.00	4.91		0.17	57.89	1.11	0.00	47.91
	46	1 ordem	0.73	0.02	0.05	0.00	24.01	1 ordem	0.41	21.96	0.90	0.00	79.58
	58		0.01	0.00	0.00	0.00	3.11		0.82	10.26	1.35	0.00	201.22
	34		0.01	0.02	0.01	1.45	4.40		0.17	56.52	1.12	-22.89	89.02
	46	1-tmorto	0.73	0.01	0.05	3.85	20.85	1-tmorto	0.41	21.92	0.89	4.03	89.39
	58		0.01	0.00	0.00	0.61	3.19		0.82	9.70	1.40	14.41	195.01

Quadro 51: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Farinha kg/h na Receita PP.

RECEITA PP		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Farinha	190		0.99	0.02	0.22	26.12	205.64		0.86	0.02	2.00	131.15	166.85
	210	0.95	0.98	0.00	0.07	20.75	161.47	0.95	0.96	0.00	0.69	30.07	183.64
	150		0.94	0.00	0.04	16.63	140.38		0.98	0.00	2.05	15.40	132.78
	190		0.99	0.02	0.22	25.73	206.17		0.86	26.96	2.04	137.83	160.17
	210	0.98	0.98	0.00	0.07	20.42	161.78	0.98	0.96	0.42	0.69	29.87	184.03
	150		0.94	0.00	0.04	16.33	140.78		0.98	1.78	2.05	15.13	133.35
	190		0.99	0.02	0.22	25.46	206.62		0.86	26.29	2.05	139.65	160.36
	210	1.00	0.98	0.00	0.07	20.19	162.04	1.00	0.96	0.42	0.69	29.73	184.37
	150		0.94	0.00	0.04	16.11	141.07		0.98	1.81	2.05	14.94	133.78
	190		0.99	0.02	0.22	25.17	207.10		0.86	26.28	2.05	139.53	158.47
	210	1.02	0.98	0.00	0.07	19.96	162.39	1.02	0.96	0.42	0.69	29.58	184.74
	150		0.94	0.00	0.04	15.91	141.53		0.98	1.84	2.06	14.74	134.21
	190		0.99	0.02	0.22	24.76	207.83		0.86	26.32	2.05	139.35	158.65
	210	1.05	0.98	0.00	0.07	19.61	162.81	1.05	0.96	0.42	0.69	29.36	185.28
	150		0.94	0.00	0.04	15.58	141.95		0.98	1.88	2.06	14.45	134.85
	190		0.99	0.07	0.21	12.45	233.48		0.84	72.57	2.05	138.46	159.54
	210	1.20	0.99	0.00	0.06	8.84	176.44	1.20	0.96	2.15	0.69	28.40	187.81
	150		0.94	0.00	0.04	6.47	153.16		0.98	3.66	2.08	13.09	137.71
	190		0.98	0.12	0.23	18.80	204.40		0.86	26.69	2.04	137.63	160.37
	210	1.35	0.97	0.01	0.07	14.58	158.64	1.35	0.96	0.41	0.70	27.58	190.04
	150		0.93	0.00	0.04	11.06	135.43		0.98	2.31	2.10	11.89	140.07
	190		0.99	0.01	0.22	19.70	217.40		0.86	26.85	2.04	136.86	161.14
	210	1.50	0.98	0.00	0.07	15.12	167.88	1.50	0.97	0.40	0.70	26.89	192.01
	150		0.94	0.00	0.04	11.41	146.22		0.98	2.49	2.11	10.83	142.02
	190		0.98	0.45	0.15	-71.86	184.18		0.85	28.35	2.00	129.83	168.17
	210	3.00	0.97	0.03	0.05	-57.03	144.41	3.00	0.97	0.39	0.71	23.61	202.73
	150		0.93	0.01	0.03	-53.26	138.72		0.97	3.51	2.16	4.71	149.29
	190		0.99	0.03	0.21	0.00	193.99		0.70	66.79	1.47	0.00	277.49
	210	1 ordem	0.95	0.01	0.06	0.00	110.75	1 ordem	0.96	0.80	0.65	0.00	193.22
	150		0.90	0.01	0.03	0.00	84.82		0.96	4.18	2.16	0.00	147.67
	190		0.99	0.02	0.21	14.26	181.58		0.70	50.58	1.69	60.64	215.82
	210	1-tmorto	0.94	0.01	0.06	13.22	103.73	1-tmorto	0.95	0.54	0.67	19.38	165.54
	150		0.89	0.00	0.04	13.86	78.59		0.97	3.34	2.13	10.24	112.35

Quadro 52: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Vapor kg/h na Receita PP.

RECEITA PP		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Vapor	17.5		0.71	0.01	0.02	19.04	152.28		0.64	0.01	1.48	100.39	124.61
	32.5	0.95	0.92	0.01	0.06	33.85	185.58	0.95	0.55	0.01	1.15	4.42	40.35
	40		0.65	0.01	0.02	10.72	97.36		0.95	0.01	1.49	78.15	159.85
	17.5		0.71	0.01	0.02	18.99	153.77		0.64	19.97	1.49	100.30	124.70
	32.5	0.98	0.92	0.01	0.06	33.54	185.85	0.98	0.55	15.04	1.16	4.33	40.83
	40		0.66	0.01	0.02	10.44	97.60		0.95	2.72	1.48	77.30	160.70
	17.5		0.71	0.01	0.02	18.75	153.94		0.64	20.14	1.48	98.94	126.06
	32.5	1.00	0.92	0.01	0.06	33.24	186.06	1.00	0.56	14.95	1.16	4.25	41.12
	40		0.66	0.01	0.02	10.23	97.65		0.95	2.72	1.48	77.26	160.74
	17.5		0.72	0.01	0.02	19.13	156.89		0.64	20.14	1.48	98.72	126.28
	32.5	1.02	0.92	0.01	0.06	33.14	186.37	1.02	0.56	14.88	1.16	4.18	41.40
	40		0.66	0.01	0.02	10.10	98.46		0.95	2.72	1.48	77.43	160.57
	17.5		0.72	0.01	0.02	18.69	156.92		0.64	20.15	1.48	98.49	126.51
	32.5	1.05	0.92	0.01	0.06	32.60	186.69	1.05	0.56	14.77	1.17	4.08	41.76
	40		0.67	0.01	0.02	9.78	98.46		0.95	2.73	1.48	77.68	160.32
	17.5		0.71	0.01	0.02	6.60	156.12		0.63	43.30	1.49	97.39	127.61
	32.5	1.20	0.88	0.01	0.05	12.63	188.40	1.20	0.57	14.49	1.18	3.56	43.08
	40		0.69	0.01	0.02	3.93	109.99		0.95	17.57	1.43	78.73	159.27
	17.5		0.69	0.01	0.02	13.35	149.37		0.63	20.19	1.47	96.33	128.67
	32.5	1.35	0.92	0.04	0.07	24.41	195.19	1.35	0.58	14.16	1.19	3.10	43.74
	40		0.69	0.00	0.02	6.29	91.33		0.95	2.74	1.43	79.50	158.50
	17.5		0.71	0.01	0.02	13.61	158.27		0.63	20.21	1.47	95.30	129.70
	32.5	1.50	0.91	0.01	0.06	25.53	190.40	1.50	0.58	14.03	1.20	2.71	44.03
	40		0.70	0.00	0.02	6.59	101.49		0.95	2.74	1.49	80.03	157.97
	17.5		0.68	0.01	0.01	-51.11	134.97		0.62	20.42	1.44	86.13	136.87
	32.5	3.00	0.84	0.05	0.03	-56.67	143.65	3.00	0.59	13.78	1.22	0.90	42.70
	40		0.74	0.01	0.02	-54.92	143.94		0.95	2.76	1.48	78.79	159.21
	17.5		0.51	0.01	0.01	0.00	55.78		0.52	23.19	1.15	0.00	202.06
	32.5	1 ordem	0.81	0.03	0.05	0.00	116.17	1 ordem	0.59	13.75	1.22	0.00	40.62
	40		0.66	0.01	0.02	0.00	54.24		0.89	8.30	1.21	0.00	215.89
	17.5		0.52	0.01	0.02	21.07	59.00		0.52	23.18	1.15	-1.13	204.14
	32.5	1-tmorto	0.80	0.02	0.05	27.06	112.16	1-tmorto	0.59	13.74	1.22	-1.10	43.37
	40		0.64	0.01	0.02	5.65	49.95		0.89	5.89	1.30	29.84	182.82

Quadro 53: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Água kg/h na Receita PP.

RECEITA PP		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Água	32		0.90	0.01	0.06	28.41	182.15		0.72	0.01	0.77	31.67	185.94
	48A	0.95	0.16	0.02	0.03	1.05	9.87	0.95	0.50	0.02	1.49	102.63	127.17
	48B		0.90	0.01	0.07	35.41	186.07		0.38	0.01	1.07	1.28	11.80
	32		0.90	0.01	0.06	28.11	182.47		0.72	4.51	0.77	31.53	186.19
	48A	0.98	0.16	0.02	0.03	1.04	10.01	0.98	0.49	40.29	1.50	105.04	124.96
	48B		0.90	0.01	0.07	35.11	186.34		0.38	10.41	1.07	1.22	11.58
	32		0.90	0.01	0.06	27.85	182.67		0.72	4.50	0.77	31.34	186.47
	48A	1.00	0.16	0.02	0.03	1.03	10.09	1.00	0.49	40.45	1.50	104.85	125.15
	48B		0.90	0.01	0.07	35.79	186.57		0.38	10.43	1.07	1.17	11.45
	32		0.90	0.01	0.06	27.70	183.09		0.72	4.50	0.77	31.17	186.79
	48A	1.02	0.16	0.02	0.03	1.01	10.18	1.02	0.49	40.46	1.50	104.70	125.30
	48B		0.90	0.01	0.07	35.65	186.83		0.38	10.45	1.07	1.12	11.35
	32		0.90	0.01	0.06	27.25	183.37		0.72	4.50	0.77	30.91	187.26
	48A	1.05	0.16	0.02	0.03	0.99	10.30	1.05	0.49	40.47	1.50	104.50	125.50
	48B		0.90	0.01	0.07	35.09	187.20		0.38	10.47	1.07	1.06	11.18
	32		0.90	0.01	0.05	10.94	186.63		0.74	8.56	0.77	29.72	189.46
	48A	1.20	0.16	0.02	0.03	0.40	11.99	1.20	0.48	63.02	1.49	103.52	126.48
	48B		0.90	0.02	0.06	13.68	188.98		0.37	10.58	1.07	0.84	10.45
	32		0.88	0.02	0.06	20.58	184.95		0.72	4.48	0.77	28.62	191.40
	48A	1.35	0.16	0.02	0.03	0.64	10.02	1.35	0.49	40.68	1.49	102.56	127.44
	48B		0.85	0.05	0.08	26.65	199.57		NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
	32		0.89	0.01	0.05	21.33	186.62		0.72	4.47	0.78	27.60	193.13
	48A	1.50	0.16	0.02	0.03	0.67	11.18	1.50	0.49	40.63	1.48	101.63	128.37
	48B		0.89	0.02	0.07	27.71	191.60		0.37	10.68	1.07	0.57	9.59
	32		0.85	0.04	0.03	-55.52	144.11		0.71	4.41	0.77	19.30	204.02
	48A	3.00	0.16	0.02	0.03	-5.71	20.33	3.00	0.48	41.10	1.45	93.11	136.89
	48B		0.81	0.06	0.04	-59.73	147.25		NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
	32		0.83	0.02	0.04	0.00	110.65		0.70	4.37	0.72	0.00	193.81
	48A	1 ordem	0.16	0.02	0.03	0.00	10.78	1 ordem	0.41	47.02	1.13	0.00	209.05
	48B		0.79	0.04	0.05	0.00	122.12		0.36	10.86	1.07	0.00	7.93
	32		0.82	0.02	0.05	24.52	104.71		0.70	4.37	0.72	-0.41	194.10
	48A	1-tmorto	0.16	0.02	0.03	0.49	9.93	1-tmorto	0.41	46.50	1.18	16.37	191.90
	48B		0.78	0.03	0.06	25.18	118.16		0.36	10.71	1.07	1.24	5.96

Quadro 54: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Farinha kg/h na Receita Wos.

RECEITA PP		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Farinha	190	0.95	0.99	0.02	0.22	26.12	205.64	0.95	0.86	0.02	2.00	131.15	166.85
	210		0.98	0.00	0.07	20.75	161.47		0.96	0.00	0.69	30.07	183.64
	150		0.94	0.00	0.04	16.63	140.38		0.98	0.00	2.05	15.40	132.78
	190	0.98	0.99	0.02	0.22	25.73	206.17	0.98	0.86	26.96	2.04	137.83	160.17
	210		0.98	0.00	0.07	20.42	161.78		0.96	0.42	0.69	29.87	184.03
	150		0.94	0.00	0.04	16.33	140.78		0.98	1.78	2.05	15.13	133.35
	190	1.00	0.99	0.02	0.22	25.46	206.62	1.00	0.86	26.36	2.06	139.65	166.35
	210		0.98	0.00	0.07	20.19	162.04		0.96	0.42	0.69	29.73	184.37
	150		0.94	0.00	0.04	16.11	141.07		0.98	1.81	2.05	14.94	133.78
	190	1.02	0.99	0.02	0.22	25.17	207.10	1.02	0.86	26.28	2.05	139.53	166.47
	210		0.98	0.00	0.07	19.96	162.39		0.96	0.42	0.69	29.68	184.74
	150		0.94	0.00	0.04	15.91	141.53		0.98	1.84	2.06	14.74	134.21
	190	1.05	0.99	0.02	0.22	24.76	207.83	1.05	0.86	26.32	2.05	139.35	166.65
	210		0.98	0.00	0.07	19.61	162.81		0.96	0.42	0.69	29.36	185.28
	150		0.94	0.00	0.04	15.68	141.95		0.98	1.88	2.06	14.45	134.85
	190	1.20	0.99	0.07	0.21	12.45	233.49	1.20	0.84	72.57	2.05	138.46	169.54
	210		0.99	0.00	0.06	8.64	176.44		0.96	2.15	0.69	28.40	187.81
	150		0.94	0.00	0.04	6.47	153.16		0.98	3.66	2.08	13.09	137.71
	190	1.35	0.98	0.12	0.23	18.80	204.40	1.35	0.86	26.69	2.04	137.63	160.37
	210		0.97	0.01	0.07	14.58	158.64		0.96	0.41	0.70	27.58	190.04
	150		0.93	0.00	0.04	11.05	135.43		0.98	2.31	2.10	11.89	140.07
	190	1.50	0.99	0.01	0.22	19.70	217.40	1.50	0.86	26.85	2.04	136.86	161.14
	210		0.98	0.00	0.07	15.12	167.88		0.97	0.40	0.70	26.89	192.01
	150		0.94	0.00	0.04	11.41	146.22		0.98	2.49	2.11	10.83	142.02
	190	3.00	0.98	0.45	0.15	-71.86	184.18	3.00	0.85	28.35	2.00	129.83	168.17
	210		0.97	0.03	0.05	-67.03	144.41		0.97	0.39	0.71	23.01	202.73
	150		0.93	0.01	0.03	-53.26	138.72		0.97	3.51	2.16	4.71	149.29
	190	1 ordem	0.99	0.03	0.21	0.00	193.99	1 ordem	0.70	66.79	1.47	0.00	277.49
	210		0.95	0.01	0.06	0.00	110.75		0.96	0.90	0.65	0.00	193.22
	150		0.90	0.01	0.03	0.00	84.82		0.96	4.18	2.16	0.00	147.67
	190	1-tmorto	0.99	0.02	0.21	14.26	181.58	1-tmorto	0.70	50.58	1.69	60.64	215.82
	210		0.94	0.01	0.06	13.22	103.73		0.95	0.54	0.67	19.36	165.54
	150		0.89	0.00	0.04	13.86	78.59		0.97	3.34	2.13	10.24	112.36

Quadro 55: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Vapor kg/h na Receita Wos.

RECEITA Wos		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Vapor	17.5	0.95	0.96	0.01	0.10	17.52	144.05	0.95	0.08	0.01	0.57	0.77	7.41
	32.5		0.94	0.01	0.07	37.87	178.42		0.95	0.01	5.53	52.18	168.69
	40		0.67	0.01	0.02	16.00	129.86		0.77	0.01	1.37	31.81	161.66
	17.5	0.98	0.96	0.01	0.10	17.30	144.81	0.98	0.08	17.30	0.57	0.74	7.23
	32.5		0.94	0.01	0.07	37.61	178.67		0.95	35.87	5.53	52.02	168.75
	40		0.66	0.01	0.02	14.81	130.93		0.77	13.37	1.38	31.76	162.06
	17.5	1.00	0.96	0.01	0.10	17.14	145.37	1.00	0.08	17.31	0.57	0.72	7.12
	32.5		0.94	0.01	0.07	37.31	178.91		0.96	35.90	5.53	52.07	168.72
	40		0.66	0.01	0.02	14.61	131.31		0.77	13.38	1.38	31.70	162.39
	17.5	1.02	0.96	0.01	0.10	16.97	145.93	1.02	0.08	17.32	0.57	0.69	7.02
	32.5		0.94	0.01	0.07	37.23	179.11		0.95	35.92	5.53	52.18	168.63
	40		0.66	0.01	0.02	14.62	133.09		0.77	13.38	1.38	31.64	162.74
	17.5	1.05	0.95	0.01	0.10	16.72	146.77	1.05	0.07	17.34	0.57	0.66	6.90
	32.5		0.94	0.01	0.07	36.88	179.53		0.95	35.95	5.54	52.35	168.49
	40		0.66	0.01	0.02	14.29	133.49		0.77	13.39	1.38	31.56	163.25
	17.5	1.20	0.94	0.02	0.10	7.82	164.66	1.20	NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	32.5		0.93	0.02	0.06	13.92	181.49		0.95	234.04	5.55	53.23	167.71
	40		0.65	0.01	0.02	5.39	137.19		0.76	19.39	1.39	31.22	165.49
	17.5	1.35	0.94	0.03	0.10	12.83	145.87	1.35	0.07	17.41	0.57	0.40	6.03
	32.5		0.89	0.06	0.08	27.98	196.25		0.95	36.18	5.55	54.11	166.87
	40		0.63	0.01	0.02	9.90	126.30		0.76	13.49	1.39	30.99	167.29
	17.5	1.50	0.95	0.01	0.10	13.67	157.36	1.50	0.07	17.42	0.57	0.33	5.77
	32.5		0.93	0.01	0.06	29.37	184.59		0.95	36.26	5.56	54.97	166.03
	40		0.64	0.01	0.02	10.23	136.87		0.76	13.52	1.40	30.85	168.72
	17.5	3.00	0.94	0.08	0.07	-47.34	128.80	3.00	NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
	32.5		0.83	0.06	0.03	-54.80	138.48		0.95	36.59	5.56	59.35	161.65
	40		0.62	0.01	0.01	-41.84	120.96		0.76	13.88	1.42	31.45	193.42
	17.5	1 ordem	0.94	0.03	0.09	0.00	123.62	1 ordem	0.07	17.48	0.57	0.00	4.84
	32.5		0.82	0.04	0.05	0.00	119.89		0.92	83.57	4.78	0.00	211.87
	40		0.56	0.01	0.01	0.00	56.33		0.75	15.75	1.28	0.00	201.79
	17.5	1-tmorto	0.94	0.02	0.10	19.00	107.62	1-tmorto	0.07	17.42	0.57	0.96	3.48
	32.5		0.81	0.03	0.06	32.89	116.53		0.91	58.47	5.10	25.09	184.77
	40		0.56	0.01	0.02	19.18	56.19		0.74	14.64	1.34	20.35	175.38

Quadro 56: Parâmetros da Curva Resposta para a Vazão de Água kg/h na Receita Wos.

RECEITA Wos		TEMPERATURA DE SAÍDA						PRESSÃO DE SAÍDA					
					kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)				kE (inclinação)	tD (s) (tempo morto)	tr (s) (tempo estac)
Variável Manipulativa	kg/h	Quisi	Erro quad	Resíduo	T/degrau	T/degrau	T/degrau	Quisi	Erro quad	Resíduo	P/degrau	P/degrau	P/degrau
Vazão de Água	32		0.15	0.14	0.05	1.93	17.72		0.95	0.14	2.98	37.69	179.47
	48A	0.95	0.88	0.02	0.07	18.14	147.20	0.95	0.89	0.02	1.75	13.62	119.83
	48B		0.06	0.01	0.01	1.16	10.82		0.01	0.01	0.75	0.001	2.42
	32		0.15	0.14	0.05	1.83	17.32		0.95	10.42	2.98	37.66	178.66
	48A	0.98	0.88	0.02	0.07	17.78	147.25	0.98	0.89	8.68	1.75	13.36	120.31
	48B		0.06	0.01	0.01	1.09	10.66		0.01	81.68	0.75	0.00	2.37
	32		0.14	0.14	0.05	1.75	17.11		0.95	10.44	2.98	37.66	178.82
	48A	1.00	0.88	0.02	0.07	17.53	147.36	1.00	0.89	8.65	1.76	13.16	120.68
	48B		0.06	0.01	0.01	1.05	10.49		0.01	81.69	0.75	0.00	2.33
	32		0.14	0.14	0.05	1.69	16.92		0.95	10.45	2.98	37.63	178.99
	48A	1.02	0.88	0.02	0.07	17.28	147.52	1.02	0.89	8.53	1.76	12.96	121.05
	48B		0.06	0.01	0.01	1.03	10.36		0.01	81.69	0.75	0.00	2.30
	32		0.14	0.14	0.05	1.61	16.61		0.95	10.47	2.98	37.61	179.24
	48A	1.05	0.88	0.02	0.07	16.91	147.74	1.05	0.89	8.51	1.76	12.68	121.61
	48B		0.06	0.01	0.01	0.98	10.19		0.01	81.60	0.75	0.00	2.25
	32		0.14	0.14	0.05	0.54	15.94		0.94	55.30	2.99	37.58	180.24
	48A	1.20	0.89	0.02	0.07	7.83	164.74	1.20	0.89	9.37	1.78	11.39	124.17
	48B		0.06	0.01	0.01	0.31	10.08		NaN	NaN	0.75	0.00	2.07
	32		0.14	0.14	0.05	0.71	13.14		0.95	10.64	3.00	37.64	180.93
	48A	1.35	0.88	0.02	0.06	12.14	140.79	1.35	0.89	8.40	1.80	10.27	126.34
	48B		0.05	0.01	0.01	0.58	8.43		NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
	32		0.14	0.14	0.05	0.84	13.90		0.95	10.70	3.01	37.77	181.39
	48A	1.50	0.89	0.01	0.06	12.40	150.56	1.50	0.89	8.40	1.81	9.29	128.14
	48B		0.05	0.01	0.01	0.51	6.93		NaN	NaN	NaN	0.00	NaN
	32		0.13	0.14	0.05	-3.72	13.45		0.95	10.98	3.03	39.94	180.96
	48A	3.00	0.90	0.06	0.05	-58.70	143.38	3.00	0.89	8.65	1.86	3.09	134.65
	48B		0.06	0.01	0.01	-43.53	122.98		NaN	NaN	NaN	NaN	NaN
	32		0.13	0.14	0.05	0.00	11.12		0.93	22.46	2.69	0.00	206.96
	48A	1 ordem	0.88	0.02	0.07	0.00	109.01	1 ordem	0.89	8.93	1.88	0.00	133.72
	48B		0.05	0.01	0.01	0.00	7.29		0.01	81.68	0.75	0.00	1.73
	32		0.13	0.14	0.05	2.19	10.01		0.93	15.53	2.86	23.52	179.50
	48A	1-tmorto	0.87	0.02	0.07	9.55	101.83	1-tmorto	0.89	8.62	1.85	7.37	107.66
	48B		0.05	0.01	0.01	1.64	6.38		0.01	81.66	0.75	0.21	1.47

XV) ANEXO IX

O Anexo IX mostra as curvas de reação ajustadas segundo diferentes valores de freqüência ζ e as suas respectivas retas tangentes associadas ao melhor ajuste.

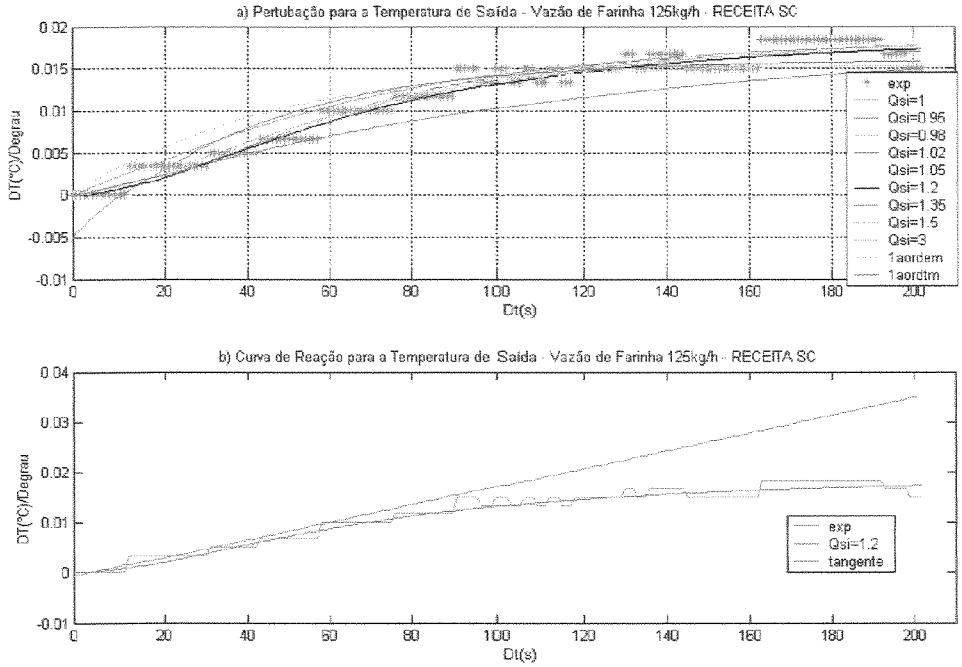


Figura 129: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 125 kg/h na Receita SC.

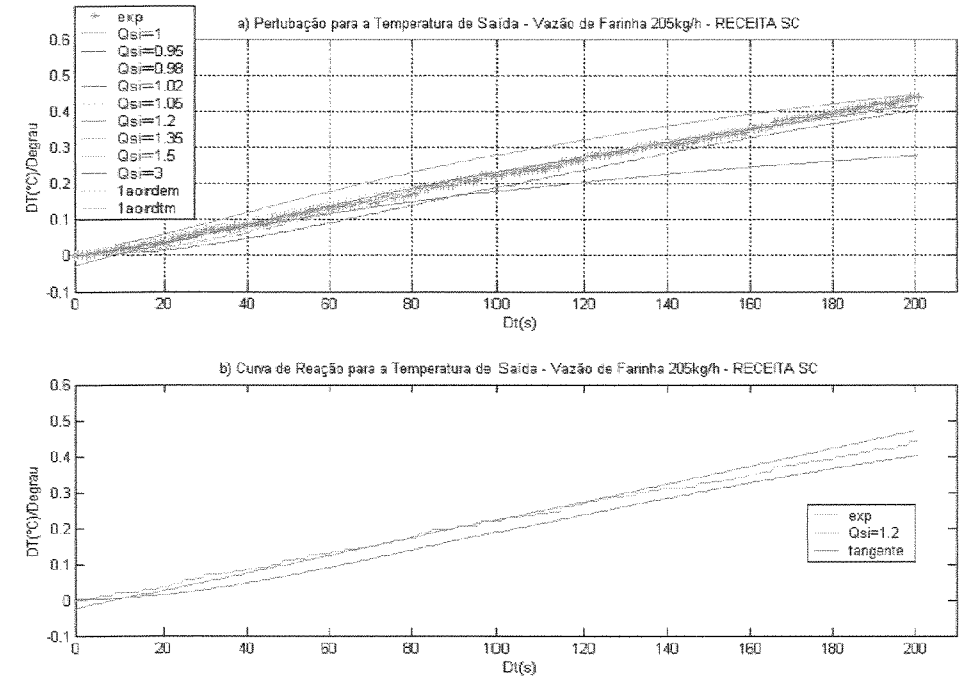


Figura 130: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 205 kg/h na Receita SC.

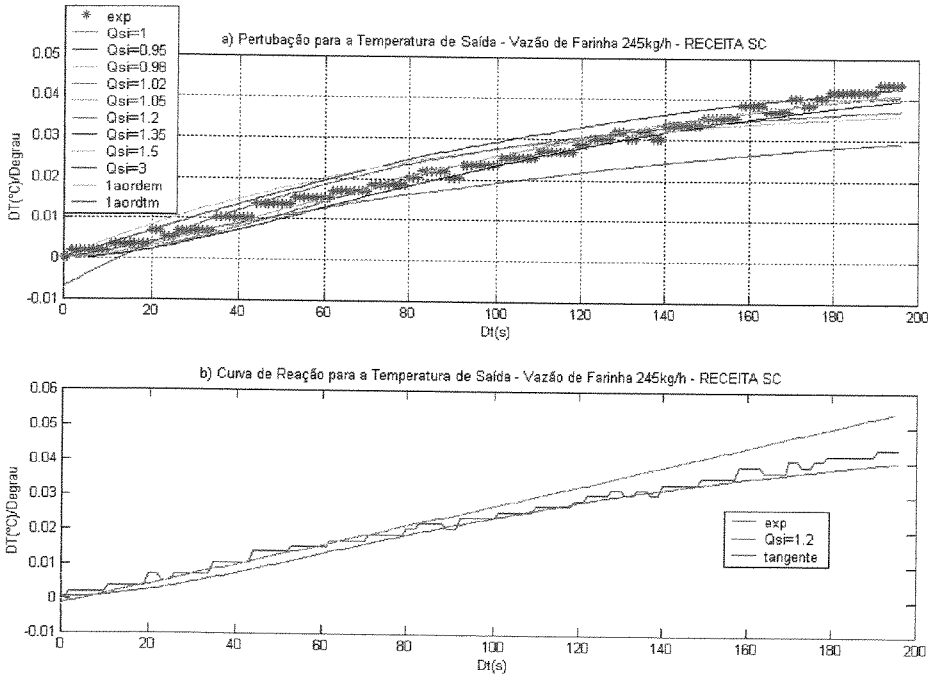


Figura 131: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^0C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 245 kg/h na Receita SC.

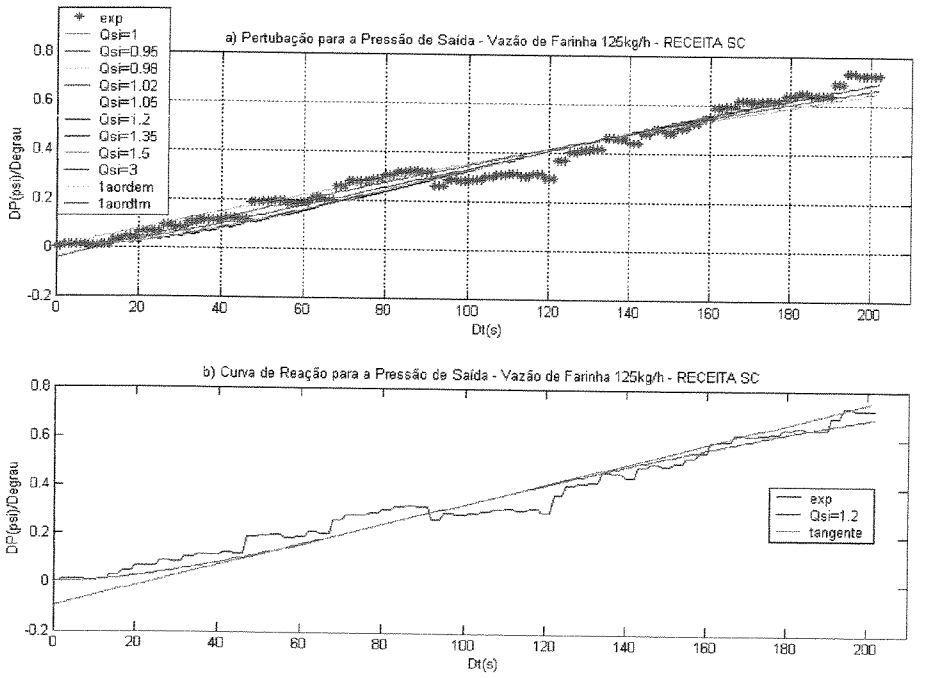


Figura 132: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 125 kg/h na Receita SC.

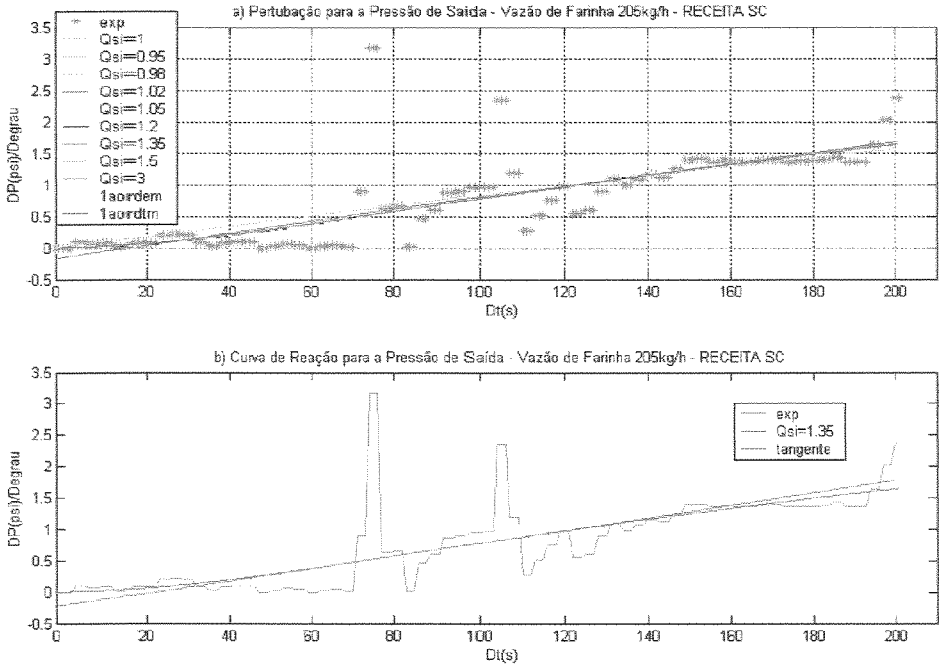


Figura 133: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 205 kg/h na Receita SC.

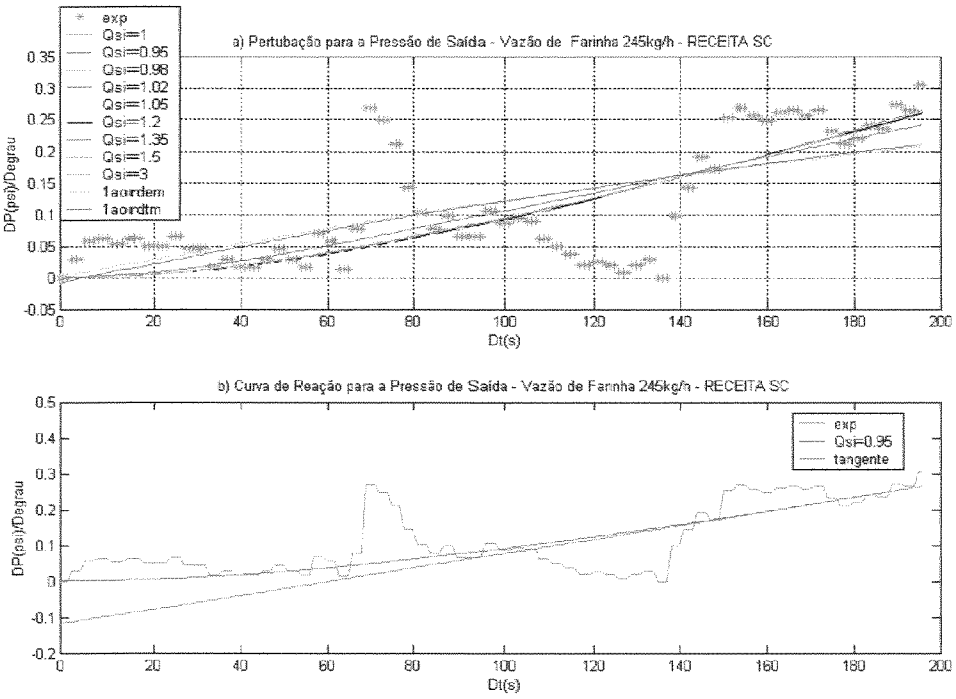


Figura 134: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 245 kg/h na Receita SC.

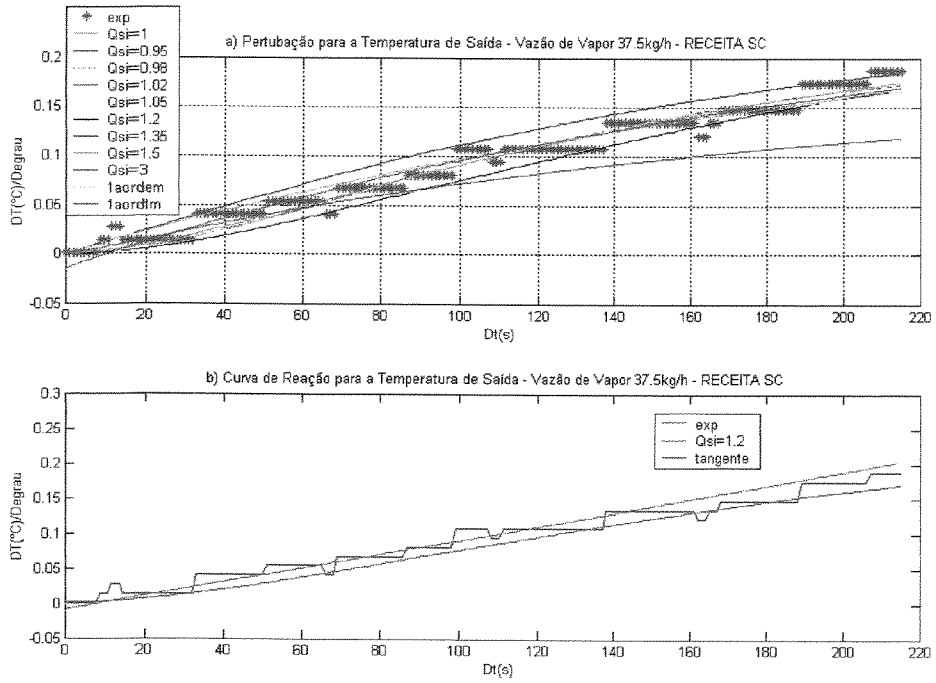


Figura 135: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 37,5 kg/h na Receita SC.

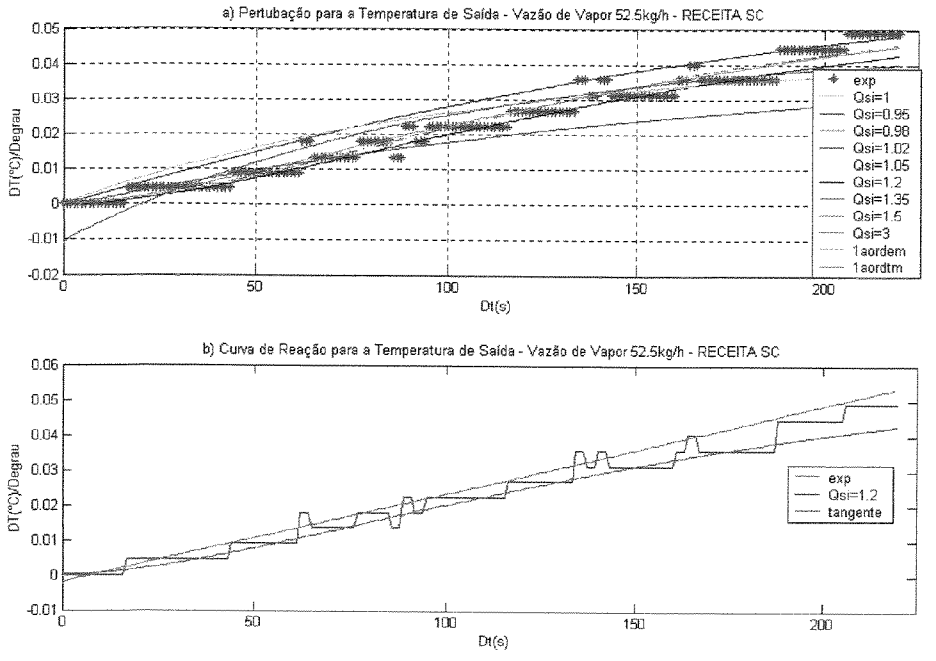


Figura 136: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 52,5 kg/h na Receita SC.

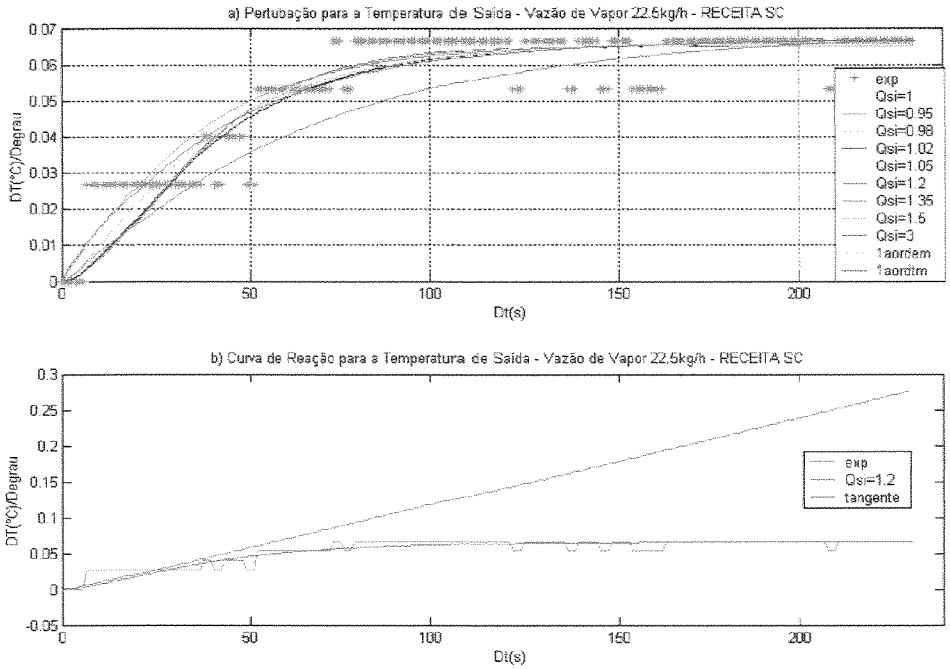


Figura 137: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 22,5 kg/h na Receita SC.

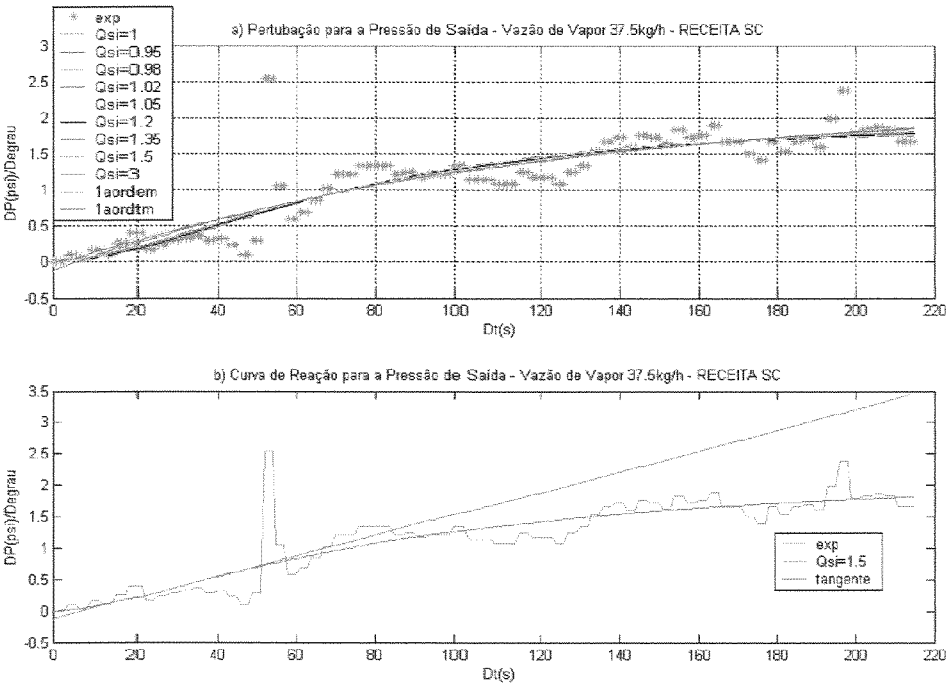


Figura 138: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 37,5 kg/h na Receita SC.

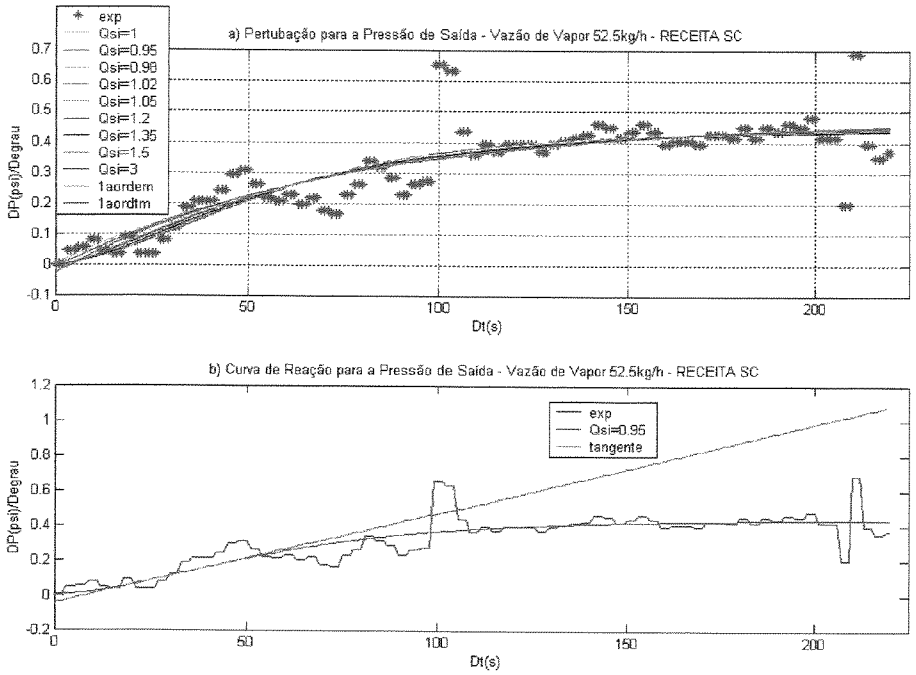


Figura 139: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 52,5 kg/h na Receita SC.

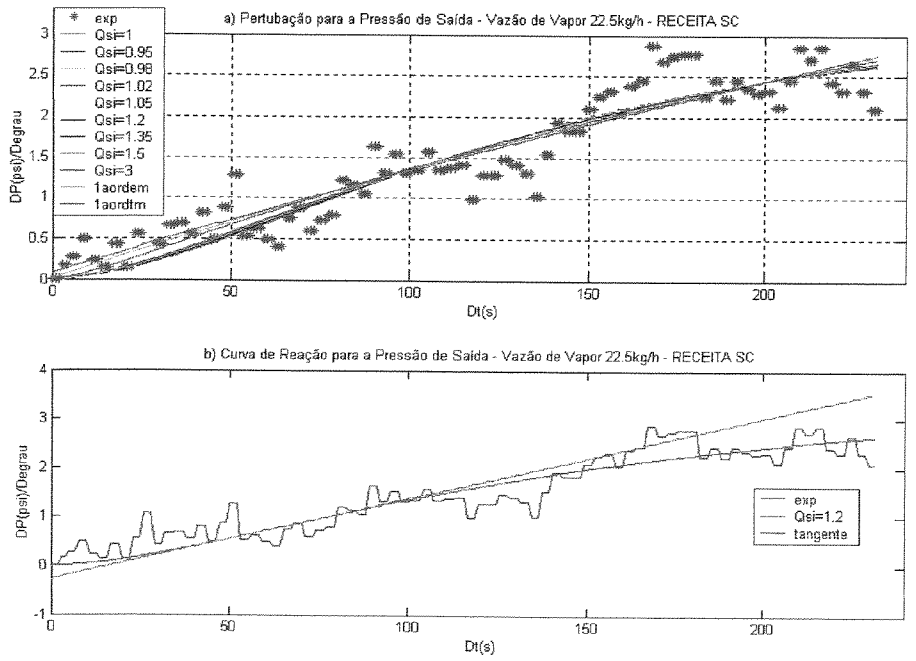


Figura 140: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 22,5 kg/h na Receita SC.

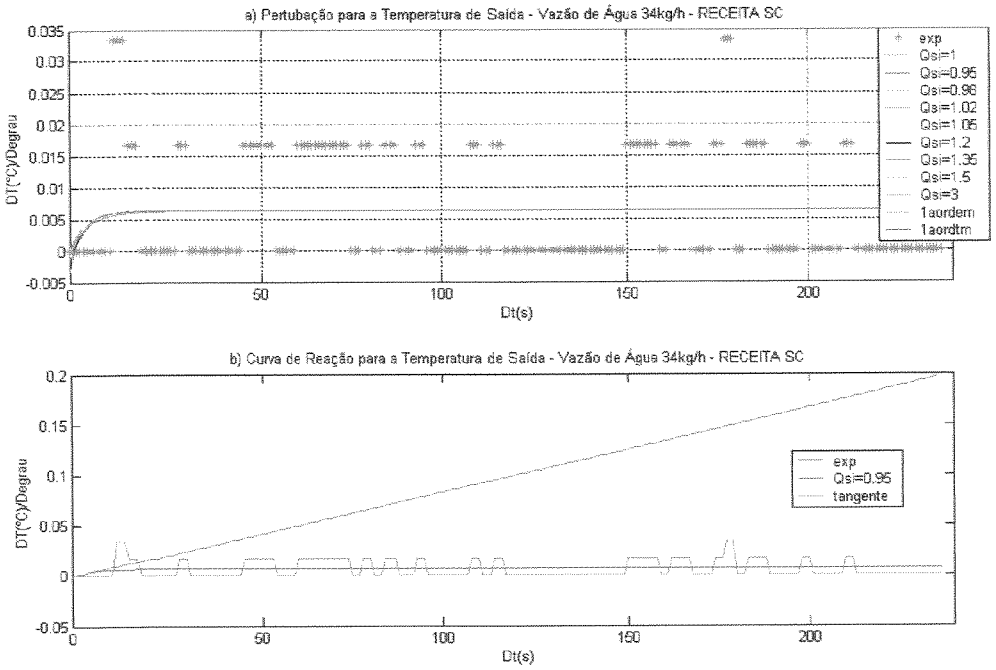


Figura 141: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 34 kg/h na Receita SC.

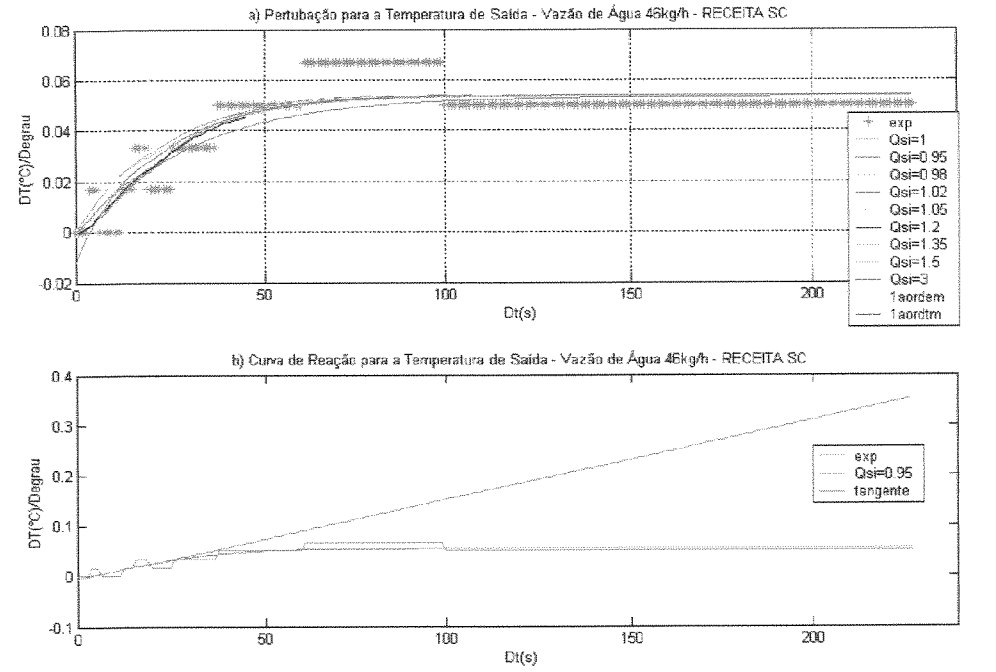


Figura 142: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 46 kg/h na Receita SC.

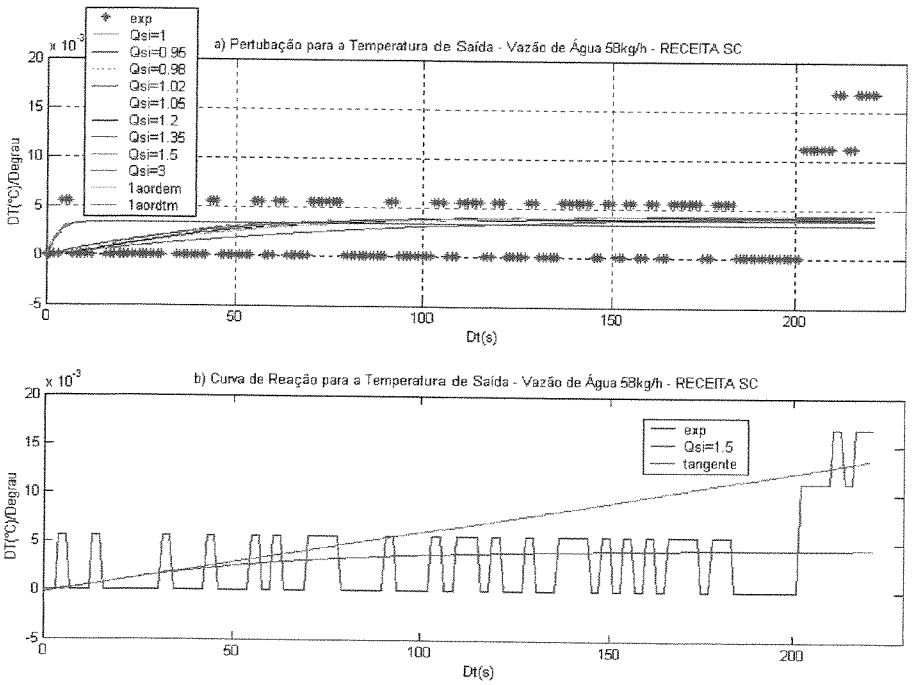


Figura 143: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 58 kg/h na Receita SC.

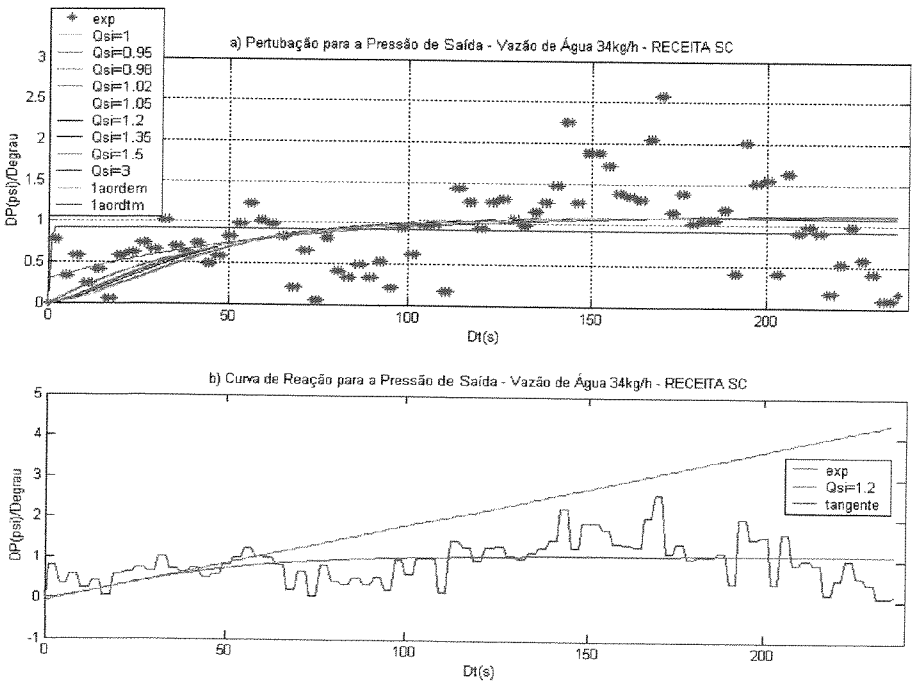


Figura 144: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 34 kg/h na Receita SC.

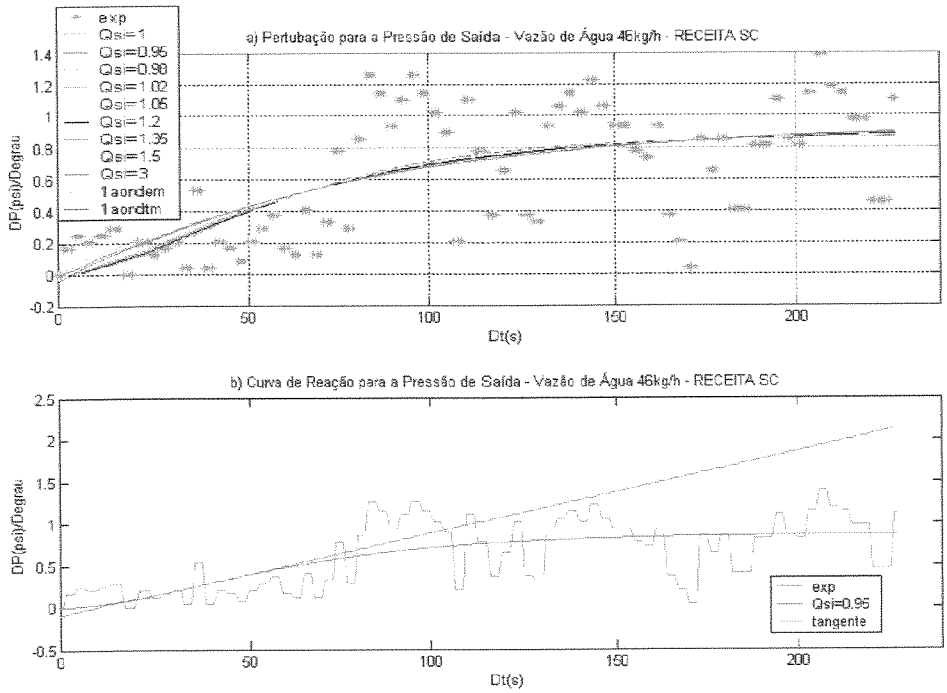


Figura 145: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 46 kg/h na Receita SC.

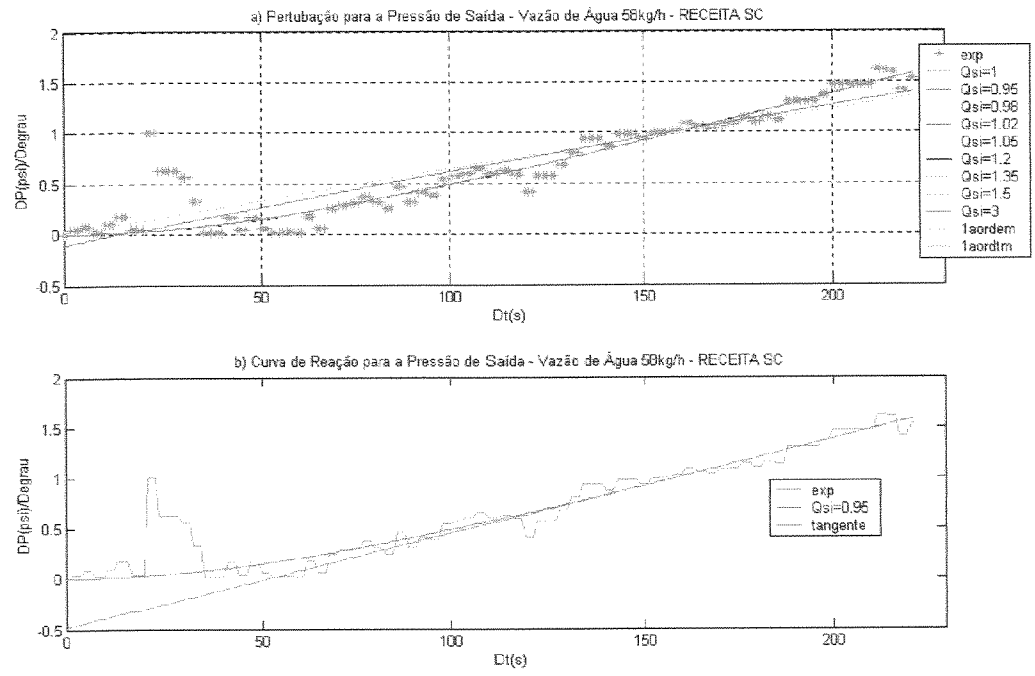


Figura 146: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 58 kg/h na Receita SC.

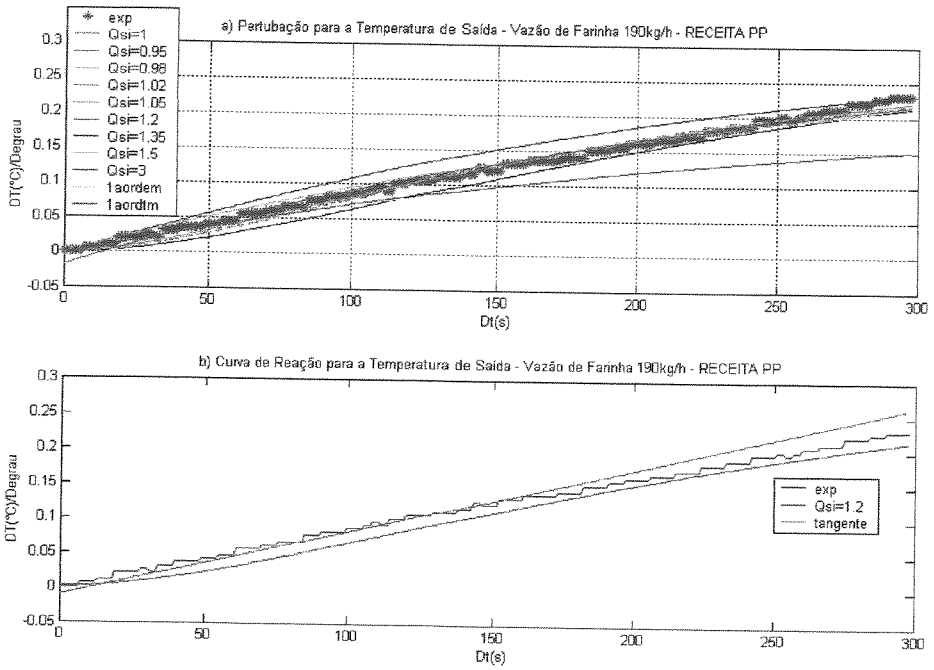


Figura 147: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita PP.

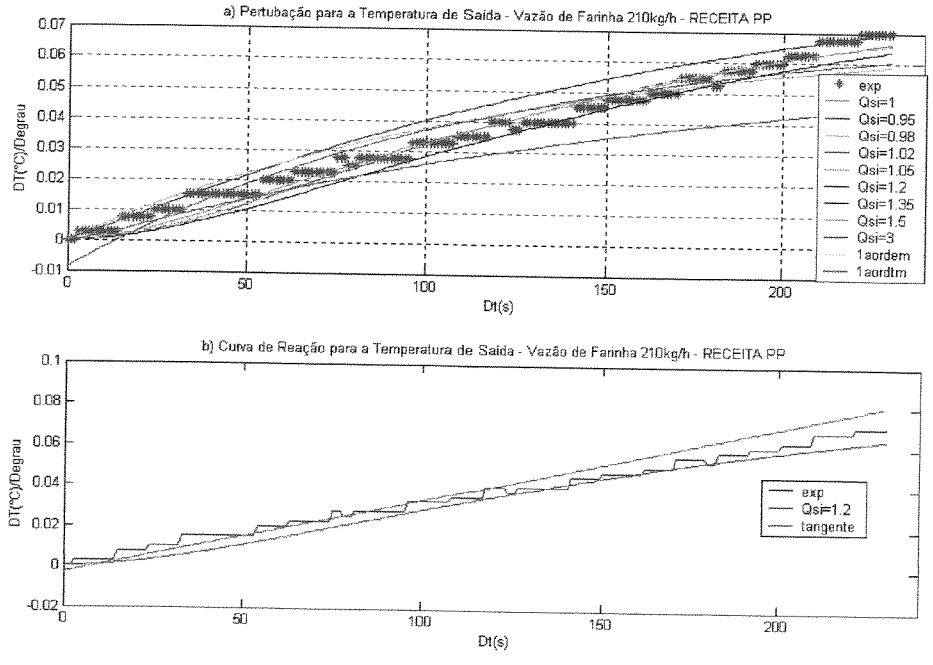


Figura 148: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita PP.

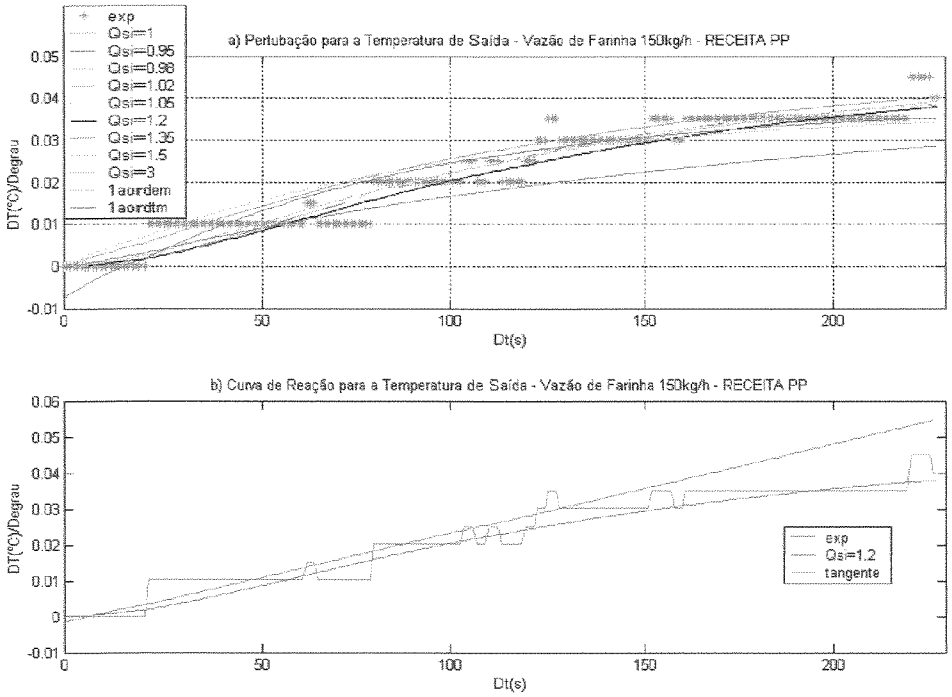


Figura 149: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h na Receita PP.

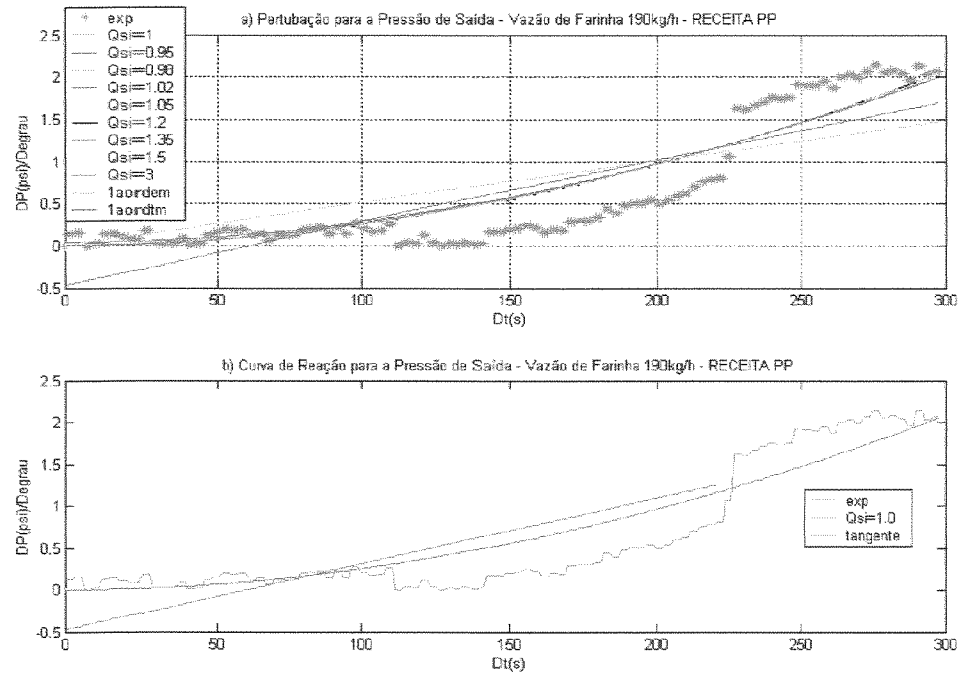


Figura 150: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita PP.

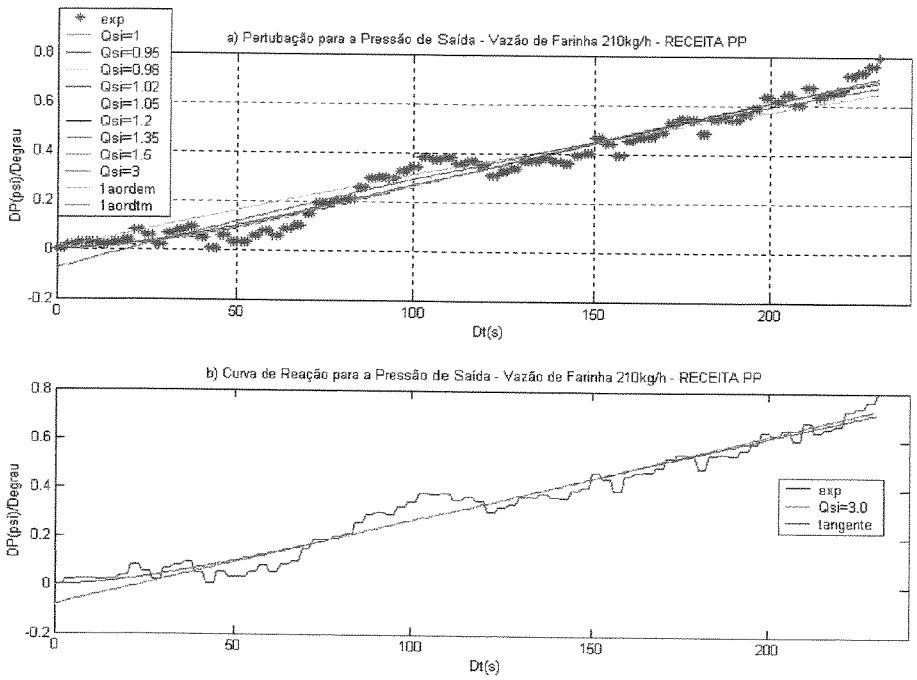


Figura 151: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita PP.

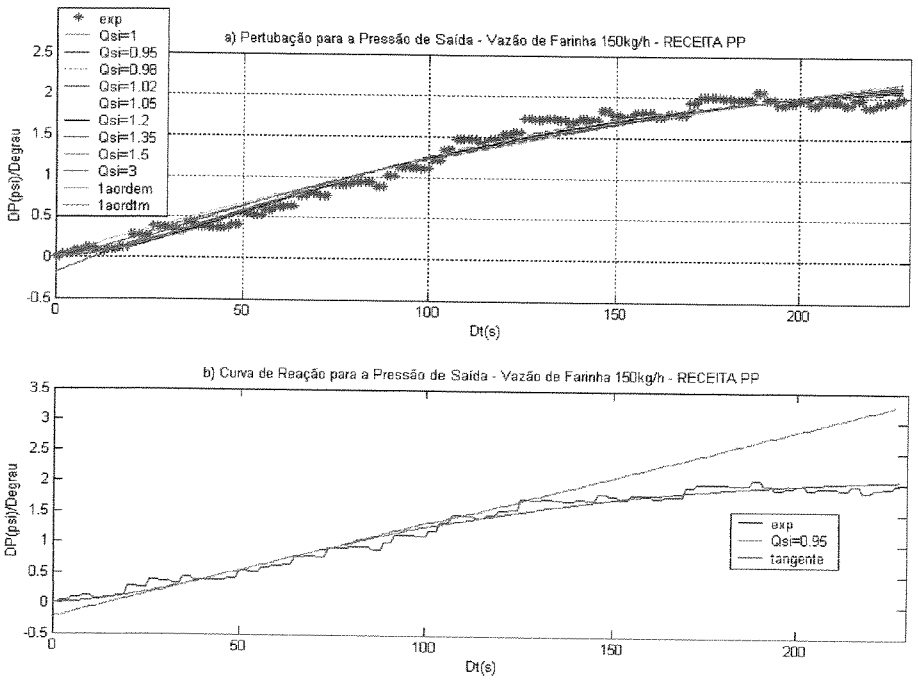


Figura 152: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h na Receita PP.

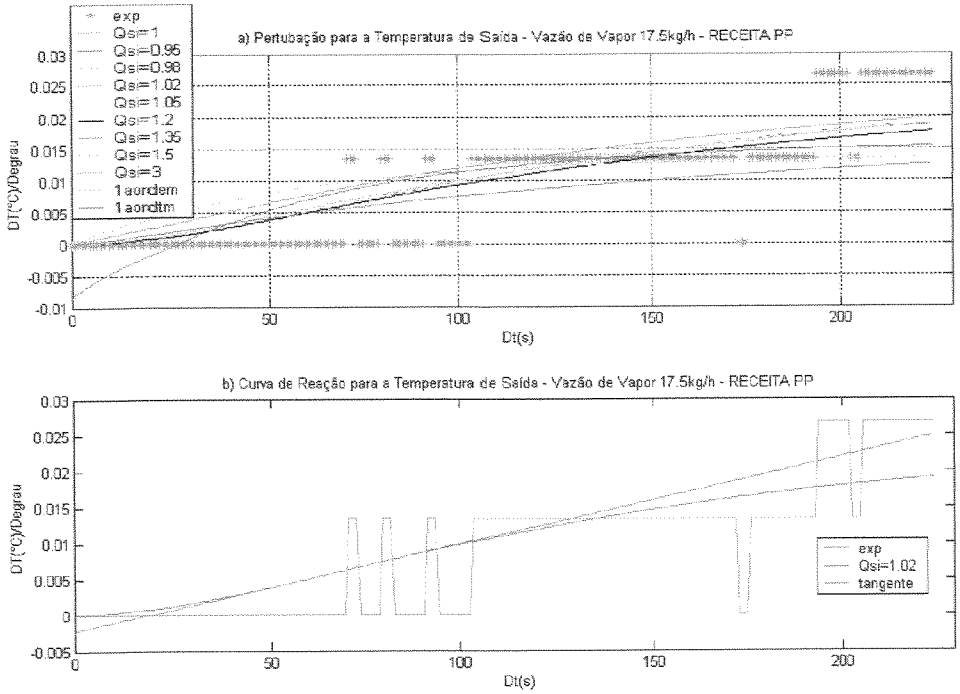


Figura 153: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita PP.

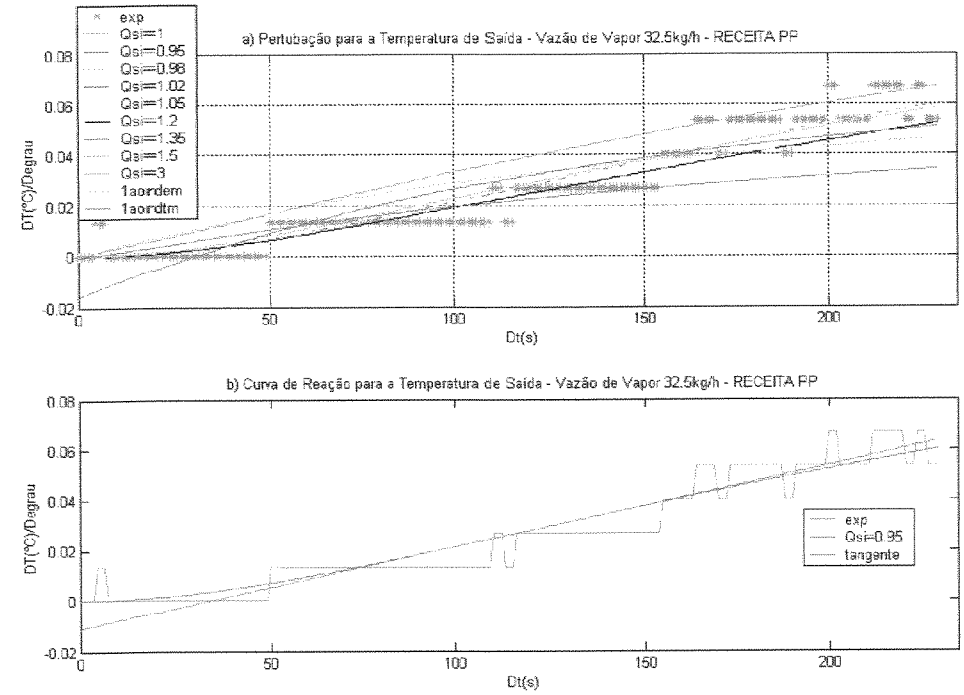


Figura 154: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita PP.

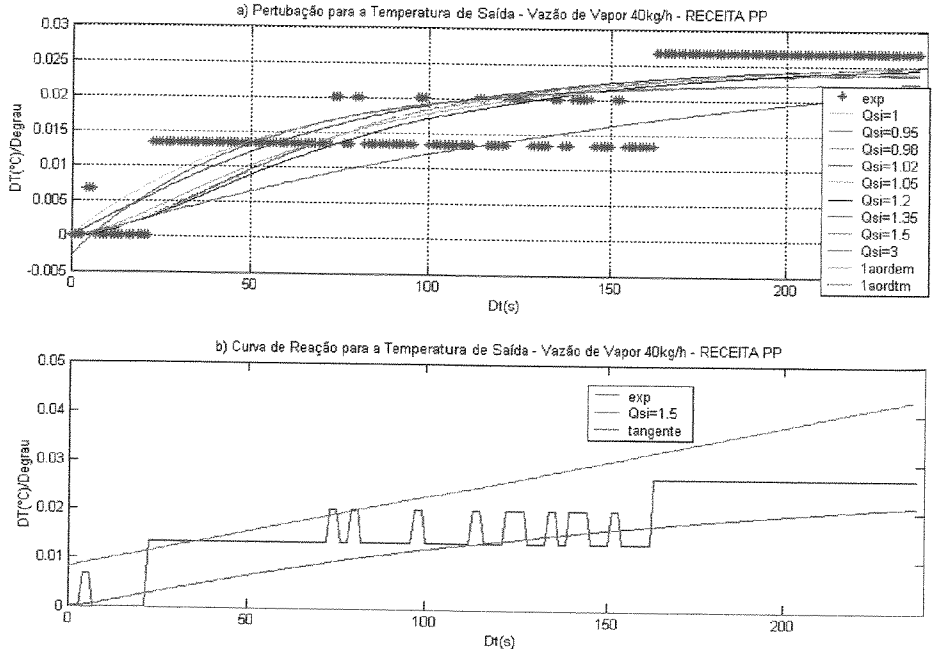


Figura 155: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita PP.

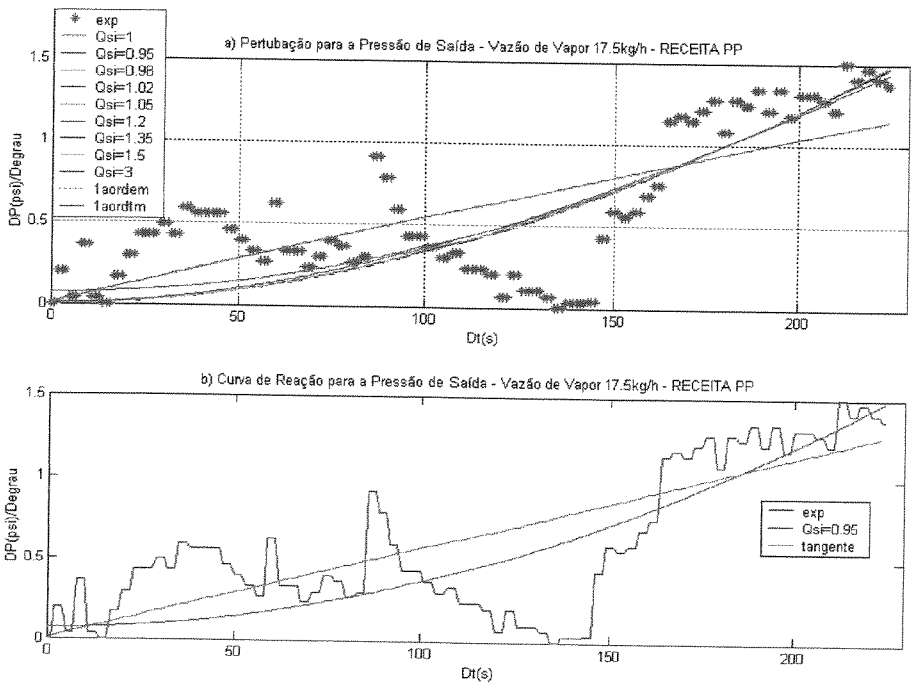


Figura 156: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita PP.

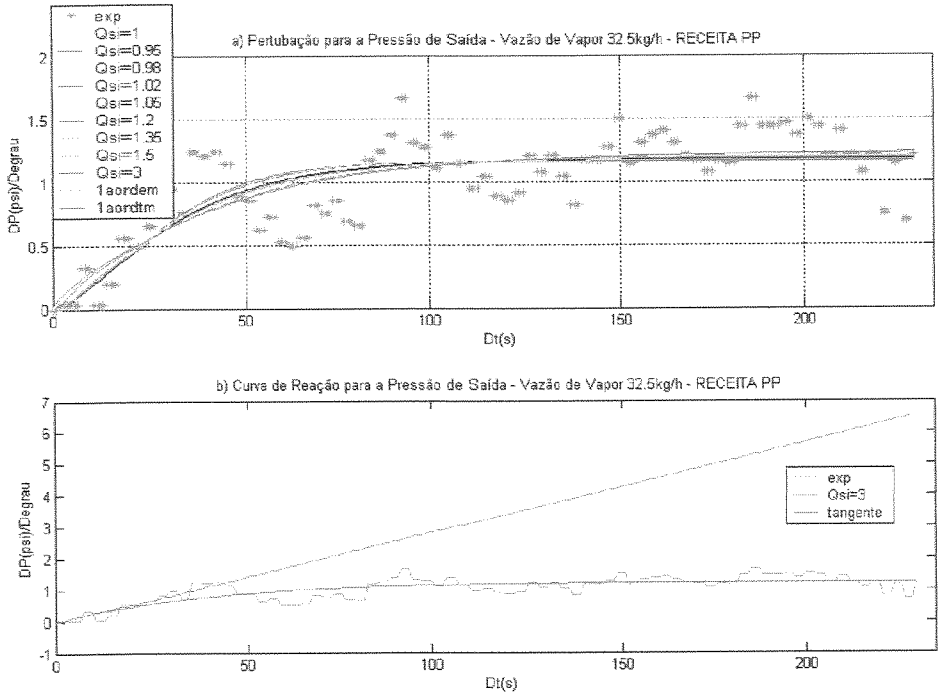


Figura 157: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita PP.

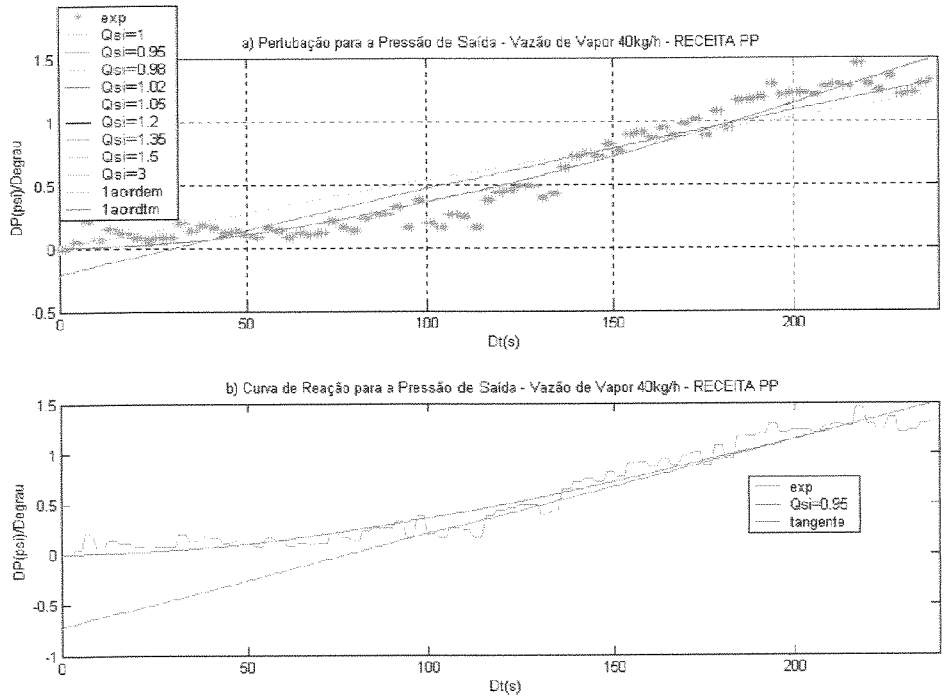


Figura 158: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita PP.

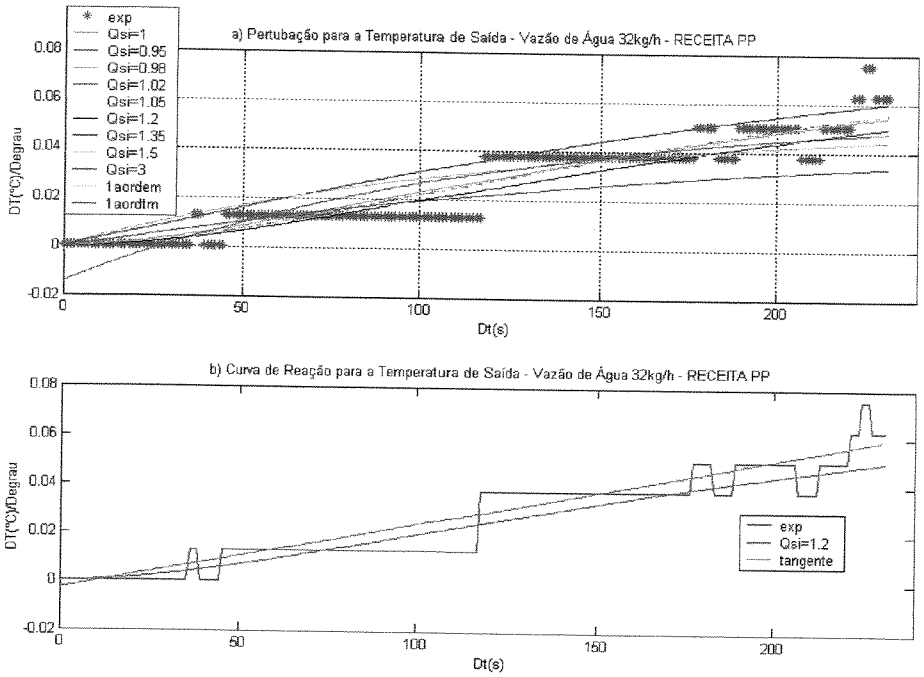


Figura 159: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita PP.

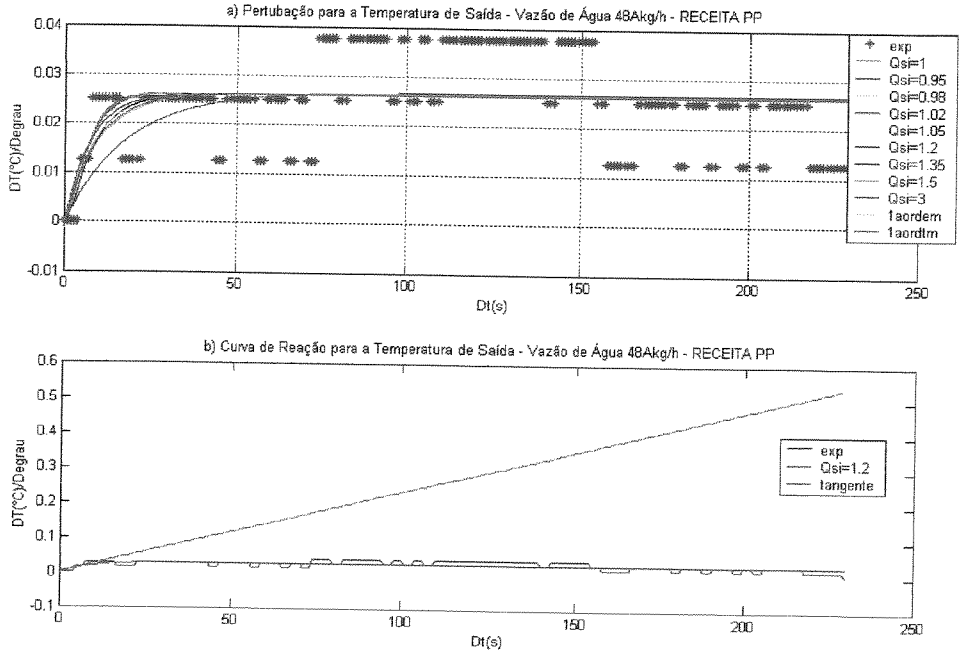


Figura 160: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita PP.

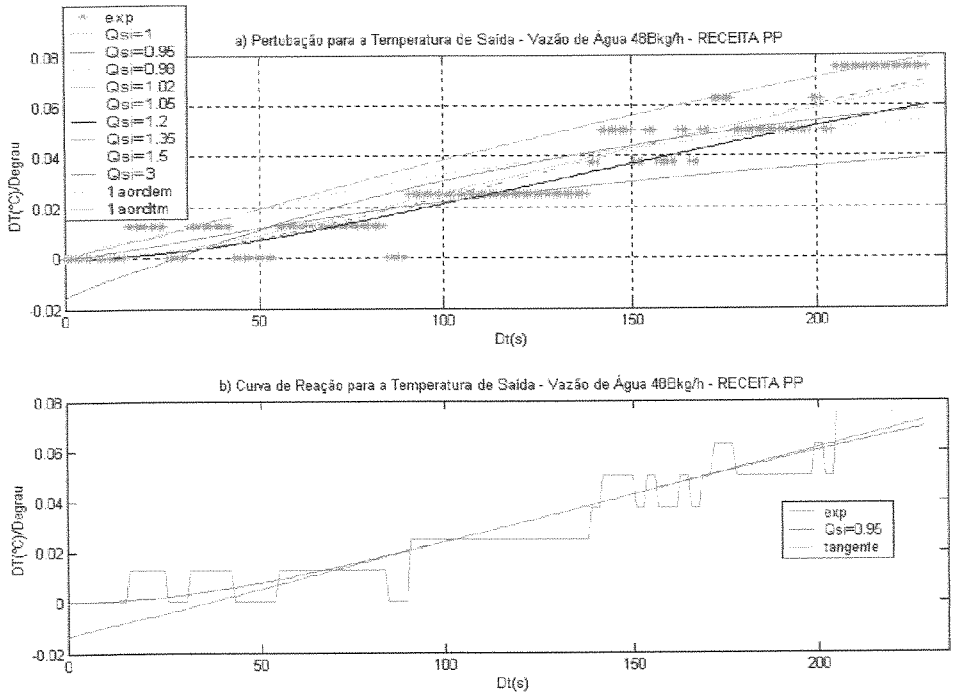


Figura 161: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^0C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita PP.

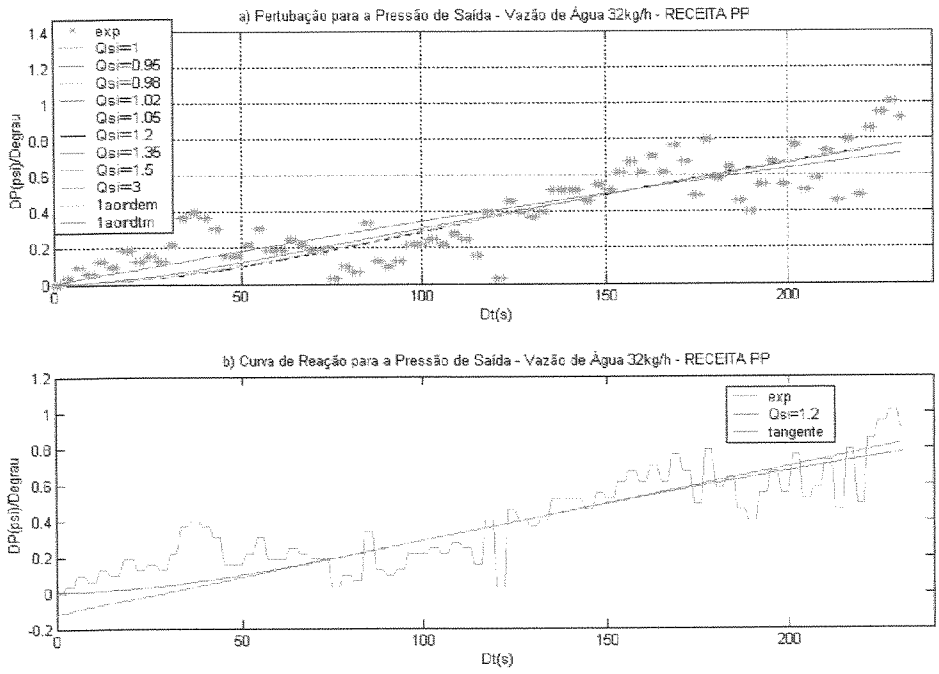


Figura 162: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita PP.

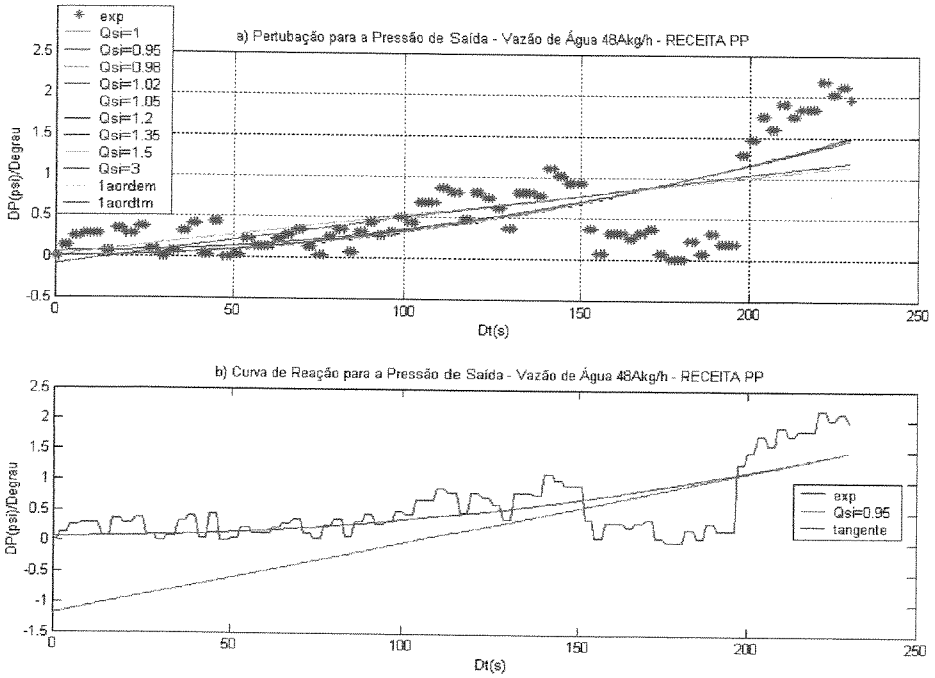


Figura 163: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita PP.

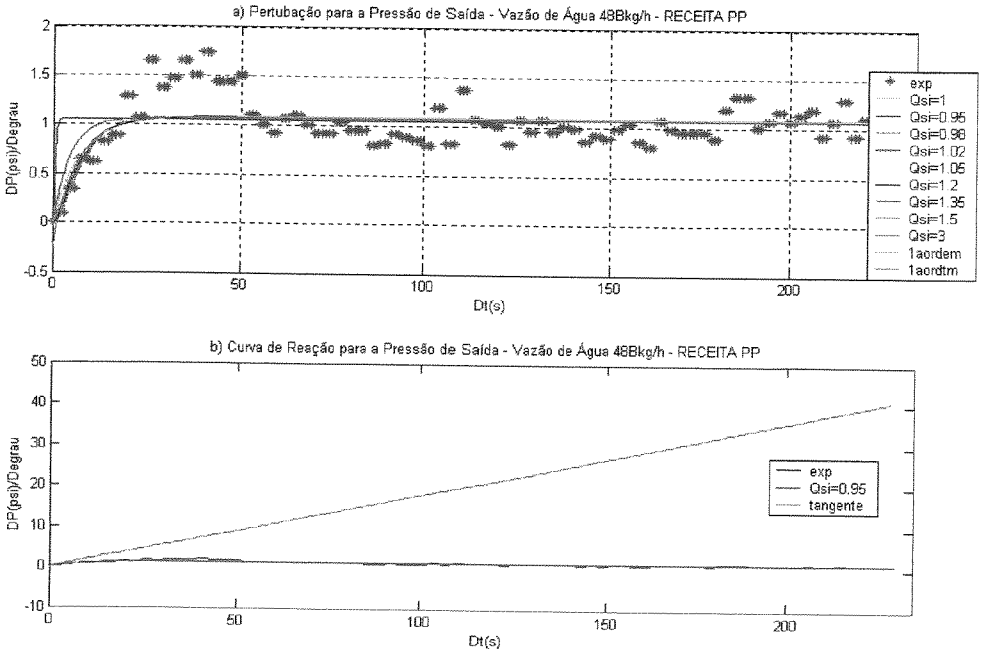


Figura 164: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita PP.

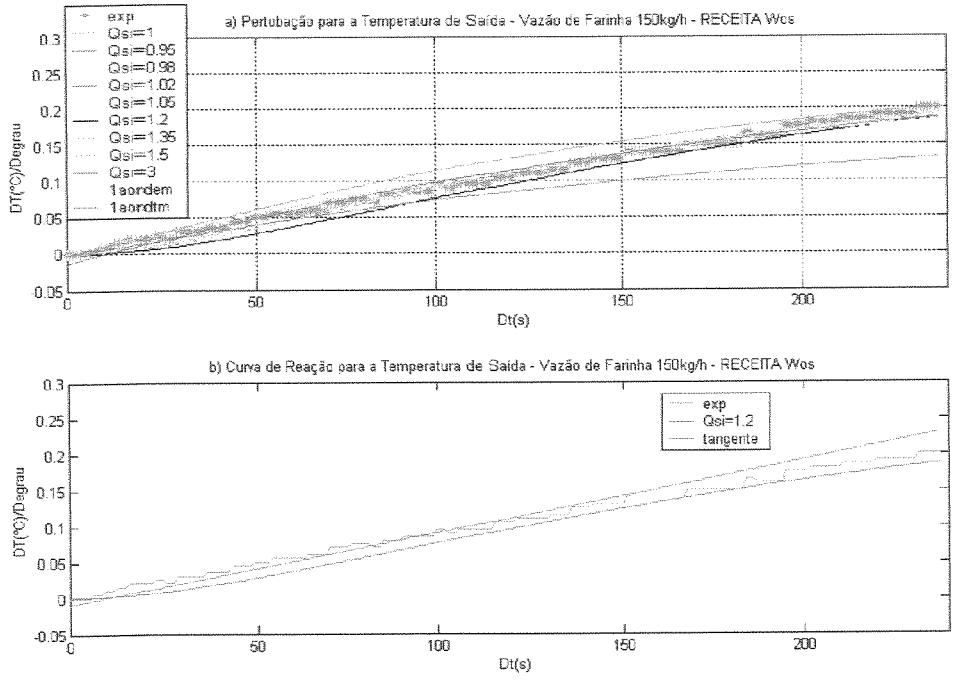


Figura 165: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h na Receita Wos.

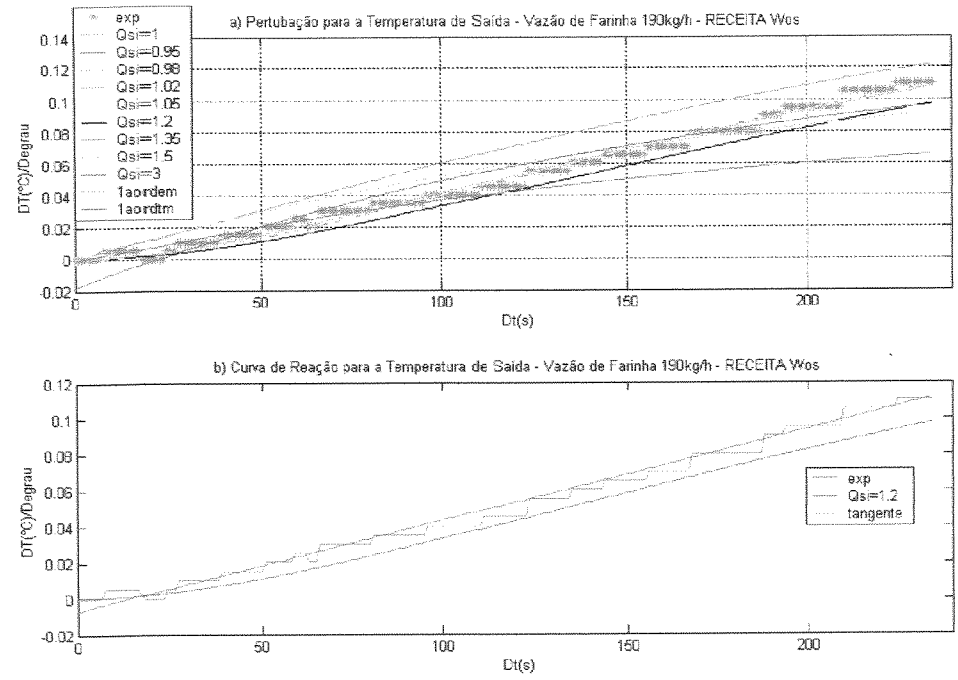


Figura 166: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita Wos.

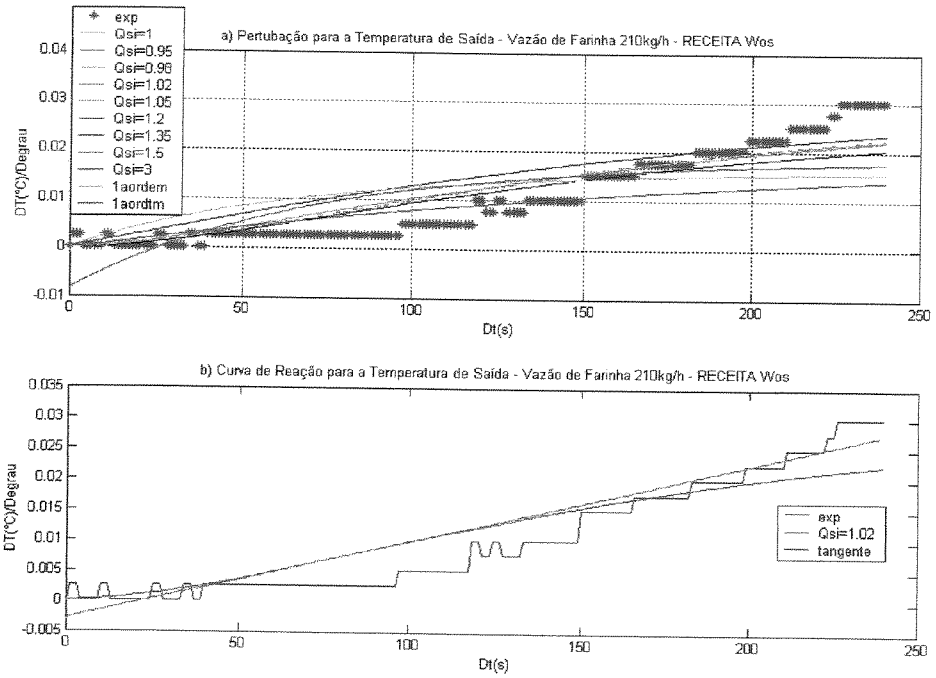


Figura 167: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^0C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita Wos.

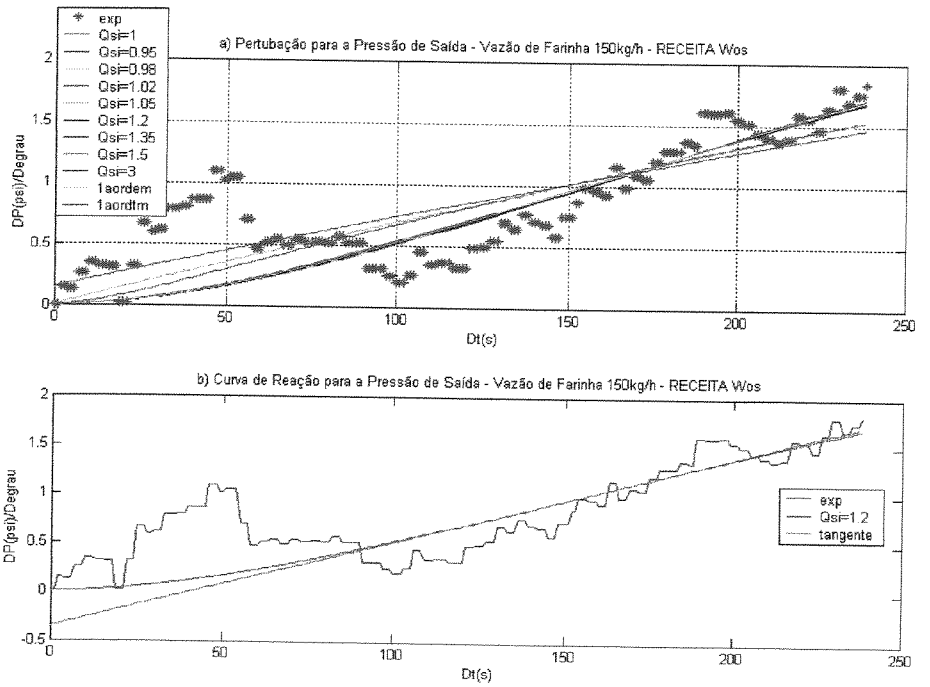


Figura 168: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 150 kg/h na Receita Wos.

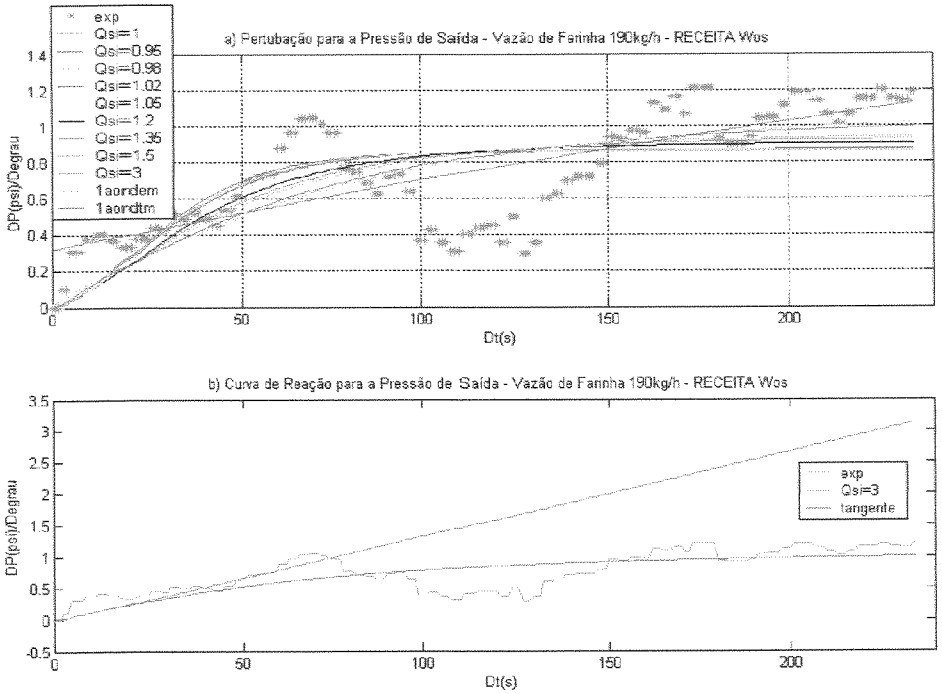


Figura 169: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 190 kg/h na Receita Wos.

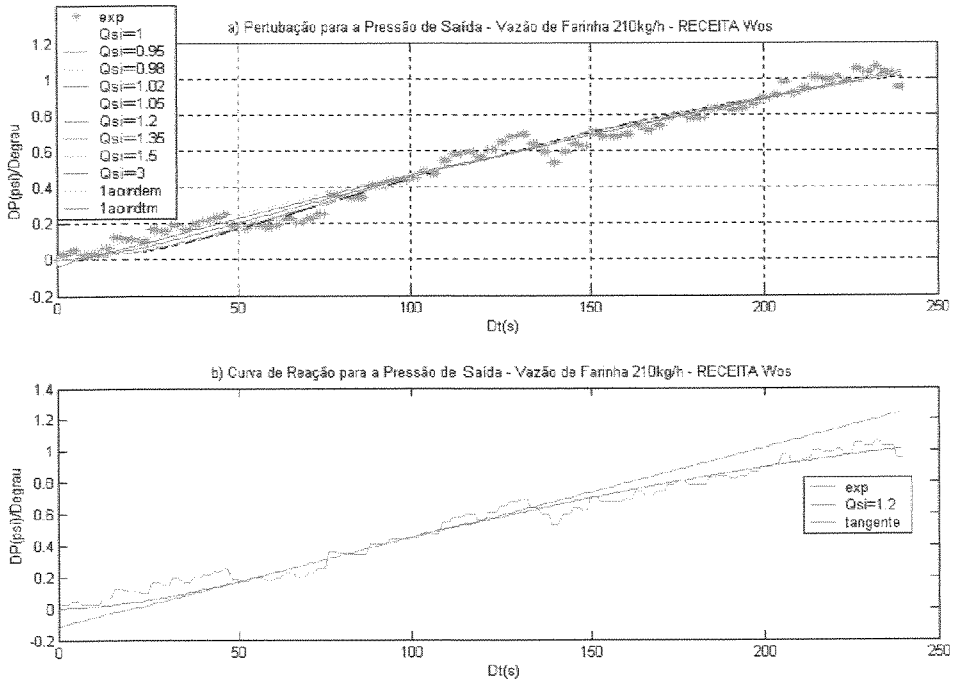


Figura 170: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Farinha 210 kg/h na Receita Wos.

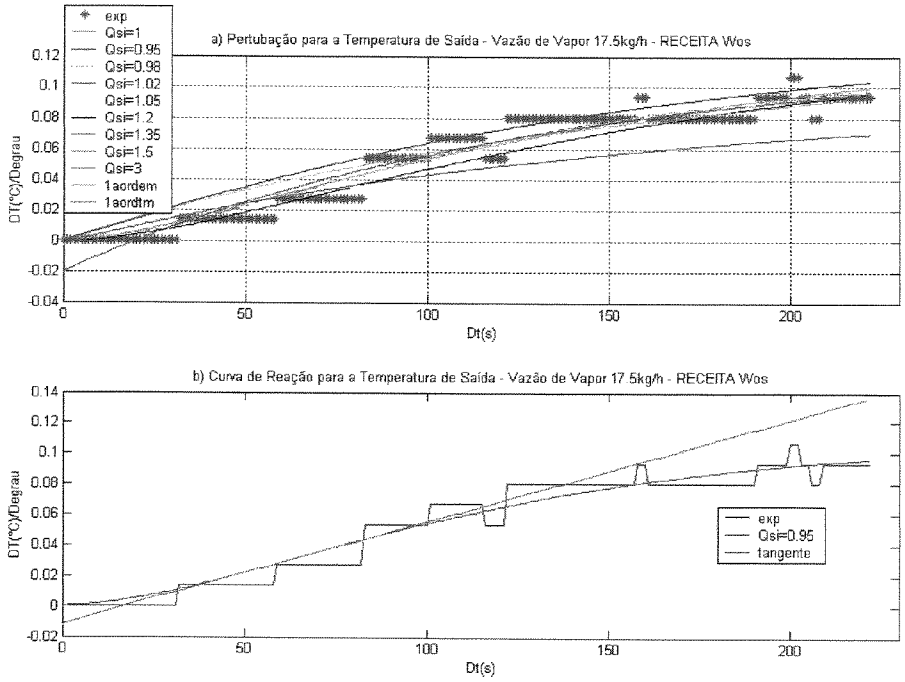


Figura 171: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita Wos.

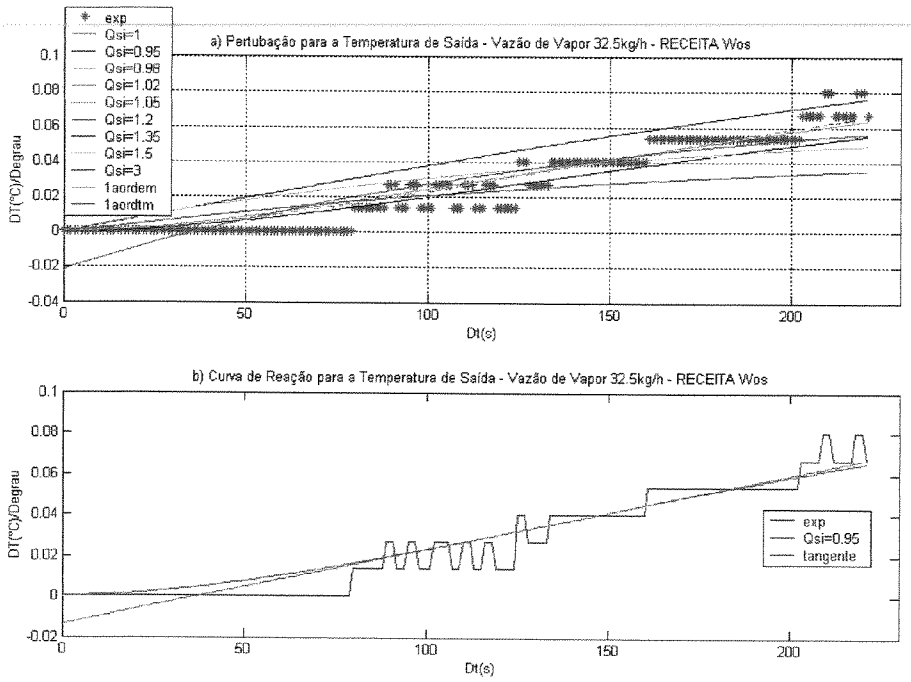


Figura 172: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita Wos.

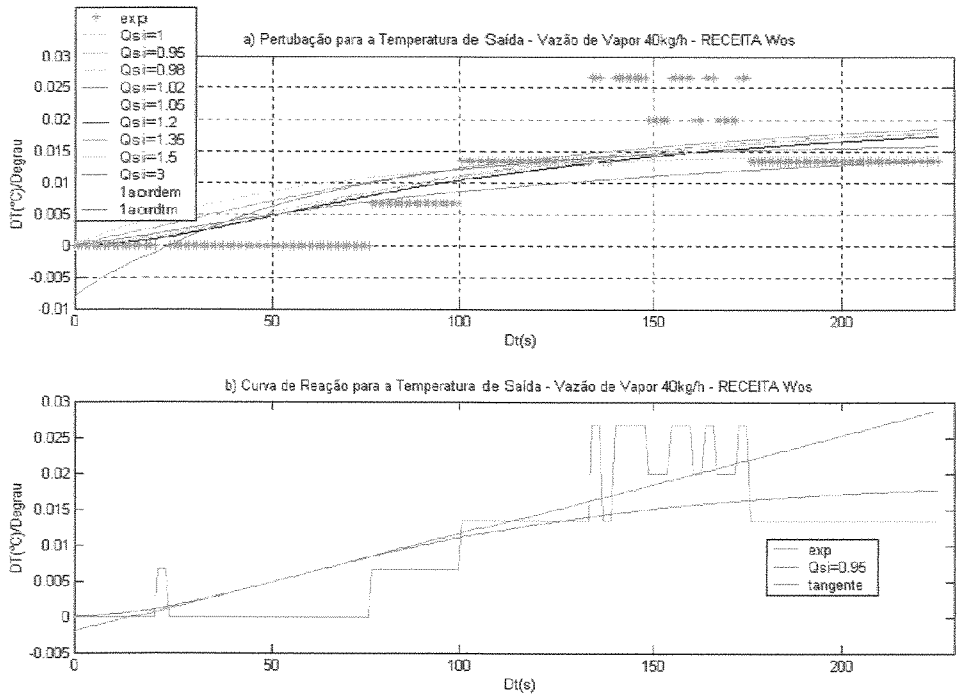


Figura 173: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^0C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita Wos.

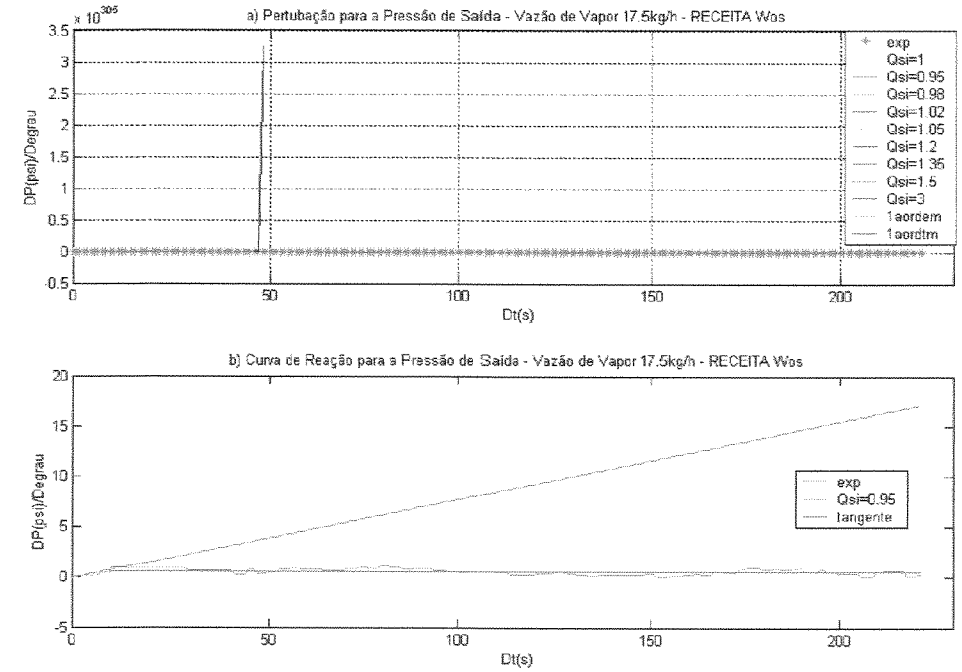


Figura 174: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 17,5 kg/h na Receita Wos.

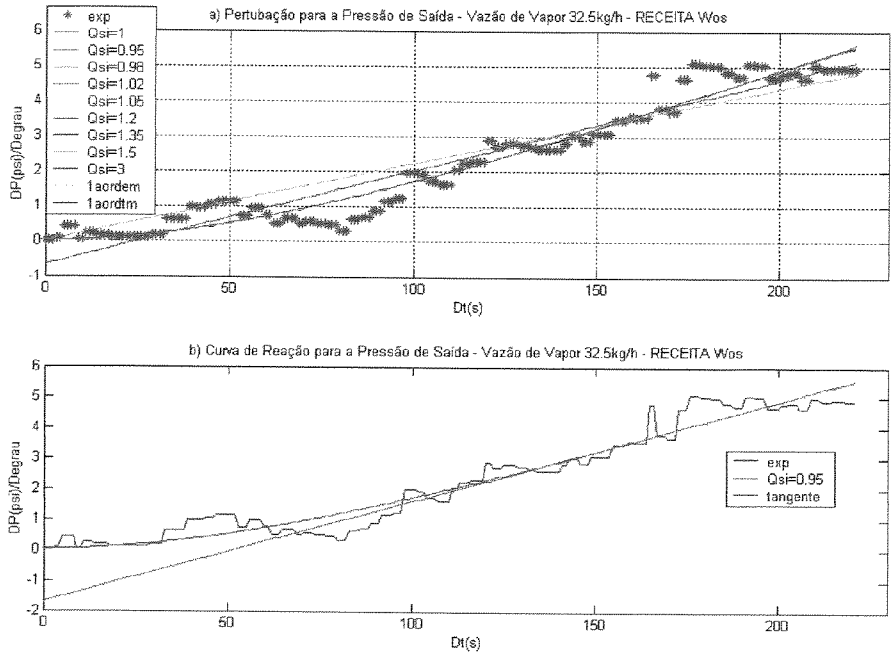


Figura 175: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 32,5 kg/h na Receita Wos.

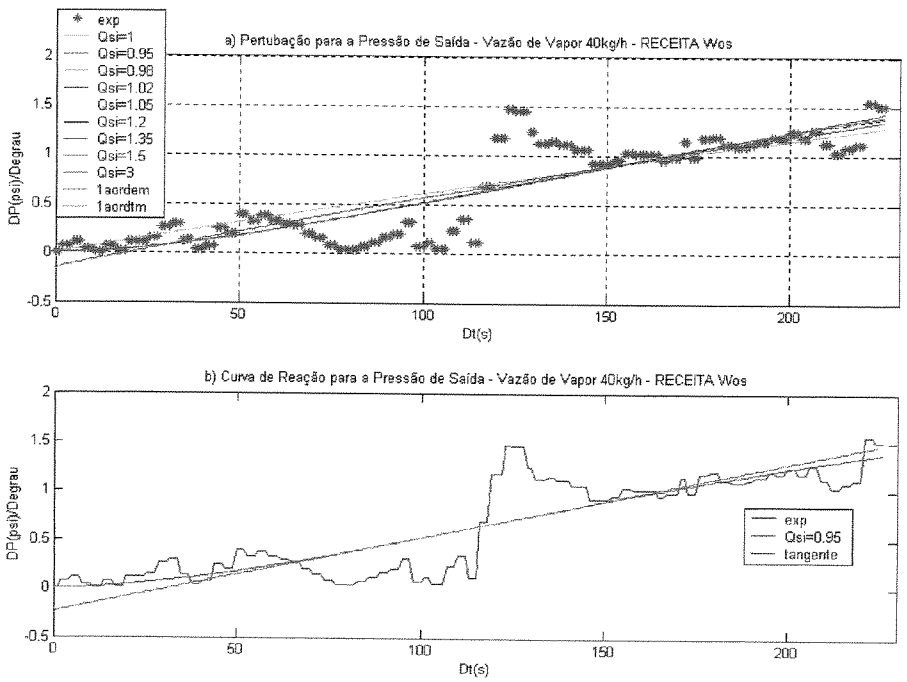


Figura 176: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Vapor 40 kg/h na Receita Wos.

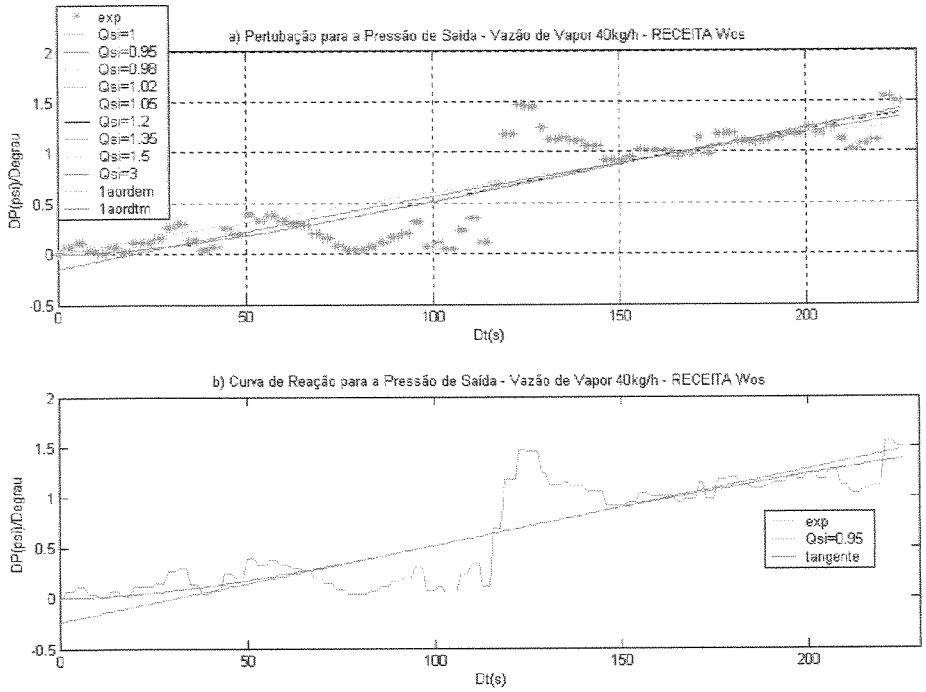


Figura 177: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita Wos.

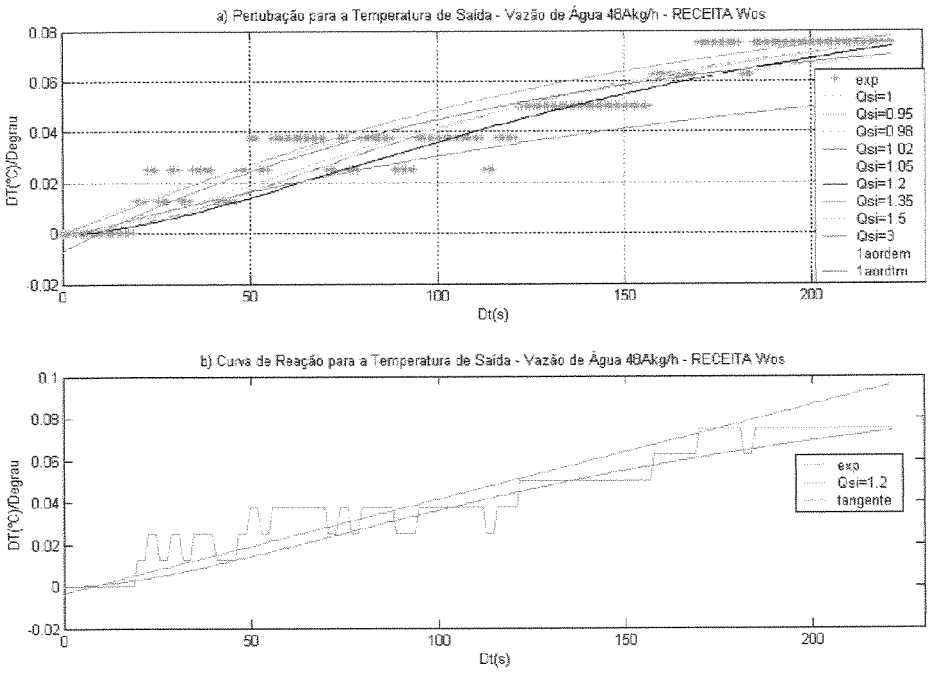


Figura 178: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita Wos.

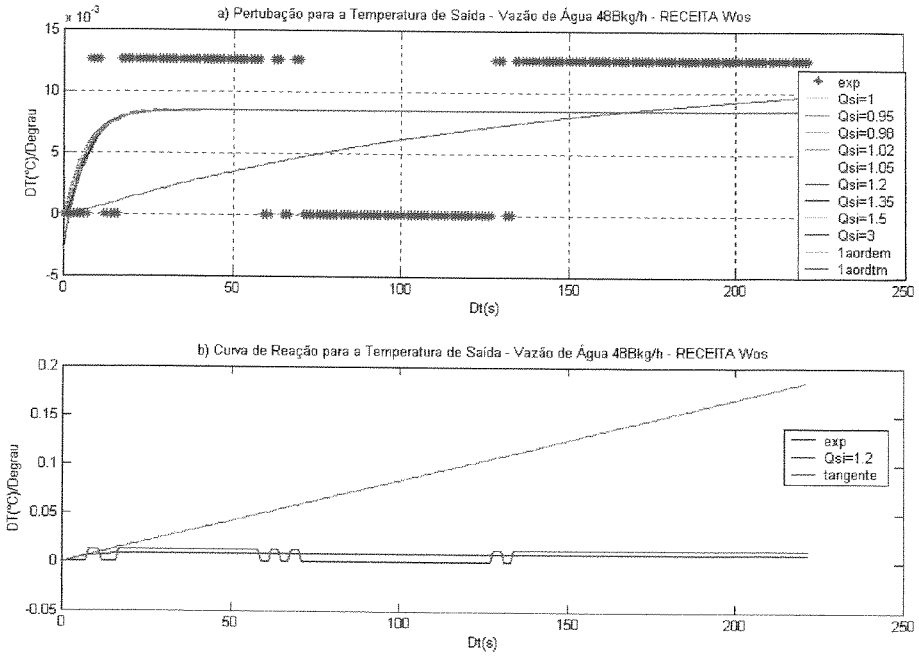


Figura 179: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Temperatura (^{0}C) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita Wos.

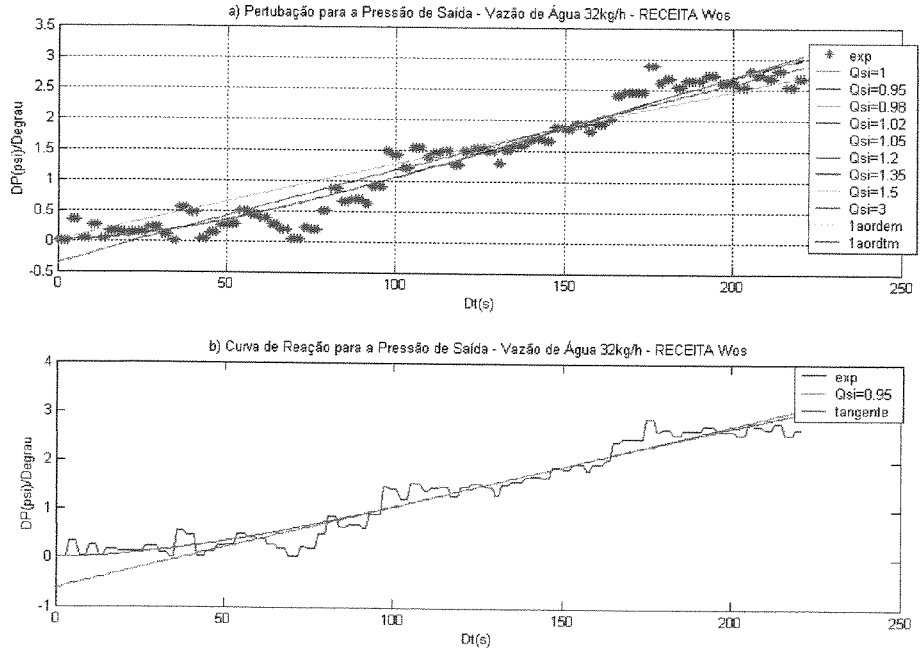


Figura 180: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 32 kg/h na Receita Wos.

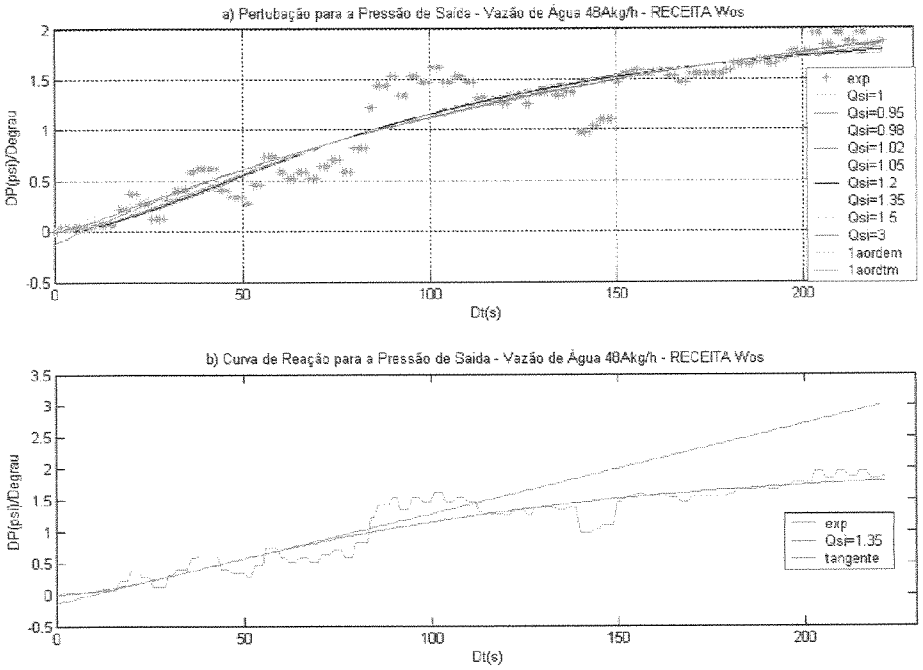


Figura 181: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48A kg/h na Receita Wos.

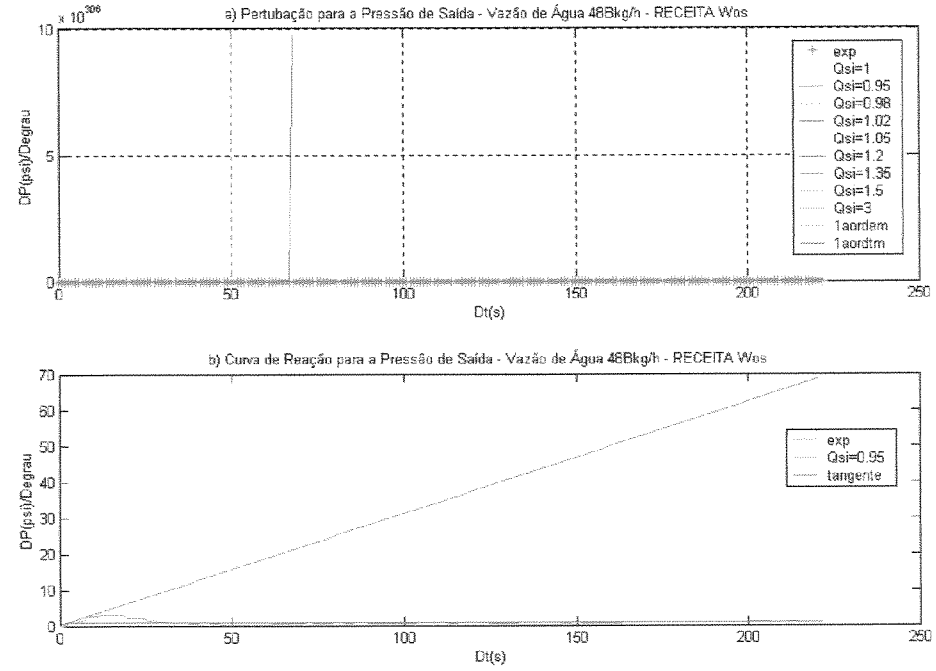


Figura 182: (a) Ajuste da Curva Resposta para a Pressão (psi) de Saída e (b) Curva Sigmoidal para a Vazão de Água 48B kg/h na Receita Wos.

XVI) ANEXO X

O Anexo X mostra o bloco funcional para a temperatura e pressão de saída, bem como o sistema *feedforward* empregados para o controlador MFA.

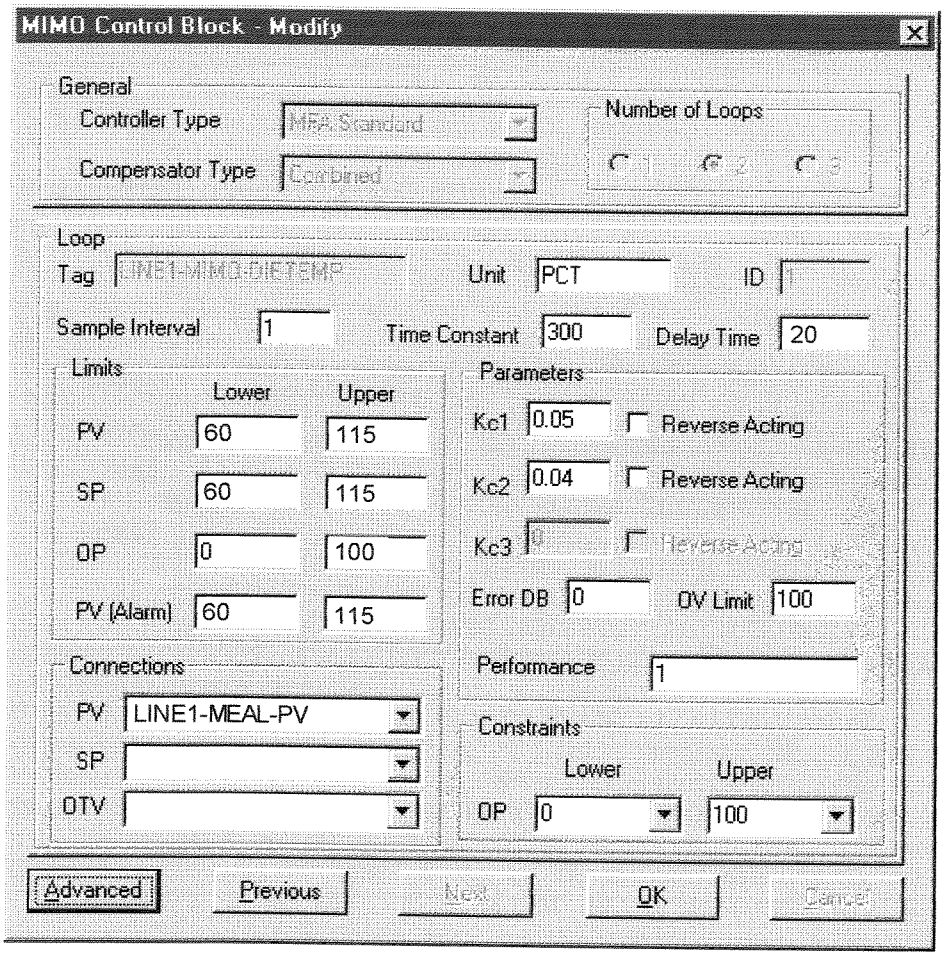


Figura 183: Tela para o Bloco Funcional de Controle MIMO de Temperatura no Teste Industrial.

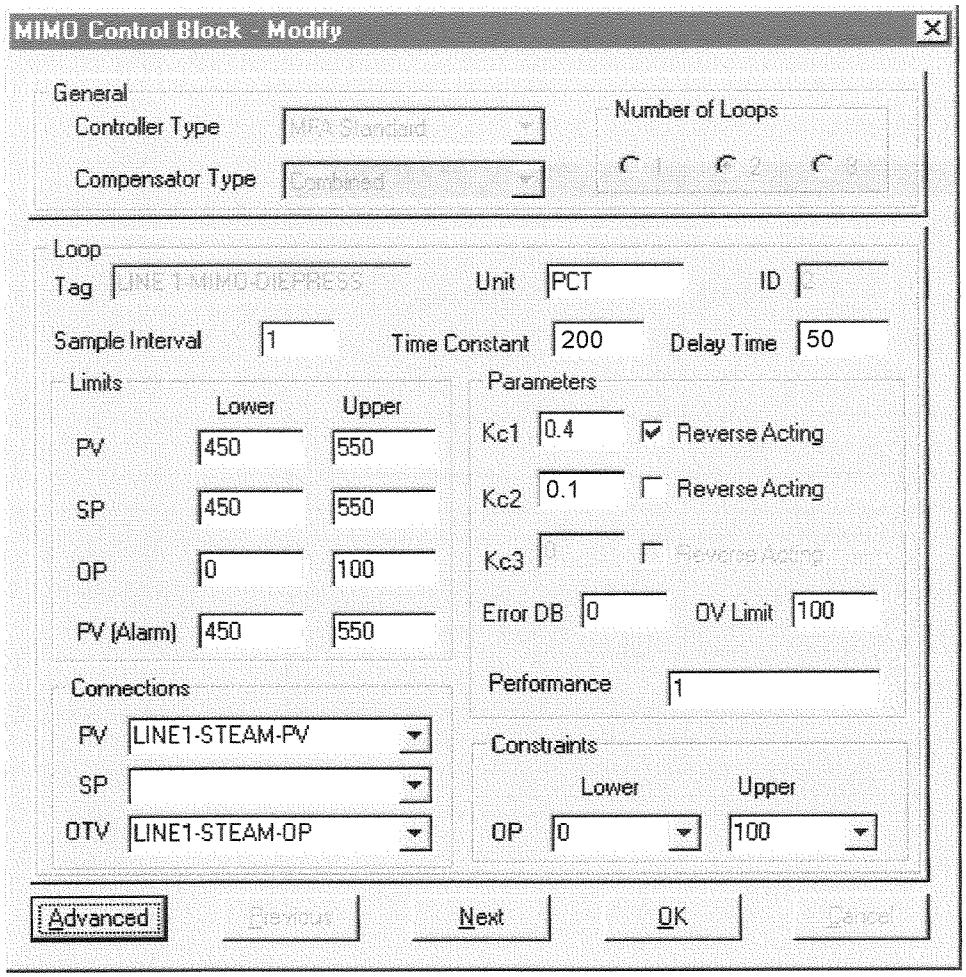


Figura 184: Tela para o Bloco Funcional de Controle MIMO de Pressão no Teste Industrial.

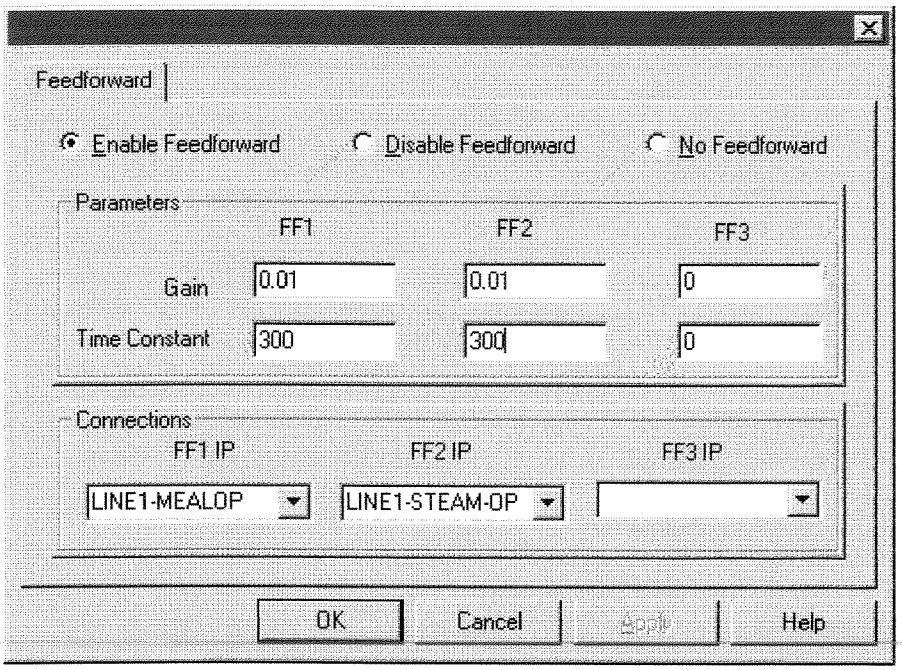


Figura 185: Exemplo do Sistema Feedforward Empregado junto ao Controle ModelFree Adaptive (MFA).

UNICAMP
BIBLIOTECA CENTRAL
SEÇÃO CIRCULANTE