

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

**AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO E DE
CONTROLE DA SECAGEM INDUSTRIAL
DO FARELO DE SOJA**

Gianini Regina Luz

Eng.^a Química, M.Sc., UEM, 2006

Orientadores: Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade

Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso

Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge

Tese de Doutorado submetida à Universidade Estadual de Maringá, como parte integrante dos requisitos necessários à obtenção do Grau de Doutor em Engenharia Química, área de Desenvolvimento de Processos.

Maringá – PR – Brasil

Fevereiro 2010

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
(Biblioteca Central - UEM, Maringá – PR., Brasil)

L979a Luz, Gianini Regina
Avaliação de estratégias de operação e de controle da secagem industrial do farelo de soja. / Gianini Regina Luz. -- Maringá, 2010.
xxi, 162 f. : il. figs., tabs. (algumas color.)

Orientador : Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade.

Orientador : Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso.

Co-orientador : Prof. Dr. Luiz Mário de Matos Jorge.

Tese (doutorado) - Universidade Estadual de Maringá, Departamento de Engenharia Química, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química, 2010.

1. Farelo de soja. 2. Secador rotativo indireto. 3. Secador rotativo direto. 4. Análise energética - Secagem indireta. 5. Análise energética - Secagem direta. 6. Controle de processo PID - Secador rotativo indireto. 7. Controle de processo PID - Secador rotativo direto. 8. Modelo dinâmico - Secagem - Controle de processo. I. Andrade, Cid Marcos Gonçalves. II. Paraíso, Paulo Roberto. III. Universidade Estadual de Maringá. Departamento de Engenharia Química. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química. IV. Título.

CDD 21.ed. 660.283

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE MARINGÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA QUÍMICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA QUÍMICA

Esta é a versão final da Tese de Doutorado apresentada por
Gianini Regina Luz perante a Comissão Julgadora do Curso de Doutorado em
Engenharia Química em 19 de fevereiro de 2010.

COMISSÃO JULGADORA



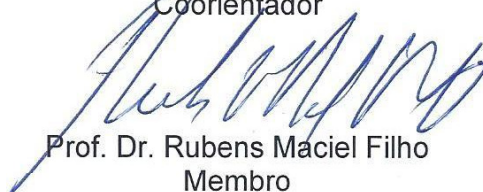
Prof. Dr. Cid Marcos Gonçalves Andrade
Orientador



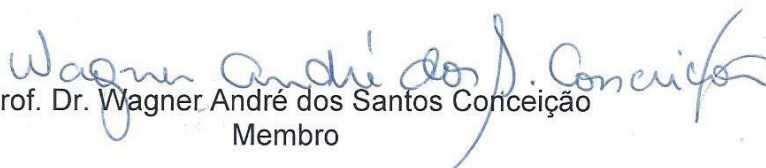
Prof. Dr. Paulo Roberto Paraíso
Orientador



Prof. Dr. Luiz Mario de Matos Jorge
Coorientador



Prof. Dr. Rubens Maciel Filho
Membro



Prof. Dr. Wagner André dos Santos Conceição
Membro



Prof. Dr. Edson Antonio da Silva
Membro



Prof. Dr. Oswaldo Curty da Motta Lima
Membro

O Senhor é meu Pastor; nada me faltará.
Deitar-me faz em pastos verdejantes;
guia-me mansamente a águas tranqüilas.
Refrigera a minha alma;
guia-me nas veredas da justiça por amor do seu Nome.
(Salmo 23: 1-3)

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Adilson e Rosicléia meus maiores exemplos, pelo amor incondicional dedicado e por participarem sempre das minhas decisões.

Aos meus irmãos Márcio e Leandro, pela valiosa amizade, alegria e atenção dispensada em todos os momentos de minha vida.

Ao meu grande amor Elio, pelo seu companheirismo, incentivo e por fazer meus dias tão felizes.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos

À Deus, por ter-me concedido os recursos necessários para vencer mais esta etapa da vida .

Aos professores Paulo, Luiz Mário, Cid e Wagner pelo apoio, incentivo, amizade, disponibilidade e confiança demonstrada durante a orientação deste trabalho.

À família Valin pela amizade, hospitalidade e incentivo, fazendo-me sentir em casa.

Aos alunos de iniciação científica, Ana Claudia e Vinícius, que não só contribuíram para este trabalho como para o meu desenvolvimento pessoal.

Às amigas Claudinéia A.Q. Geraldi, Leila D.F. Ferrari, Maria Carolina S. Gomes e Fernanda R.G. B. da Silva pela amizade, apoio, companheirismo, sugestões e agradável convivência em todos os momentos.

Ao departamento de Engenharia Química da UEM e seus funcionários que me ofereceram toda a estrutura necessária para a realização deste trabalho.

À Cooperativa Agrícola de Maringá (COCAMAR) e à Cooperativa Agrícola de Campo Mourão (COAMO) que disponibilizaram as amostras e os dados operacionais do farelo de soja.

Ao órgão financiador CAPES pela concessão da bolsa.

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO E DE CONTROLE DA SECAGEM INDUSTRIAL DE FARELO DE SOJA

AUTOR: GIANINI REGINA LUZ

ORIENTADORES: PROF. DR. CID MARCOS GONÇALVES ANDRADE

PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

CO-ORIENTADOR: PROF. DR. LUIZ MÁRIO DE MATOS JORGE

Tese de Doutorado; Universidade Estadual de Maringá, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Química – PEQ, Av. Colombo 5790, D – 90, CEP: 87020-900, Maringá – PR – Brasil, defendida em 19 de fevereiro de 2010, 162 p.

RESUMO

O farelo de soja é um produto de grande consumo no mercado interno e externo, essencialmente como ração animal. No entanto, as especificações nutricionais de comercialização deste produto dependem fundamentalmente das condições de secagem. Deste modo, a utilização convencional do secador rotativo indireto nesta operação precisa atender a estas especificações, as quais impõem altos custos operacionais em função do alto consumo energético. Neste sentido, verifica-se a necessidade de investigar outros tipos de secadores com operação mais eficiente e econômica, e que apresentem produtos de qualidade a baixo custo. Assim, visando atender a esses objetivos, decidiu-se estudar e comparar a secagem do farelo em secadores rotativo direto e indireto.

A escolha do secador rotativo direto está relacionada a utilização do ar para promoção da secagem e ao fato do farelo entrar no secador com altas temperaturas decorrentes de etapas anteriores de processo. Este tipo de secador fornece bons gradientes de temperatura e de umidade entre o sólido e o ar no seu interior e uma maior facilidade de trabalho com as variáveis manipuladas de entrada do processo; assim, espera-se que estas características garantam boa qualidade do produto final. Entretanto, seu projeto e sua utilização efetivos dependem de análises comparativas com o secador rotativo indireto; sendo estas, o consumo energético, a dinâmica de secagem, e a aplicação do sistema de controle *Proporcional-Integral-Derivative (PID)*.

As formas de secagem direta e indireta foram modeladas em condições permanente e transiente. A condição permanente foi usada para a avaliação dos consumos energéticos para ambas as formas de secagem. Observou-se que o consumo de energia na forma direta foi bem menor do que na forma indireta.

A análise da dinâmica do processo foi realizada a partir da simulação do modelo matemático em regime transiente. Simulações da secagem foram realizadas em diversas condições operacionais, sempre considerando a umidade e a temperatura na saída do secador como parâmetro representativo da qualidade do produto. Observou-se que os resultados dessas variáveis no tempo se comportaram de forma semelhante ao de alguns materiais apresentados na literatura. Além disso, verificou-se que as variações da temperatura do vapor nos tubos ou do ar injetado, da umidade inicial do farelo e da velocidade de deslocamento do farelo no secador foram as principais responsáveis pela alteração do regime no secador rotativo operando de forma direta ou indireta.

Dada a consistência dos modelos e os efeitos das perturbações de processo, o sistema de controle *PID* foi sugerido para manter a umidade do farelo na descarga dos secadores próxima a 0,14 (b.s.) por meio da manipulação da velocidade de deslocamento do farelo e da temperatura de vapor nos tubos, para o secador rotativo indireto; e, da manipulação da velocidade de deslocamento do farelo e da temperatura do ar de secagem, para o secador rotativo direto.

O controle *PID* foi avaliado para as estruturas *Single Input and Single Output (SISO)* e *Multiple Input and Single Output (MISO)*. As respostas dinâmicas da umidade do farelo na saída foram analisadas em malha aberta e fechada para perturbações em degrau, pseudo-aleatórias e em impulso. O critério de desempenho do *PID* entre os casos propostos foi estudado por comparação em termos de frequência e magnitude e, pela *Integrated Squared Error (ISE)*. Adicionalmente, as análises do *PID SISO* e *MISO* também foram realizadas para as condições de operação com menores consumos energéticos para verificar em que condições a controlabilidade poderia ser maior.

Os resultados de aplicação do controle mostraram que o *PID SISO* se destacou ao manipular a temperatura do vapor nos tubos e a temperatura de entrada do ar. Além disso, os resultados da aplicação do *PID SISO* e *MISO* para as condições de operação com os menores consumos energéticos mostraram que, para os secadores rotativos indireto e direto, a controlabilidade foi melhor em temperaturas mais elevadas.

A utilização do secador rotativo direto se mostrou mais vantajosa que a do secador rotativo indireto no que se refere ao consumo energético e à controlabilidade.

AVALIAÇÃO DE ESTRATÉGIAS DE OPERAÇÃO E DE CONTROLE DA SECAGEM INDUSTRIAL DE FARELO DE SOJA

AUTHOR: GIANINI REGINA LUZ

SUPERVISOR: PROF. DR. CID MARCOS GONÇALVES ANDRADE

PROF. DR. PAULO ROBERTO PARAÍSO

PROF. DR. LUIZ MÁRIO DE MATOS JORGE

Doctor Thesis; Chemical Engineering Graduate Program; State University of Maringá, Av. Colombo 5790, D – 90, CEP: 87020-900, Maringá – PR, Brazil, presented on February, 19th 2010, 162 p.

ABSTRACT

Soybean meal is a product of high consumption in the national and international markets, essentially, as animal feed. However, its nutritional specifications of commercialization fundamentally depend on drying conditions. Therefore, the conventional utilization of the indirect rotary dryer requires these specifications in this operation that impose high operational costs due to enormous amount of energy consumed. As such, there is necessity of investigating other types of dryers with more efficient and economical operation and that present quality products at low cost. Then, in order to attend these aims, it was decided to study and compare the drying of the soybean meal in direct and indirect rotary dryers.

The choice of the direct rotary dryer is related to utilization of air to promote the drying and the fact that the soybean meal enters into the dryer at high temperatures due to previous stages of the process. This type of dryer provides good gradients of temperature and moisture between the solid and the air inside the dryer and shows greater facility to work with the manipulated variables of input of the process; then, it is expected that these characteristics guarantee good quality in the final product. However, its effective design and usage depends on comparative analyses with the indirect rotary dryer; being these ones, the energetic consumption, dynamic of drying, and application of Proportional-Integral-Derivative (*PID*) control system.

The forms of direct and indirect drying were modeled in permanent and transient conditions. The permanent condition was used to evaluate the energy consumption for the

kinds of drying. It was observed that the energy consumption in a direct kind was much smaller than in an indirect kind.

The analysis of the dynamics of the process was carried out from the simulation of mathematical model in transient regime. Drying simulations were realized in various operational conditions, taking into account always output moisture and temperature in the dryer, as a representative parameter of quality of the product. It was observed that the results of these variables behaved similar manner to some of the materials along the time as shown in the literature. In addition, it was verified that the variations of steam temperature in the tubes or injected air temperature, initial moisture and speed of displacement of the soybean meal in the dryer were the main responsible for changing of the regime in the rotary dryer operating direct or indirect kind.

Giving the consistency of the models and the effects of process disturbances, the *PID* control system was suggested to keep the moisture of the soybean meal in the discharge of dryers near 0.14 (d.b.) by manipulating the speed of displacement of the soybean meal and steam temperature in the tubes for the indirect rotary dryer and the manipulation of the speed of displacement of the soybean meal and drying air temperature for the direct rotary dryer.

The *PID* control was assessed for the structures of Single Input and Single Output (*SISO*) and Multiple Input and Single Output (*MISO*). The dynamic responses of the soybean meal moisture in the output dryer were analyzed for the step, pseudo-random and impulse disturbances by open and closed loop. The performance criterion of *PID* control among the proposed cases was studied by comparison in terms of frequency, magnitude and the Integrated Squared Error. Additionally, the analyses of *SISO* and *MISO* *PID* were also realized for the operational conditions with lower energy consumption to verify the conditions that have the best controllability.

The results of application showed that the *PID SISO* stood out to manipulate the temperature of steam in the tubes and inlet air temperature. Moreover, the results of application of *PID SISO* and *MISO* for operation conditions with lower energy consumption showed that for indirect and direct rotary dryers the controllability is better at higher temperatures.

The utilization of direct rotary dryer revealed to be more advantageous than the indirect rotary dryer with reference to energy consumption and the controllability.

ÍNDICE

CAPÍTULO I.....	1
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 MOTIVAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO	4
1.3 ESTRUTURA DA TESE	4
1.4 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO.....	5
1.5 TRABALHOS APRESENTADOS E PUBLICADOS.....	5
CAPÍTULO II	7
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1 SECAGEM	7
2.1.1 <i>Principais Etapas de Produção do Farelo de Soja</i>	7
2.1.2 <i>Características da Secagem do Farelo de Soja</i>	9
2.1.2.1 <i>Cinética de secagem do farelo de soja</i>	9
2.1.2.2 <i>Transferência de calor e de massa do farelo de soja</i>	12
2.1.2.3 <i>Isotermas de equilíbrio do farelo de soja</i>	15
2.2 SECADORES	17
2.2.1 <i>Secadores Rotativos Contínuos</i>	18
2.2.1.1 <i>Secador rotativo indireto</i>	19
2.2.1.2 <i>Secador rotativo direto</i>	20
2.3 CONSUMO ENERGÉTICO DOS SECADORES ROTATIVOS.....	22
2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DOS SECADORES ROTATIVOS DIRETO E INDIRETO.....	24
2.5 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS	29
2.5.1 <i>Controladores em Feedback</i>	34
2.5.1.1 <i>Controle PID</i>	37
2.5.1.1.1 <i>Algoritmo do PID</i>	37
2.5.1.1.2 <i>Parâmetros de sintonia do PID</i>	38
2.5.1.1.3 <i>Critérios de desempenho do PID</i>	40
2.5.1.1.4 <i>Entradas de processo padrão</i>	43
2.5.1.1.5 <i>Critérios do modelo de processo para o desenvolvimento de sistemas de controle feedback</i>	45
2.5.1.1.6 <i>Variáveis manipuladas, perturbadas e controladas</i>	46
2.6 CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO II	46

CAPÍTULO III.....	48
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	48
3.1 MATERIAIS.....	48
3.1.1 <i>Secador Rotativo da COAMO.....</i>	48
3.1.2 <i>Farelo de Soja.....</i>	48
3.2 ESTUDO DO SECADOR ROTATIVO INDIRETO.....	49
3.2.1 <i>Modelagem Matemática Dinâmica do Secador Rotativo Indireto.....</i>	49
3.2.1.1 <i>Balanço de massa.....</i>	50
3.2.1.2 <i>Balanço de energia.....</i>	51
3.2.1.3 <i>Equações complementares.....</i>	53
3.2.2 <i>Solução Numérica do Modelo do Secador Rotativo Indireto.....</i>	56
3.2.3 <i>Validação do Modelo do Secador Rotativo Indireto.....</i>	57
3.2.4 <i>Influência das Condições Operacionais.....</i>	57
3.2.5 <i>Consumo Energético.....</i>	58
3.2.5.1 <i>Consumo de energia na secagem do farelo no sec. rotativo indiret... 58</i>	
3.2.5.2 <i>Consumo de energia na secagem do farelo aquecendo a água da temperatura ambiente até temperatura do vapor de secagem.....</i>	59
3.2.6 <i>Desenvolvimento do Controle PID para o Secador Rotativo Indireto</i>	60
3.2.6.1 <i>Desenvolvimento do modelo dinâmico de secagem do farelo.....</i>	60
3.2.6.2 <i>Dinâmica de secagem do farelo.....</i>	61
3.2.6.3 <i>Aplicação do controle PID no secador rotativo indireto.....</i>	64
3.2.6.3.1 <i>Controle PID SISO.....</i>	65
3.2.6.3.2 <i>Ajuste o sistema de controle PID.....</i>	68
3.2.6.3.3 <i>Controle PID MISO.....</i>	69
3.2.6.4 <i>Validação do modelo dinâmico e da ação do controle PID.....</i>	70
3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DINÂMICA DO SECADOR ROTATIVO DIRETO.....	71
3.3.1 <i>Modelagem Matemática do Secador Rotativo Direto em Regime Transiente.....</i>	71
3.3.1.1 <i>Balanço de massa.....</i>	72
3.3.1.2 <i>Balanço de energia.....</i>	74
3.3.1.3 <i>Equações complementares.....</i>	77
3.3.2 <i>Solução Numérica e Validação do Modelo do Secador Rotativo Direto</i>	78
3.3.3 <i>Influência da Variação das Condições Operacionais.....</i>	79
3.3.4 <i>Análise Energética do Secador Rotativo Direto.....</i>	80
3.3.4.1 <i>Consumo de energia na secagem do farelo no secador considerando o aquecimento do ar ambiente à temperatura de secagem.....</i>	80
3.3.5 <i>Desenvolvimento do Controle PID para o Secador Rotativo Direto... 81</i>	
3.3.5.1 <i>Desenvolvimento do modelo de secagem do farelo.....</i>	81
3.3.5.2 <i>Dinâmica de secagem do farelo.....</i>	82

3.3.5.3	<i>Aplicação do controle PID no secador rotativo direto</i>	86
3.3.5.3.1	<i>Controle PID SISO</i>	87
3.3.5.3.2	<i>Controle PID MISO</i>	87
3.4	CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO III.....	88
CAPÍTULO IV		90
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES		90
4.1	SECADOR ROTATIVO INDIRETO.....	90
4.1.1	<i>Solução Numérica e Validação do Modelo Matemático</i>	91
4.1.2	<i>Influência da Variação das Condições Operacionais</i>	95
4.1.3	<i>Avaliação Energética do Secador Rotativo Indireto</i>	100
4.1.3.1	<i>Consumo de energia na secagem do farelo no sec. rotativo indireto</i>	100
4.1.3.2	<i>Consumo de energia na secagem do farelo aquecendo a água da temperatura ambiente a temperatura do vapor de secagem</i>	102
4.1.4	<i>Controle PID para o Secador Rotativo Indireto</i>	104
4.1.4.1	<i>Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle PID SISO</i> .	104
4.1.4.2	<i>Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle PID MISO</i>	109
4.1.4.3	<i>Desempenho dos controles PID SISO e MISO</i>	111
4.1.4.4	<i>Validação do modelo dinâmico e da ação do controle PID</i>	113
4.1.4.5	<i>Controles PID SISO e MISO para as melhores condições energéticas</i>	115
4.2	CONCLUSÕES SOBRE O SECADOR ROTATIVO INDIRETO	121
4.3	SECADOR ROTATIVO DIRETO.....	122
4.3.1	<i>Solução Numérica e Validação do Modelo Matemático</i>	122
4.3.2	<i>Influência das Condições Operacionais</i>	126
4.3.3	<i>Avaliação Energética do Secador Rotativo Direto</i>	131
4.3.3.1	<i>Consumo de energia na secagem do farelo no secador considerando a elevação da temperatura do ar ambiente á temperatura de secagem</i>	131
4.3.4	<i>Controle PID para o Secador Rotativo Indireto</i>	132
4.3.4.1	<i>Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle PID SISO</i> .	132
4.3.4.2	<i>Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle PID MISO</i>	137
4.3.4.3	<i>Desempenho dos controles PID SISO e MISO</i>	139
4.3.4.4	<i>Controles PID SISO e MISO para as melhores condições energéticas</i>	142
4.4	CONCLUSÕES SOBRE O SECADOR ROTATIVO DIRETO	148
CAPÍTULO V.....		149
5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .		149
5.1	SECADOR ROTATIVO INDIRETO.....	149
5.1.1	<i>Solução Numérica e Validação do Modelo</i>	149
5.1.2	<i>Influência das Condições Operacionais</i>	149
5.1.3	<i>Avaliação Energética do Secador</i>	150

5.1.4	<i>Controle PID para o Secador</i>	150
5.2	SECADOR ROTATIVO DIRETO	151
5.2.1	<i>Solução Numérica do Modelo</i>	151
5.2.2	<i>Influência das Condições Operacionais</i>	151
5.2.3	<i>Avaliação Energética do Secador</i>	151
5.2.4	<i>Controle PID para o Secador</i>	152
5.3	SECADOR ROTATIVO INDIRETO X SECADOR ROTATIVO DIRETO	153
5.3.1	<i>Avaliação Energética do Secador</i>	153
5.3.2	<i>Controle PID para o Secador</i>	153
5.4	CONCLUSÕES GERAIS	153
5.5	SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS	154
CAPÍTULO VI		155
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		155

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Etapas típicas de industrialização do óleo e do farelo de soja	8
Figura 2. Curva de secagem típica (FOUST <i>et al.</i> , 1982)	10
Figura 3. Curva de taxa de secagem típica (FOUST <i>et al.</i> , 1982).....	10
Figura 4. Curvas de secagem do farelo de soja (LUZ, 2006).....	11
Figura 5. Curvas de taxa de secagem do farelo de soja (LUZ, 2006).....	12
Figura 6. Esquema dos processos de transferência de calor e massa durante a secagem (GEANKOPLIS, 1993)	12
Figura 7. Isotermas de equilíbrio ajustadas para o farelo a 15, 25, 35, 50, 60 e 70°C.	17
Figura 8. Esquema do secador com aquecimento indireto (PERRY e CHILTON, 1980) ..	20
Figura 9. Esquema do secador com aquecimento direto (PERRY e CHILTON, 1980).	21
Figura 10. Tipos de suspensores do secador rotativo direto: a) radiais, b) com dobra a 45°, c) com dobra a 90° e d) casco com diafragmas (PERRY e CHILTON, 1980).....	21
Figura 11. Controle sobre o secador rotativo de fluxo contracorrente (LIPTÁK, 1998)	31
Figura 12. Controle sobre o secador rotativo de fluxo concorrente (LIPTÁK, 1998)	31
Figura 13. Controle sobre o secador rotativo indireto (LIPTÁK, 2005)	33
Figura 14. Diagrama de blocos de um sistema com controle (loop fechado)	34
Figura 15. Respostas típicas para variáveis de controle <i>feedback</i> (SEBORG <i>et al.</i> , 1989) 36	
Figura 16. Curva típica de reação de processo (COUGHANOWR e LOWELL, 1986).....	39
Figura 17. Curva de resposta de processo com controle <i>PID</i> e perturbação em degrau (BEQUETTE, 2003)	40
Figura 18. Efeito do controle proporcional (SEBORG <i>et al.</i> , 1989).....	41
Figura 19. Efeitos: a) do reajuste do tempo integral; b) do ganho proporcional.....	41
Figura 20. Efeito do tempo derivativo (SEBORG <i>et al.</i> , 1989)	42
Figura 21. Curvas de resposta e frequência de um processo real e de dois modelos A e B (LUYBEN e LUYBEN, 1997)	45
Figura 22. Esquema do volume de controle do secador	49
Figura 23. Diagrama de blocos de um sistema <i>PID SISO</i>	65
Figura 24. Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta	65
Figura 25. Diagrama de blocos de um sistema com controle <i>PID MISO</i>	69
Figura 26. Esquema do volume de controle do secador.....	71
Figura 27. Diagrama de blocos para obter X_s e T_s	92
Figura 28. Perfil de umidade do farelo na saída do secador.....	93
Figura 29. Perfil de temperatura do farelo na saída do secador	94
Figura 30. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas do vapor nos tubos.....	96
Figura 31. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas do vapor nos tubos.....	96
Figura 32. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo	97
Figura 33. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo	98
Figura 34. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento do farelo de soja.....	99
Figura 35. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento do farelo de soja.....	99
Figura 36. Consumo de energia para diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto	101

Figura 37. Eficiência energética da secagem para diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto	102
Figura 38. Consumo de energia para diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto, considerando a elevação da temperatura da água à temperatura do vapor	103
Figura 39. Eficiência do secador a diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto considerando a elevação da temperatura da água à temperatura do vapor	104
Figura 40. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} .	105
Figura 41. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a v_s e..	106
Figura 42. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} .	107
Figura 43. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini}	110
Figura 44. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja para os controles <i>PID</i>	112
Figura 45. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja para os controles <i>PID</i>	113
Figura 46. Validação do modelo dinâmico em ação conjunta com a aplicação do	114
Figura 47. Validação do modelo dinâmico em ação conjunta com a aplicação do	115
Figura 48. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles <i>PID SISO</i> – caso I nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C.....	116
Figura 49. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles <i>PID SISO</i> – caso I nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C	116
Figura 50. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles <i>PID SISO</i> – caso I nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C.....	117
Figura 51. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles <i>PID SISO</i> – caso III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C	117
Figura 52. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles <i>PID SISO</i> – caso III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C	118
Figura 53. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles <i>PID SISO</i> – caso III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C	118
Figura 54. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles <i>PID MISO</i> – caso I e III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C.....	119
Figura 55. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles <i>PID MISO</i> – caso I e III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C.....	119
Figura 56. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles <i>PID MISO</i> – caso I e III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C.....	120
Figura 57. Fluxograma do algoritmo para obter X_s e T_s	123
Figura 58. Perfis de umidade do farelo e do ar na saída do secador	124
Figura 59. Perfis de temperatura do farelo e do ar na saída do secador	125
Figura 60. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas iniciais do ar de secagem	127
Figura 61. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas iniciais do ar de secagem	127
Figura 62. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo	128
Figura 63. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo	128
Figura 64. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento	129
Figura 65. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento	130

Figura 66. Consumo de energia a diferentes temperaturas do ar de secagem do secador rotativo direto considerando o aquecimento do ar até a temperatura de secagem	131
Figura 67. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se v_s	133
Figura 68. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a v_s e..	134
Figura 69. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se T_{aini}	135
Figura 70. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se v_s e T_{aini}	138
Figura 71. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja para os controles <i>PID</i>	140
Figura 72. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja para os controles <i>PID</i>	141
Figura 73. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles <i>PID SISO</i> – caso I nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C.....	142
Figura 74. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles <i>PID SISO</i> – caso I nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C.....	143
Figura 75. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles <i>PID SISO</i> – caso I nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C.....	143
Figura 76. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles <i>PID SISO</i> – caso III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C	144
Figura 77. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles <i>PID SISO</i> – caso III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C	144
Figura 78. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles <i>PID SISO</i> – caso III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C	145
Figura 79. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles <i>PID MISO</i> – casos I e III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C	145
Figura 80. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles <i>PID MISO</i> – casos I e III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C	146
Figura 81. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles <i>PID MISO</i> – casos I e III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C	146

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Condições de operação avaliadas.	58
Tabela 2. Variáveis do controle <i>feedback</i>	62
Tabela 3. Condições de operação avaliadas.....	80
Tabela 4. Variáveis do controle <i>feedback</i>	83
Tabela 5. Dados operacionais e de projeto do secador de farelo de soja	90
Tabela 6. Dados de farelo de soja.....	91
Tabela 7. Consumo energético e eficiência energética na secagem de farelo de soja.....	100
Tabela 8. Consumo energético e eficiência energética do secador de farelo de soja considerando o aquecimento da água até a temperatura de vapor nos tubos	103
Tabela 9. Constantes de sintonia do controle <i>PID</i>	109
Tabela 10. Resultados das <i>ISEs</i> para as curvas de resposta dos controles <i>PID SISO</i> e <i>MISO</i>	111
Tabela 11. Resultados das <i>ISEs</i> para diferentes temperaturas de vapor nos tubos.....	121
Tabela 12. Dados operacionais e de projeto do secador de farelo de soja	122
Tabela 13. Consumo energético e eficiência energética do secador de farelo de soja.....	131
Tabela 14. Constantes do controle <i>PID</i>	137
Tabela 15. Resultados das <i>ISEs</i> para as curvas de resposta dos controles <i>PID SISO</i> e <i>MISO</i>	139
Tabela 16. Resultados das <i>ISEs</i> para diferentes temperaturas de vapor nos tubos.....	147

NOMENCLATURA

a_s	Razão entre a área superficial do farelo de soja e o volume do secador (m^2/m^3)
A, B, D	Respectivos coeficientes das variáveis controladas, de entrada e de saída do sistema de controle
A_m	Amplitude da função senoidal
A_s	Área da seção transversal na direção do escoamento ocupada por sólido seco (m^2)
A_{sec}	Área do secador (m^2)
c	Controlador
C_D	Coefficiente de arraste da partícula sólida
c_{pa}	Calor específico do ar seco ($kJ/kg\ ^\circ C$)
c_{ps}	Calor específico do farelo de soja seco ($kJ/kg\ ^\circ C$)
c_{ps1}	Calor específico do farelo de soja seco ($J/kg\ K$)
c_{pv}	Calor específico do vapor de água ($kJ/kg\ ^\circ C$)
c_{pw}	Calor específico da água líquida ($kJ/kg\ ^\circ C$)
d, d_c, p_d	Medida do distúrbio ou ruído
d_e	Erro do distúrbio
d_p	Diâmetro da partícula (m)
d_{sec}	Diâmetro do secador (m)
d_{tub}	Diâmetro do tubo de vapor (m)
D_e	Diâmetro efetivo do secador (m)
e_f, e_{fl}	Eficiência térmica do secador
$e_{máx}$	Erro máximo atuante
$e, e(s)$	Erro atuante
$e(t)$	Erro atuante
e_s	Energia gasta com a secagem do farelo (W)
e_{s1}	Energia gasta com a secagem do farelo (kJ/kg)
e_t	Energia total de secagem do farelo (W)
E_{ta}	Energia gasta com a elevação da temperatura do farelo (kW)
E_{tb}	Energia gasta com a vaporização da umidade (kW)
EE_t	Energia total fornecida de secagem do farelo (kJ/kg)
f	Filtro
f_s	Fração volumétrica do farelo de soja no secador
FEf	Eficiência térmica do secador
FC	Controlador de fluxo,
FRC	Controlador registrador de fluxo
FT	Transmissor de fluxo
g	Aceleração gravitacional (m/s)
gm	Margem de ganho
$G_c(s)$	Função transferência do controle
$G_{c1}(s)$	Função transferência do controle
$G_p(s)$	Função transferência do processo
$G_{p1}(s)$	Função transferência do processo
$G_{rt}(s)$	Função transferência do tempo de retardo por transporte do sólido no secador entre de zona de carga e de descarga
$G_t(s)$	Função transferência do tempo de retardo por transporte do sensor/transmissor
$G_{t1}(s)$	Função transferência do tempo de retardo por transporte do sensor/transmissor
$G_I(s)$	Função transferência da variável manipulada

$G_{11}(s)$	Função transferência da variável manipulada
$G_1(s)$	Função transferência da variável manipulada com tempo de retardo por transporte
$G_2(s)$	Função transferência da variável perturbada
$G_2(s)$	Função transferência da variável perturbada com tempo de retardo por transporte
$G(t), y(t)$	Resposta do sistema, variável de saída
$G_{lim}(t)$	Resposta limite do sistema
G_s	Massa específica do farelo (kg/m)
h_c	Coefficiente global de transferência de calor entre o farelo de soja e os tubos de vapor (kW/m ² K)
H_a	Enthalpia do ar (kJ/kg)
H_s	Enthalpia do sólido (kJ/kg)
H_v	Enthalpia do vapor (kJ/kg)
I	Matriz identidade
I_n	Inclinação de curva de reação do processo
ISE	Integral do Erro Quadrático
$ITAE$	Integral do Erro Absoluto
k	Relação entre o sinal de entrada e o de saída no controle
k_v	Condutividade térmica do vapor (kW/m K)
K	Coefficiente de transferência de massa entre farelo e vapor (1/s)
k_{co}	Ganho crítico do sistema
k_i	Ganho integral do sistema
k_p, k_c	Ganho proporcional do sistema
k_r	Ganho de processo em regime estabelecido
L, z	Comprimento total do secador (m)
LAG	Argônio líquido
LAH	Alarme de nível alto
LSH	Chave de alto nível
M	Motor
M_a	Massa de ar seco (kg)
\dot{M}_a	Vazão mássica de ar (kg/s)
Mag, n	Magnitude de variação
Me	Medida da perturbação
M_s	Massa de sólido seco (kg)
\dot{M}_s	Vazão mássica de farelo de soja seco (kg/s)
$M1(s)$	Variável manipulada
$M2(s)$	Variável perturbada
N	Velocidade de rotação do secador (rpm)
N_p	Pólo
N_u	Número de Nusselt
p	Processo
pm	Margem de fase
pu	Período de oscilação
P	Pressão, pressão atmosférica (kPa)
PIC	Controlador indicador de pressão
P_r	Número de Prandtl
PRC	Controlador registrador de pressão
PT	Transmissor de pressão

PY	Conversor de pressão
q_{ff}	Controle <i>feed-forward</i>
q_C	Calor de convecção
q_R	Calor de radiação
Q	Calor sensível de vaporização da água (kJ)
r	Ordem do Filtro
$r(t)$	Valor de referência ou set point
R^2	Coefficiente de determinação
R, R_I	Taxa de secagem do farelo de soja (kg água/kg farelo seco s)
R_e	Número de Reynolds
S	Inclinação do secador (m/m)
SP	Set point
$SP(P')$	Set point
t_r	Tempo de residência do farelo de soja no secador (s)
t_{rt}	Tempo de retardo por transporte no sensor/transmissor (s)
t_s	Temperatura do farelo de soja (K)
t, s	Tempo
t_w	Largura do pulso
T	Temperatura
T_a	Temperatura do ar de secagem (°C)
T_{aamb}	Temperatura do ar ambiente (°C)
T_{aini} ,	Temperatura do ar de entrada do secador (°C)
$T_{ainimax}$	Temperatura máxima do ar de entrada do secador (°C)
$T_{ainimin}$	Temperatura mínima do ar de entrada do secador (°C)
T_{amed}	Temperatura média da região (°C)
T_{bs}	Temperatura de bulbo seco do ar (°C)
T_{ini}, T_i	Temperatura do ar de entrada do secador (°C)
TAH	Alarme de temperatura alta
TSH	Chave de alta temperatura
T_{MS}	Temperatura do meio secante (°C)
T_s, T_o	Temperatura final do farelo de soja (°C)
TRC	Controlador registrador de temperatura
T_u	Temperatura de bulbo úmido do ar (°C)
TT	Transmissor de temperatura
T_{vt}	Temperatura do vapor nos tubos (°C)
T_{vtmin}	Temperatura mínima do vapor nos tubos (°C)
$u_{máx}$	Sinal de controle máximo permitido
$u(t)$,	Sinal de controle da variável de entrada medida
$U(s)$	Sinal de controle da variável de entrada medida
u	Sinal da variável de entrada
ur	Umidade relativa do ar
U_v	Coefficiente global de transferência de calor volumétrico (kW/m ³ °C)
V_s	Volume do farelo de soja (m ³)
V_{sec}	Volume do secador (m ³)
v_{smax}	Velocidade máxima de entrada do farelo no secador (m/s)
v_{smin}	Velocidade mínima de entrada do farelo no secador (m/s)
v_a	Velocidade do ar de secagem (m/s)
v_s	Velocidade do farelo de soja (m/s)
v_t	Velocidade terminal do farelo de soja dentro do secador (m/s)
VPA	Posição da válvula de alarme

VPG	Visor de Posição da válvula
VPS	Chave de posição da válvula
\dot{x}	Equações diferenciais de balanço de massa e de energia
x	Variáveis controladas
X	<i>Reactance</i> (Ω)
X_e	Umidade de equilíbrio do farelo de soja (kg água/kg sólido seco)(b.s.)
X_s	Umidade contida do farelo de soja (kg água/kg sólido seco)
X_{sini}	Umidade inicial do farelo de soja (kg água/kg sólido seco)
$X_s(s)$	Variável controlada – Umidade do sólido
$X_{sr}(s)$	Valor de umidade desejada do farelo na saída do secador (set point)
y	Sinal das variáveis controladas
y_M	Valor de saída medido
$y(s)$	Função transferência
y_{sp}	Set point ou valor de referência
Y	Umidade contida no ar (kg água/kg ar seco)
Y_{amb}	Umidade contida no ar ambiente (kg água/kg ar seco)
Y_{ini}	Umidade inicial contida no ar (kg água/kg ar seco)
$w, wcp,$	Frequências
wcg	
	Letras Gregas:
ΔM	Sinal da perturbação
Δt	Variação de tempo
ΔT	Variação de temperatura
ΔX_s	Variação de concentração do farelo
Δz	Variação do comprimento do secador
ε	Porosidade do leito de farelo de soja
ϕ	Somatório dos desvios quadráticos
λ	Entalpia de vaporização da água (kJ/kg)
λ_l	Entalpia de vaporização da água (J/kg)
μ_v	Viscosidade do vapor (kg/m s)
θ	Tempo de atraso por transporte (s)
θ_l	Tempo aparente
ρ_a	Massa específica do ar seco(kg/m ³)
ρ_{ap}	Massa específica aparente do farelo seco (kg/m ³)
ρ_s	Massa específica real do farelo de soja seco (kg/m ³)
ρ_v	Massa específica do vapor (kg/m ³)
τ	Constante de tempo de oscilação
Ψ	Esfericidade das partículas
τ_d	Tempo derivativo do sistema
τ_i	Tempo integral do sistema
$/z$	Localizado na entrada do elemento diferencial do secador
$/z + \Delta z$	Localizado na saída do elemento diferencial do secador

CAPÍTULO I

1 INTRODUÇÃO

Neste capítulo, são apresentadas a motivação, os objetivos do trabalho, a estrutura da tese, as contribuições e os trabalhos apresentados e publicados do estudo da secagem do farelo de soja.

1.1 MOTIVAÇÃO

O farelo de soja é um produto da indústria de processamento da soja muito valorizado nos mercados interno e externo por suas propriedades nutricionais, constituindo o principal ingrediente na formulação de rações e como suplemento alimentar humano.

A demanda mundial por farelo de soja tem aumentado significativamente ano após ano. No Brasil, só entre 2001 e 2008, este aumento foi de 26%, o que, de acordo com estimativas, gerou aproximadamente U\$ 37,5 bilhões em divisas para o país. A valorização interna do farelo fez com que seu consumo sofresse uma ampliação de 39% no mesmo período de tempo, atingindo quase a mesma proporção do consumo externo de 12.530.000 toneladas em 2008. Dentro dessas estatísticas, o estado do Paraná tem apresentado grande participação, principalmente em termos de produção e capacidade de processamento da soja, respondendo por 77,4% do total processado, o que equivale a 35.150.000 toneladas/dia em 2008, entre unidades ativas e paradas (ABIOVE, 2009).

De acordo com novas projeções de Miguel (2009), a produção mundial de farelo para 2010 deve ficar um pouco acima da de 2009, em resposta ao aumento da produção de soja, principalmente no Paraná. Deste modo, devem surgir novas indústrias de processamento do grão e as já existentes devem sofrer modificações para atender a nova demanda por farelo, seja com a instalação de novos equipamentos ou readaptações das já existentes.

Diante deste cenário, a capacidade de produção dos equipamentos precisa estar aliada às melhores condições de operação e ao menor consumo de energia para oferecer um produto de qualidade a baixo custo. Neste sentido, surgem novos desafios e oportunidades de realizar melhorias nessas plantas industriais, conforme as sugeridas pelos trabalhos publicados sobre a otimização do projeto do dessorventizador/tostador (*DT*), para haver uma maior recuperação do hexano (KEMPER, 1998), a modelagem do processo de

extração do óleo de soja para vários tipos de solventes (VELOSO, 2003), a modelagem e simulação da evaporação na operação de destilação da miscela, para analisar as melhores condições de operação do processo (PARAÍSO *et al.*, 2002; PARAÍSO *et al.*, 2005), a modelagem e simulação em regime transiente, visando sua utilização na análise de estratégias de controle (SARTORI, 2001), a análise energética preliminar da secagem industrial do farelo de soja (PARAÍSO *et al.*, 2004b) e a modelagem do secador rotativo indireto de farelo de soja em regime permanente, com a finalidade de avaliar o consumo energético e a eficiência energética do processo (LUZ *et al.*, 2006b; LUZ, 2006).

Como pode ser observado pelas pesquisas mencionadas, existem poucos trabalhos visando melhorias no processo de secagem do farelo de soja. Além disso, existe uma lacuna de trabalhos abordando secadores alternativos para a secagem do farelo de soja em termos de economia de energia e qualidade do produto final.

O processo de secagem é imprescindível para a manutenção da qualidade do farelo na estocagem, permitindo atingir teores de umidade suficientes para evitar a proliferação de microorganismos e facilitar seu transporte e manuseio até o consumo. Deste modo, a secagem industrial do farelo pode ser realizada em equipamentos com operações conjugadas como o *Dessolventizing–Toasting–Drying–Cooling (DTDC)*, ou o secador rotativo indireto. O *DTDC* apresenta grande eficiência e economia em função da secagem direta e/ou indireta, mas representa um risco constante à segurança pela possibilidade de explosão ocorrida pelo contato entre o solvente e ar o aquecido segundo Witte (1995), despertando receios sobre seu uso. Com isso, nas indústrias preferem-se os secadores rotativos indiretos, os quais são caracterizados por altos consumos de energia segundo Jongeneelen (1976), ocasionados por deficiências na transferência de calor entre o produto e o meio secante ou o desconhecimento das melhores condições de operação, elevando os custos de produção e pondo em risco a qualidade do produto. Neste sentido, verifica-se a necessidade de otimizar a produção de farelo investigando-se outros tipos de secadores com operação mais eficiente e econômica, buscando produtos com especificações mais garantidas a baixo custo. Assim, visando atender a esses objetivos, decidiu-se estudar a secagem do farelo em secadores rotativos direto e indireto.

A escolha do secador rotativo direto está relacionada à utilização do ar para a promoção da secagem, cuja aplicação tem sido constatada na literatura para vários tipos de materiais (PELEGRINA *et al.*, 1999; RASTIKIAN *et al.*, 1999; IGUAZ *et al.*, 2003). Além disso, o farelo de soja entra no secador em temperaturas altas, o que evidentemente é um fator importante no processo de secagem direta. Os resultados promissores de seu uso

devem-se aos gradientes satisfatórios de temperatura e de umidade entre o sólido e o meio secante no interior do secador e a uma maior facilidade de trabalho com as variáveis manipuladas de entrada do processo; assim, espera-se que estas características garantam boa qualidade no produto final. Outra característica que pode favorecer o uso deste equipamento é a utilização do ar à temperatura ambiente, desde que em condições de baixa umidade relativa, o que conduz a um baixo consumo energético. Em face a tantos benefícios, este secador tem grande potencial de aplicação na secagem de farelo. Para tanto, uma investigação da dinâmica do processo é fundamental para uma análise completa do comportamento das variáveis do processo durante a secagem, bem como a implantação de formas de controle que possam minimizar os distúrbios de processo e maximizar a produção, respeitando os limites de umidade e temperatura do produto (COURTOIS e TRYSTRAM, 1994).

A investigação da dinâmica do processo é realizada com o principal objetivo de verificar a intensidade dos desvios das variáveis de saída do sistema quando este é submetido à perturbações nas variáveis de entrada, dando suporte à verificação das melhores condições de operação do processo e ao desenvolvimento de sistemas de controle. Normalmente, essa análise é realizada de forma computacional, visto sua maior rapidez, economia, segurança e praticidade na obtenção dos resultados do que quando realizadas diretamente nos equipamentos industriais e, para isso, o sistema requer a modelagem transiente do processo representada por equações diferenciais no tempo e no espaço.

Conhecidos os efeitos das perturbações de processo por meio da análise da sua dinâmica, torna-se necessário controlá-los a fim de manter certas variáveis dentro de limites desejados por meio da aplicação de sistemas de controle. Contudo, para se obter resultados satisfatórios nestes sistemas, é necessário que sua configuração apresente uma combinação coerente entre as variáveis perturbadas, manipuladas e controladas.

Entre as estratégias de controle mais utilizadas em secadores rotativos, encontra-se a Proporcional, Integral e Derivativa (*PID*) (YLINIEMI, 1999; ARJONA *et al.*, 2005; JOVER e ALASTRUEY, 2006). Conforme Åström e Hägglund (2006), o *PID* abrange atualmente uma utilização de cerca de 90% das plantas industriais, sendo a primeira forma utilizada experimentalmente em controles a realimentação. Sua aplicação é favorecida por um algoritmo robusto e fácil de ser entendido (WILLIS, 1999).

Portanto, diante do que foi exposto anteriormente e da falta de dados para a otimização da secagem industrial do farelo de soja em secador rotativo indireto tanto em

relação a utilização de estratégias de controle quanto a utilização de secadores alternativos, verificou-se a importância de investigá-los, tornando o farelo de soja ainda mais competitivo no mercado e contribuindo para que ele tenha novas utilizações.

1.2 OBJETIVOS DO TRABALHO

O objetivo principal deste trabalho foi avaliar as estratégias de operação e de controle da secagem do farelo de soja em secadores rotativos direto e indireto.

Os objetivos específicos foram os seguintes:

- Realizar a modelagem matemática e a simulação da dinâmica de cada um desses secadores;
- Validar os modelos a partir de dados de uma planta industrial;
- Avaliar os consumos energéticos de cada secador em diferentes condições operacionais; e
- Aplicar estratégias de controle de processo do tipo *PID* aos dois equipamentos.

1.3 ESTRUTURA DA TESE

O presente trabalho foi estruturado em cinco capítulos. No Capítulo 1, referente à introdução, é apresentado o problema de forma sucinta, bem como as técnicas utilizadas para a sua solução e os principais objetivos do trabalho.

O Capítulo 2 trata da revisão bibliográfica, sendo apresentadas as principais informações necessárias para o desenvolvimento do presente trabalho, referentes à produção de farelo de soja, características da secagem do farelo, propriedades dos secadores rotativos e alguns tipos de estratégias de controle, assim como a apresentação e discussão de alguns trabalhos científicos referentes ao assunto em estudo.

O Capítulo 3 refere-se à etapa de materiais e métodos, sendo descritas as metodologias empregadas para a obtenção dos modelos matemáticos dinâmicos e o desenvolvimento e aplicação do controle *PID* dos secadores rotativos indireto e direto.

Os resultados obtidos, bem como as discussões e comparações com outros trabalhos, são apresentados no Capítulo 4.

Finalmente, o último capítulo apresenta os principais resultados e conclusões do trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

1.4 PRINCIPAIS CONTRIBUIÇÕES DO TRABALHO

O presente trabalho visa contribuir com a melhoria do desempenho dos secadores rotativos indiretos convencionais utilizados na secagem de farelo de soja de forma a reduzir custos de produção e manter ou melhorar a qualidade deste produto nas plantas industriais de óleo de soja. Neste sentido, foram realizadas a modelagem e a simulação dos secadores rotativos indireto e direto e, a análise energética e a avaliação da implementação de estratégias de controle de cada um desses equipamentos.

Para atingir cada uma das etapas foram determinadas as melhores condições de operação do secador e propriedades do farelo, realizados o desenvolvimento de modelos da secagem nos regimes permanente e transiente, pesquisados modelos para calcular o consumo energético, aplicados sistemas de controle *PID*, bem como da investigada a utilização de um secador rotativo direto alternativo na secagem do farelo, sendo necessário, para isso, os mesmos estudos do secador convencional para efeito de comparação.

Com os resultados obtidos é possível ainda projetar os secadores rotativos ou modificá-los de acordo com a necessidade da cada indústria.

1.5 TRABALHOS APRESENTADOS E PUBLICADOS

No decorrer deste estudo, foram apresentados e publicados os seguintes trabalhos:

- LUZ, G. R., CONCEIÇÃO, W. A. S., JORGE, L.M.M, PARAISO, P. R., ANDRADE, C. M.G. Dynamic modeling and control of soybean meal drying in the direct rotary dryer. *Food and Bioproducts Process*, 2010.
- LUZ, G. R.; PARAISO, P. R.; JORGE, L. M. M.; ANDRADE, C. M. G. Modeling and Energetic Analysis of Soybean Meal Drying in the Indirect Rotary Dryer. *Chemical Product and Process Modeling*, v. 4, n. 1, Article 8, 2009.
- LUZ, G.R., PEREIRA, N. C., JORGE, L. M. M.; ANDRADE, C.M.G.; PARAÍSO, P. R. Mass Transfer Coefficient in Soybean Meal Drying. *Brazilian Journal of Food Technology* vol. 12. n. 2, 5p, 2009.
- LUZ, G. R., ANDRADE, C.M.G., JORGE, L. M., PARAISO, P. R. Modelagem do secador rotativo industrial de farelo de soja em regime transiente *In Anais do XVII Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, 2008, Pernambuco.
- LUZ, G. R., CONCEIÇÃO, W. A. S., JORGE, L.M. M, ANDRADE, C.M.G., PARAISO, P. R. Avaliação da dinâmica do secador rotativo de farelo de soja com aquecimento por contato indireto. *In Anais do II SEQ-UEM*, Maringá, 2008.

Os trabalhos a serem submetidos são:

- LUZ, G. R., CONCEIÇÃO, W. A. S., JORGE, L.M. M, PARAÍSO, P.R., ANDRADE, C.M.G. *PID* control of soybean meal drying in the indirect and direct rotary dryer. *Food Control*.
- LUZ, G. R., CONCEIÇÃO, W. A. S., JORGE, L. M. M, ANDRADE, C.M.G., PARAÍSO, P. R Soybean meal drying in the indirect versus direct rotary dryer, energetic analysis. *Drying Technology*.

CAPÍTULO II

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo, são apresentadas algumas características da secagem do farelo de soja, dos secadores rotativos contínuos com aquecimento direto e indireto, o consumo de energia nestes secadores, e a modelagem matemática e simulação destes tipos de secadores, bem como, alguns tipos de estratégias de controle.

2.1 SECAGEM

A secagem corresponde a remoção da umidade agregada a um sólido para uma fase gasosa insaturada por meio de sua evaporação térmica. Este processo é realizado por meio de dois fenômenos simultâneos, a transferência de calor ao sólido, promovida pelo agente secante, e em resposta a essa, a transferência de umidade do sólido para o agente (MUJUMDAR, 1995).

A secagem é utilizada como principal técnica de conservação de alimentos, sendo considerada uma das mais antigas para este fim. Ela atua no sentido de evitar, principalmente, a germinação, a contaminação por microorganismos e insetos, e as reações químicas, de forma a conservar a qualidade do produto por longos períodos, o que é desejável na estocagem (COULSON e RICHARDSON, 1968).

De acordo com estudos apresentados na literatura, a secagem é a etapa mais onerosa em termos energéticos às indústrias e, para atender a demanda da sociedade por produtos de qualidade, seguros, de baixo custo e com práticas ambientais corretas, é necessário operar, projetar ou otimizar os secadores em condições ideais. Neste sentido, tem se investido cada vez mais na utilização de estratégias de controle.

2.1.1 Principais Etapas de Produção do Farelo de Soja

O farelo de soja é um importante produto da indústria de processamento da soja caracterizado por alto valor nutricional e econômico. Entretanto, sua competitividade na comercialização depende da qualidade apresentada ao menor custo possível. Para isso, deve haver um controle rigoroso das especificações da matéria-prima e das condições de operação no processamento, principalmente da secagem. A Figura 1 mostra as etapas do processo para a obtenção do farelo de soja.

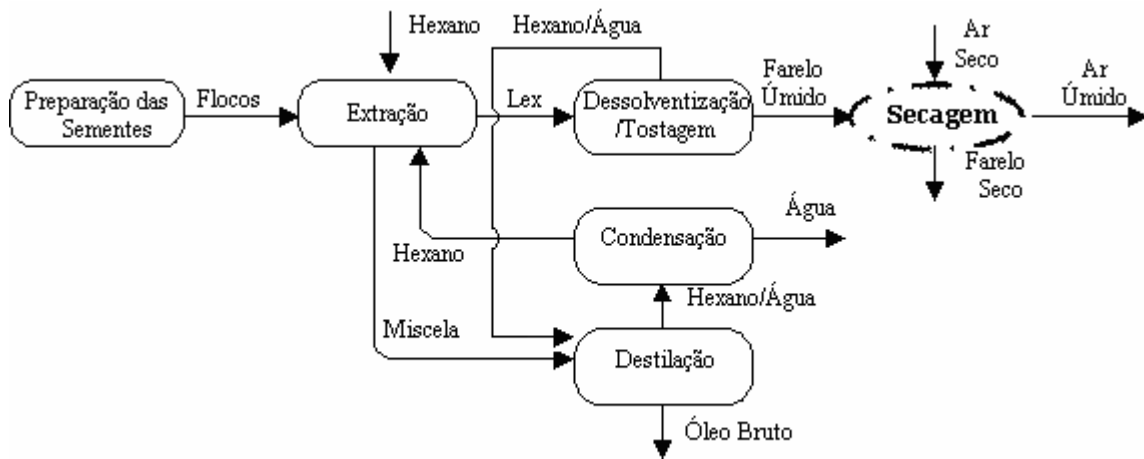


Figura 1. Etapas típicas de industrialização do óleo e do farelo de soja

A descrição destas etapas é apresentada de forma sucinta a seguir.

- **preparação das sementes:** processo que transforma os grãos de soja em flocos, de forma a promover a extração do óleo mais facilmente. Esta etapa é composta pelas atividades de limpeza, classificação, descortificação, trituração e laminação, e de cozimento das sementes.
- **extração:** processo que envolve a extração do óleo por prensagem mecânica e uso de solventes em extratores. Nesta etapa, são produzidas duas correntes: a miscela, constituída de óleo de soja bruto com o hexano; e o lex, composto pela mistura de óleo de soja residual, farelo de soja, hexano e umidade. Após ocorrer o processo de extração, a miscela segue para a etapa de destilação. Já o lex (ou torta), segue para a etapa de dessolventização/tostagem.
- **destilação da miscela:** processo que separa o óleo de soja bruto do hexano por meio de destilação por evaporação e por *stripping*. O hexano evaporado no destilador e na coluna de *stripping* é recuperado para ser reutilizado no extrator, e a corrente de óleo bruto segue para a etapa de refino para ser transformada em óleo comestível.
- **dessolventização/tostagem:** consiste em um tratamento térmico para a retirada de solvente e a desativação de enzimas, de produtos tóxicos e de sabores indesejáveis do lex. As correntes formadas neste equipamento são o farelo úmido, que sai no fundo e segue à etapa de secagem, e o vapor de água e hexano, que sai no topo do equipamento, sendo reutilizado na destilação da miscela devido ao potencial energético.

- **secagem:** processo que elimina a umidade excedente do farelo de soja por meio de tratamento térmico. Ao final do processo, obtém-se o farelo seco, pronto para a comercialização.

Entre as várias etapas do processo de obtenção do farelo, a secagem é essencial à manutenção da sua qualidade na estocagem, permitindo atingir teores de umidade suficientes para evitar a proliferação de microorganismos e facilitar seu transporte e manuseio até o consumo. Assim, segundo a Portaria n° 795, de 15/12/93, do Ministério da Agricultura, o farelo tostado ou cru deve apresentar uma umidade máxima de 12,5% (b.u.) (aproximadamente 14% (b.s.)).

2.1.2 Características da Secagem do Farelo de Soja

O comportamento do material durante o processo de secagem é normalmente conhecido a partir de curvas de secagem e taxa de secagem, das isotermas de equilíbrio e dos mecanismos de transferência de massa e calor.

2.1.2.1 Cinética de secagem do farelo de soja

A cinética de secagem aborda a variação da umidade de um sólido com o tempo, sob condições constantes de temperatura, velocidade do ar e pressão. Normalmente, os dados são representados em termos de curvas de secagem e de taxa de secagem, as quais são importantes na identificação dos valores de umidades inicial, final e de equilíbrio e dos dados de transferência de calor e massa.

Treybal (1980), Foust *et al.* (1982) e Geankoplis (1993) apresentaram curvas de secagem e de taxa de secagem típicas de produtos sólidos. Nestas curvas, podem ser identificados o período inicial, o período de taxa constante e o período de taxa decrescente, como pode ser observado nas Figuras 2 e 3.

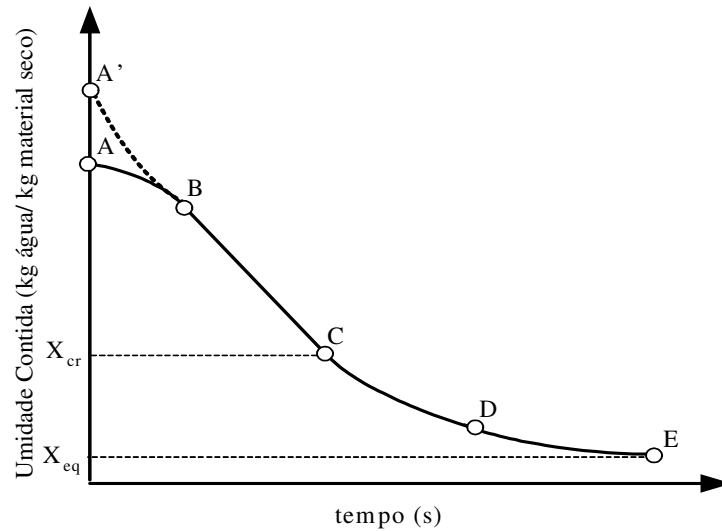


Figura 2. Curva de secagem típica (FOUST *et al.*, 1982)

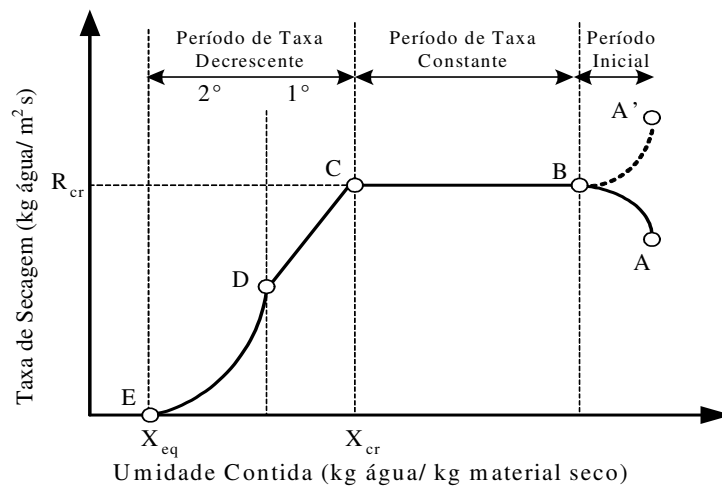


Figura 3. Curva de taxa de secagem típica (FOUST *et al.*, 1982)

O período inicial de secagem, representado pelas linhas AB e A'B, pode apresentar aumento ou diminuição na taxa de secagem em função do calor sensível absorvido ou perdido pelo sólido em relação ao meio secante, tendendo a uma temperatura de equilíbrio. Em certos casos, este período é muito curto ou pode ser desprezado (STRUMILLO e KUDRA, 1986).

O período de taxa constante, representado pela linha BC, apresenta uma taxa de remoção de umidade do sólido que permanece constante por um período. Isto deve-se, inicialmente, a presença de um filme de água sobre a superfície do sólido que é posteriormente, substituída pela umidade vinda do interior do sólido a medida que a evaporação da umidade da superfície ocorre. E deste modo, este fenômeno prossegue, tendo-se em todo o período a temperatura da superfície do sólido próxima da temperatura

de bulbo úmido do ar (GEANKOPLIS, 1983). Quando a substituição da umidade não é mais suficiente para manter este filme, é atingida a umidade crítica (ponto crítico – C) e dá-se início ao período de taxa decrescente.

No período de taxa constante, a resistência interna ao transporte de umidade é bem menor que a resistência externa de remoção do vapor da superfície.

O primeiro período de taxa decrescente, representado pela linha CD, caracteriza-se por uma redução na taxa de secagem, pois a superfície do sólido vai ficando cada vez mais seca, sendo controlada pela difusão. O segundo período de taxa decrescente, representado pela linha DE, apresenta uma taxa de secagem ainda menor, pois a superfície apresenta raros pontos úmidos, até chegar à mínima umidade atingível nestas condições. Esta umidade é denominada umidade de equilíbrio.

No período de taxa decrescente de secagem a temperatura do sólido aumenta, tendendo a atingir a temperatura do ar de secagem (BROOKER *et al.*, 1992).

Luz (2006) obteve dados cinéticos experimentais para o farelo de soja nas temperaturas de 50, 74, 85 e 97°C, e nas velocidades do fluxo de ar de 1,1 e 2,5 m/s, para uma umidade relativa de 60%. A autora obteve estes dados em um secador de laboratório do tipo bandeja.

As curvas de secagem e de taxa de secagem encontradas pela autora foram analisadas de forma isolada para cada condição e em conjunto para verificar os efeitos da variação de temperatura e de velocidade no processo. O comportamento das curvas de secagem e de taxa de secagem são apresentados nas Figuras 4 e 5, respectivamente.

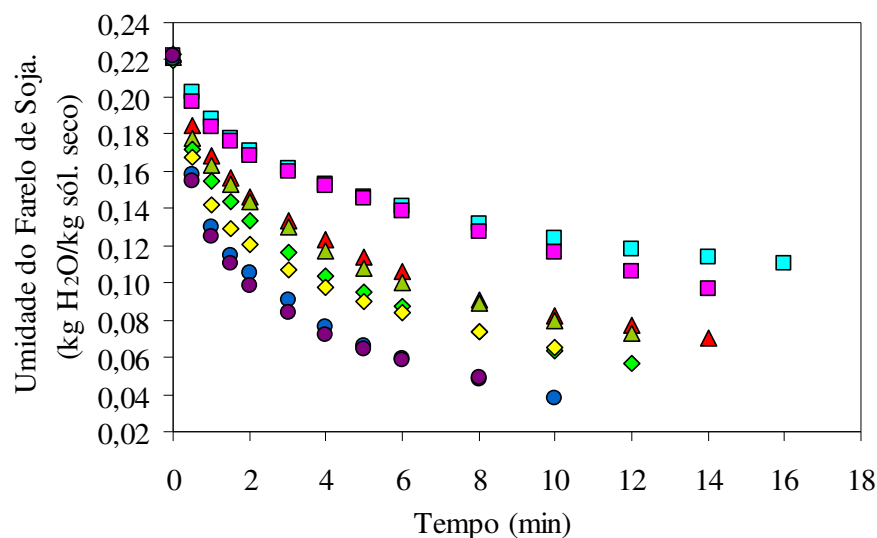


Figura 4. Curvas de secagem do farelo de soja (LUZ, 2006).

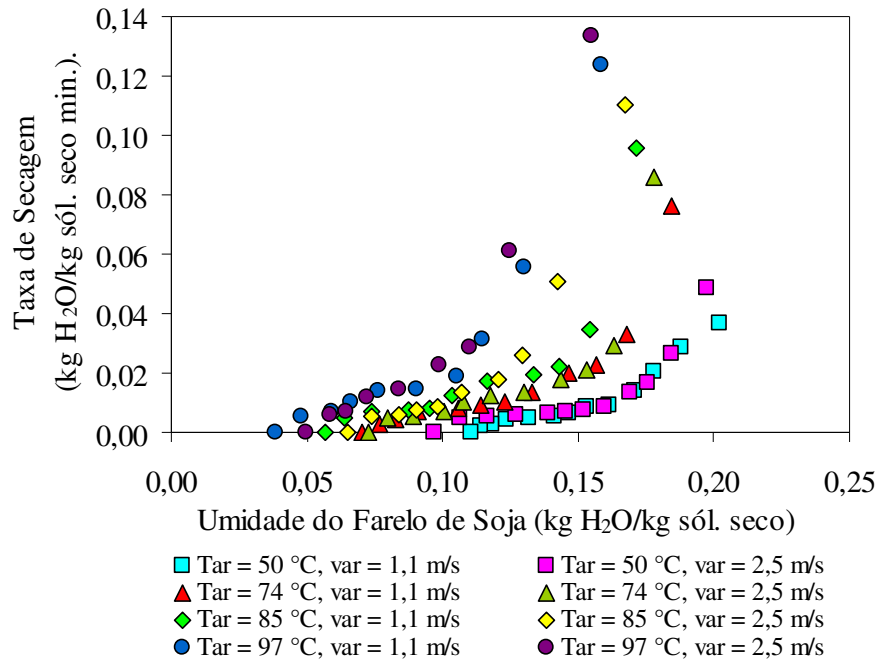


Figura 5. Curvas de taxa secagem do farelo de soja (LUZ, 2006).

Os resultados mostram que a secagem do farelo apresentou somente o período de taxa decrescente e que somente a temperatura influenciou de forma significativa a taxa secagem na faixa explorada de 50 a 97 °C. A explicação para tal fato é que a etapa limitante de transferência de massa do farelo ocorre no interior da partícula, provavelmente por difusão.

2.1.2.2 Transferência de calor e de massa do farelo de soja

O processo de secagem de um material deve-se a transferência simultânea de calor e de massa. Ou seja, a umidade é retirada do sólido pelo fornecimento de calor a este por meio de um meio secante, normalmente um gás, que apresenta menor concentração de umidade em relação a concentração de equilíbrio. A tendência é o sistema entrar em equilíbrio mássico e térmico. O esquema deste processo é mostrado na Figura 6.

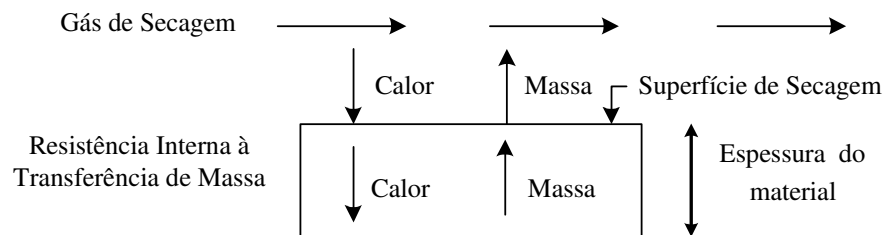


Figura 6. Esquema dos processos de transferência de calor e massa durante a secagem (GEANKOPLIS, 1993)

As transferências de calor e de massa podem variar em função do tipo de sólido e dos diferentes períodos que ele venha a apresentar durante o processo de secagem. Segundo Perry e Chilton (1980), no período de taxa constante, a evaporação superficial da umidade é promovida por condução, radiação ou convecção. Sendo que a convecção é o modo mais aplicado na secagem de alimentos particulados (MUJUMDAR, 1987).

Treybal (1980) e Geankoplis (1993) discutem outras propriedades que afetam também este período e, conseqüentemente, a taxa constante de secagem, como a temperatura, a umidade do gás, a espessura do sólido e a velocidade do gás.

No período de taxa decrescente, a secagem é influenciada pela estrutura interna do sólido. Conforme Perry e Chilton (1980), o movimento da umidade, neste período, pode ocorrer por difusão, capilaridade, gravidade, seqüências de vaporização - condensação e contração, ou gradientes de pressão. Contudo, os mecanismos mais discutidos na literatura são a difusão e a capilaridade.

A teoria da difusão admite que o movimento da umidade deve-se a diferenças de concentração entre a superfície e o interior do sólido (YLINIEMI, 1999). Conforme Luz (2006), esta é a transferência de massa mais observada na secagem de alimentos, devido à presença de poros e pequenos espaços saturados de vapor ou de líquidos. A difusão é comum em sólidos não porosos, fibrosos e amorfos.

Treybal (1980) relacionou a capilaridade à tensão interfacial e a diferenças de pressão hidrostática provocadas pela água não ligada, sendo este mecanismo característico de sólidos granulares e porosos.

A transferência de calor e de massa pode ser influenciada por várias grandezas e necessita de relações matemáticas e físicas para a realização dos processos de modelagem e projeto de equipamentos. Sua obtenção pode ser feita a partir de dados de cinética de secagem.

Os coeficientes de transferência de massa e de calor na secagem do farelo de soja são importantes nas aplicações de projeto, análise, modelagem, simulação, otimização e controle de secadores em escala industrial.

O coeficiente de transferência de calor para o farelo, h_c , pode ser determinado a partir de modelos existentes na literatura, em função do tipo de secador utilizado no processo. Devido às características do farelo, este é secado em secador de contato indireto, sendo considerada a transferência de calor por convecção entre o vapor e o sólido (h_c). Conforme Whitaker (1972), este coeficiente pode ser estimado a partir da Equação 1, aplicada nos trabalhos de Paraíso *et al.* (2004b) e Luz (2006).

$$N_u = 2 + (0,4R_e^{0,5} + 0,06R_e^{2/3})P_r^{0,4} \quad (1)$$

Sendo

$$N_u = h_c d_p / k_v \quad (2)$$

$$R_e = d_p v_t \rho_v / \mu_v \quad (3)$$

$$P_r = c_{pv} \mu_v / k_v \quad (4)$$

em que: N_u é o número de Nusselt (adimensional); h_c , o coeficiente de transferência de calor entre o produto e o ar ($\text{W/m}^2 \text{ } ^\circ\text{C}$); d_p , o diâmetro médio das partículas de produto (m); k_v , a condutividade térmica do vapor ($\text{W/m } ^\circ\text{C}$); R_e , o número de Reynolds (adimensional); v_t , a velocidade terminal das partículas dentro do secador; ρ_v , a densidade específica do vapor de água; μ_v , a viscosidade do vapor (kg/ms); P_r , o número de Prandtl (adimensional) e c_{pv} , o calor específico do vapor ($\text{kJ/kg } ^\circ\text{C}$).

Contudo, o número de Reynolds (R_e) deve estar na faixa de $0,35 < R_e < 76000$ e o número de Prandtl (P_r), na faixa de $0,71 < P_r < 380$.

Luz *et al.* (2009b) determinaram uma correlação para estimar o coeficiente de transferência de massa do farelo de soja (K) para aplicação na simulação de um secador rotativo indireto industrial, sendo utilizados, para isso, os dados de cinética apresentados nas Figuras 4 e 5. Uma vez que a taxa de secagem foi influenciada somente pela temperatura, os autores constataram que o K pode ser utilizado em qualquer tipo de secador. Assim, a correlação de K foi determinada somente em função da umidade do farelo e da temperatura do ar de secagem.

Em face desses acontecimentos, Luz *et al.* (2009b) calcularam os pontos experimentais de K por meio de dados médios de umidade do farelo para as condições de mesma temperatura e velocidades diferentes, utilizando-se o modelo apresentado por Welty *et al.* (2001), conforme mostrado na Equação 5.

$$K = \frac{R}{X_s - X_e} \quad (5)$$

em que: K é o coeficiente de transferência de massa na secagem ($1/\text{s}$); R , a taxa de secagem ($\text{kg H}_2\text{O}/ \text{kg sól. seco s}$); X_s , a umidade do farelo (b.s.) e X_e , a umidade de equilíbrio do farelo (b.s.).

Após a determinação dos pontos experimentais de K em cada condição de temperatura do ar, estes foram ajustados por Luz *et al.* (2009b) por regressão não-linear a equações polinomiais, encontrando-se a equação de segundo grau como a mais adequada a

predição deste coeficiente. Porém, era necessária a contemplação desta equação com a temperatura do meio secante, e deste modo foram analisadas várias equações e a que apresentou o melhor coeficiente de determinação é apresentada a seguir.

$$K = (-4,7 \cdot 10^{-3} T_a + 0,77) X_s^2 + (2,2 \cdot 10^{-3} T_a - 0,25) X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{71,81}{T_a}\right) \quad (6)$$

em que T_a é a temperatura absoluta do ar de secagem (°C).

Na Equação 6, a temperatura absoluta do ar foi considerada igual a do sólido pela proximidade entre as mesmas e pela dificuldade de determinar a temperatura real do sólido.

2.1.2.3 Isotermas de equilíbrio do farelo de soja

A umidade presente nos materiais sólidos depende da relação de equilíbrio entre suas pressões de vapor interna e externa. Deste modo, a exposição deste material a novas condições de umidade, temperatura e pressão do ar induzirá a outros teores de umidade que podem ser indesejados a manutenção das qualidades físico-químicas do produto nos processos de secagem e armazenamento. Neste sentido, a melhor forma de controle das condições é pelo conhecimento das isotermas de equilíbrio (PERRY e CHILTON, 1980; MUJUMDAR, 1987).

O conhecimento das isotermas de equilíbrio pode estar relacionado tanto a modelos teóricos existentes na literatura, baseados em cinética de adsorção e dessorção, como a modelos empíricos e semi-empíricos, baseados em dados experimentais de umidade e temperatura do material em estudo. Contudo, os modelos empíricos são mais utilizados que os teóricos pela maior precisão para uma ampla faixa de umidade e temperatura do ar (BARROZO *et al.*, 1998).

Barrozo *et al.* (2000), Mujumdar (1987) e Brooker *et al.* (1992) apresentam duas formas de se determinar as isotermas de equilíbrio experimentais. Na técnica estática, a umidade é atingida sem ou com pouco movimento do ar, enquanto que, na dinâmica, o ar, ou o produto, é movimentado mecanicamente até alcançar o equilíbrio.

A umidade de equilíbrio do farelo de soja é importante para manter a qualidade do produto pós-secagem e armazenamento. Neste sentido, Pixton e Warburton (1975) levantaram dados de adsorção e dessorção do farelo a 15, 25 e 35°C, sendo estes posteriormente ajustados pelo modelo de Chung-Pfost (1976) (CHUNG-PFOST, 1967 citado em ACASIO, 2004).

Silva *et al.* (2004) levantaram dados do farelo em laboratório a 50, 60 e 70°C, pelo método estático, ajustando os dados a modelos empíricos, aplicando o *software* Statística 6.0[®]. Os autores encontraram os modelos de Luikov (1966) e Halsey (1976) (LUIKOV, 1966, e HALSEY, 1976, citado em SILVA *et al.*, 2004) como os mais indicados para representar a faixa de temperatura explorada.

Luz *et al.* (2006a), almejando obter um modelo que abrangesse uma maior faixa de temperatura para o farelo, uniram os dados de Pixton e Warburton (1975) e de Silva *et al.* (2004). Neste caso, utilizando também o *software* Statística 6.0[®], os autores verificaram que os modelos estudados apresentaram resultados estatísticos satisfatórios (com $R^2 \geq 0,98$ e $\phi \geq 0,019$) e podem ser utilizados para a predição da umidade de equilíbrio do farelo, sendo os mesmos apresentados a seguir.

- Luikov (1966) com dois parâmetros ajustáveis (LUIKOV, 1966, citado em LUZ *et al.*, 2006a).

$$X_e = \frac{0,834}{\left(1 + 0,036T_a \ln\left(\frac{1}{ur}\right)\right)} \quad (7)$$

- Halsey (1976) com dois parâmetros ajustáveis (HALSEY, 1976, citado em LUZ *et al.*, 2006a).

$$X_e = 2,982 \left(T_a \ln\left(\frac{1}{ur}\right) \right)^{-0,614} \quad (8)$$

- Henderson-Thompson (1976) com três parâmetros ajustáveis (HENDERSON-THOMPSON (1976), citado em LUZ *et al.*, 2006a).

$$X_e = \left(\frac{-\ln(1-ur)}{0,023T_a - 1,476} \right)^{\left(\frac{1}{0,917}\right)} \quad (9)$$

em que: X_e é a umidade de equilíbrio (b.s.); ur , a umidade relativa do ar e T_a , a temperatura do ar (°C).

O ajuste dos dados experimentais pelas equações de Luikov (1966), de Halsey (1976) e de Henderson-Thompson (1976) pode ser visualizado na Figura 7.

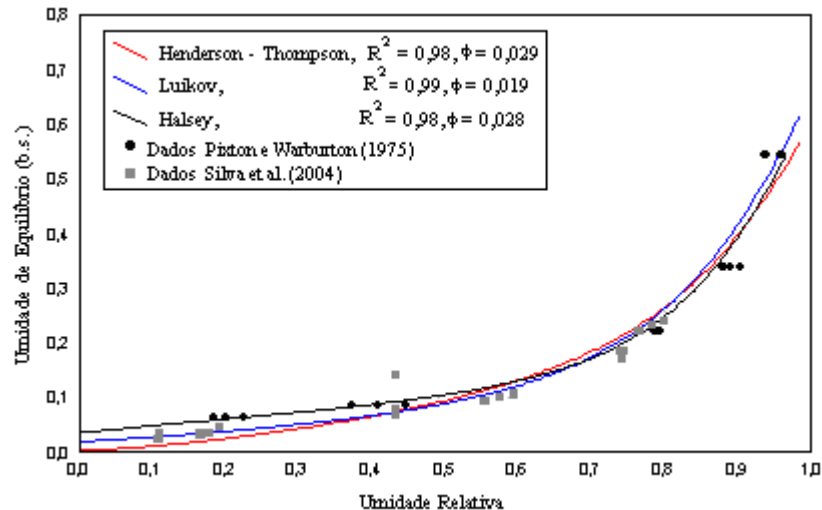


Figura 7. Isothermas de equilíbrio ajustadas para o farelo a 15, 25, 35, 50, 60 e 70°C.

Embora, os ajustes das umidades de equilíbrio do farelo pelas Equações 7 a 9 tenham abordado a variação da temperatura do ar, esta demonstrou influência pouco significativa sobre os dados de umidade de equilíbrio deste produto. Além disso, para a umidade relativa do ar de 0 a 0,6, a umidade de equilíbrio do farelo de soja varia muito pouco e permanece em níveis inferiores a 0,15 (b.s.) (LUZ *et al.*, 2006a).

2.2 SECADORES

A secagem de farelo é realizada, em grande parte, em secadores rotativos com aquecimento indireto, os quais são caracterizados por um alto consumo de energia, segundo Jongeneelen (1976), ocasionado pela ineficiência na transferência de calor entre o produto e o meio secante ou o desconhecimento das melhores condições de operação, elevando os custos de produção e pondo em risco a qualidade do produto.

Mais recentemente, algumas indústrias do Brasil começaram a utilizar o Dessolventizador-Tostador-Secador-Resfriador (*DTDC*). O *DTDC* é um sistema de produção do farelo conjugado em que a secagem ocorre pelo contato do ar quente com o farelo já dessolventizado-tostado, fluidizando este e promovendo altos coeficientes de transferência de calor e massa. Entretanto, a possibilidade de explosão ocasionada pelo contato entre o solvente e ar o aquecido, segundo Witte (1995), ainda desperta insegurança quanto à sua aplicação e, desta forma, continua-se preferindo os secadores rotativos indiretos.

Neste sentido, verifica-se a necessidade de otimizar a produção de farelo investigando-se outros tipos secadores com operação mais eficiente e econômica, buscando-se produtos com especificações mais garantidas a baixo custo e formas de trabalho seguras. Assim, como o *DTDC* mostra que o contato direto entre o agente secante e o sólido traz vantagens significativas em termos de melhoria nas transferências de massa e de calor, decidiu-se estudar a secagem do farelo em um secador rotativo direto. A aplicação deste equipamento também pode ser favorecida pela própria temperatura que o farelo sai do *DT* e pelo uso do ar de secagem na temperatura ambiente, o que pode ser importante também para a economia de energia da planta de processamento da soja.

Os secadores rotativos diretos e indiretos apresentam algumas características em comum e diferentes, sendo as básicas mencionadas a seguir.

2.2.1 Secadores Rotativos Contínuos

Os secadores rotativos contínuos são os mais utilizados industrialmente pela capacidade de processar continuamente desde poucas quantidades de sólido, em kg/h, até 200 toneladas/h, com tempos de residência de 5 a 60 min. Além disso, são muito indicados para sólidos termo-sensíveis (NONHEBEL e MOSS, 1971).

O secador rotativo é constituído de um tubo cilíndrico metálico horizontal, levemente inclinado que gira sobre mancais e rolamentos. Suas dimensões podem apresentar diâmetro 0,3 a 5 m, e comprimento de 5 a 90 m, segundo Yliniemi (1999) e Jover e Alastruey (2006).

De uma forma geral, o sólido é alimentado no secador rotativo por meio da extremidade mais alta do secador e o percorre devido à presença de suspensores, na forma de aletas na parede interna do cilindro, estendidos ao longo do equipamento. O sólido é carregado pelos suspensores até chegar a extremidade superior do cilindro e, ao cair, é lançado mais a frente do equipamento devido à pequena inclinação deste. O movimento do sólido se processa desta forma até chegar à extremidade mais baixa do secador e sair na bica de descarga, enquanto que a fase gasosa e a poeira são removidas por meio de exaustores (COULSON e RICHARDSON, 1968; TREYBAL, 1980).

No secador rotativo, a variável que interfere fortemente na eficiência é a diferença entre as temperaturas de entrada e saída da fase gasosa, enquanto que a taxa de transferência de calor é influenciada pelos suspensores e pela velocidade de rotação. No entanto, ao se tratar da secagem por difusão, deve-se tomar cuidado com a temperatura do

ar de secagem, a fim de evitar o superaquecimento do material e a conseqüente perda de suas propriedades (BARR-ROSIN, 2006).

Os secadores rotativos contínuos são classificados de acordo, com o tipo de transferência de calor entre o sólido e o meio secante, em diretos e/ou indiretos. Serão apresentados aqui somente os secadores rotativos diretos e indiretos.

2.2.1.1 Secador rotativo indireto

Conforme Root (1983), a utilização do secador rotativo indireto está relacionada aos seguintes motivos: a) evita contaminação do produto por reações indesejadas devido ou provocadas pelo contato com o meio secante; b) pode operar sob vácuo ou atmosfera controlada, evitando a degradação do produto; c) a velocidade de agitação pode ser variada também para evitar a degradação do produto. Além disso, este secador apresenta riscos de explosão mínimos e evita o arraste de poeira devido a pouca quantidade de ar dentro do equipamento.

Segundo Nonhebel e Moss (1971), o secador rotativo de contato indireto é aplicado para sólidos que apresentam longo período de taxa decrescente, devido à característica de manter a temperatura interior constante.

O secador rotativo industrial é composto internamente por tubos de aquecimento a vapor que giram junto com o cilindro, os quais se encontram distribuídos simetricamente no perímetro do casco, conforme mostrado na Figura 8. A distribuição dos tubos é feita com os tubos de menor diâmetro na parte mais interna, e os de maior diâmetro, na externa (NONHEBEL e MOSS, 1971; PERRY e CHILTON, 1980).

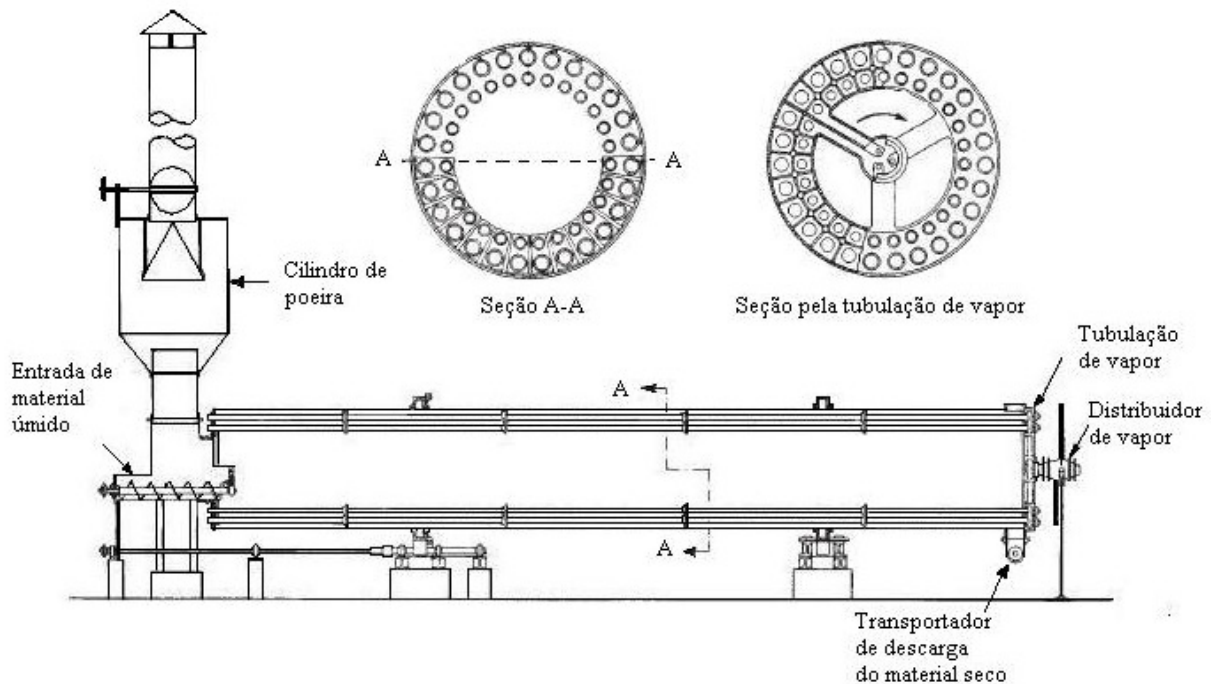


Figura 8. Esquema do secador com aquecimento indireto (PERRY e CHILTON, 1980)

Os secadores indiretos podem apresentar diâmetro entre 1 e 2,5 m, comprimento de 4,5 a 24,5 m e número de tubos entre 14 e 90, com diâmetro externo de 0,06 e 0,11 m. O coeficiente de transferência de calor é variável de acordo com o aumento da temperatura do vapor e do tipo de sólido, podendo chegar a 6,3 kW/m °F. Embora não apareçam os suspensores na Figura 8, os mesmos são inseridos por detrás dos tubos de vapor (PERRY e CHILTON, 1980).

2.2.1.2 Secador rotativo direto

Os secadores com aquecimento direto podem apresentar o escoamento entre o gás e o sólido de forma contracorrente ou concorrente. A primeira tem a vantagem de apresentar maior eficiência térmica e é aplicada a materiais que suportam altas temperaturas do ar de secagem, sendo estas acima de 90°C (STRUMILLO e KUDRA, 1986). A segunda apresenta grande aplicação na secagem de materiais termo-sensíveis a uma dada temperatura do gás de entrada na secagem, pois apresenta rápido resfriamento do gás ocasionado pela rápida evaporação da umidade inicial do produto.

O esquema de um secador direto pode ser conferido na Figura 9.

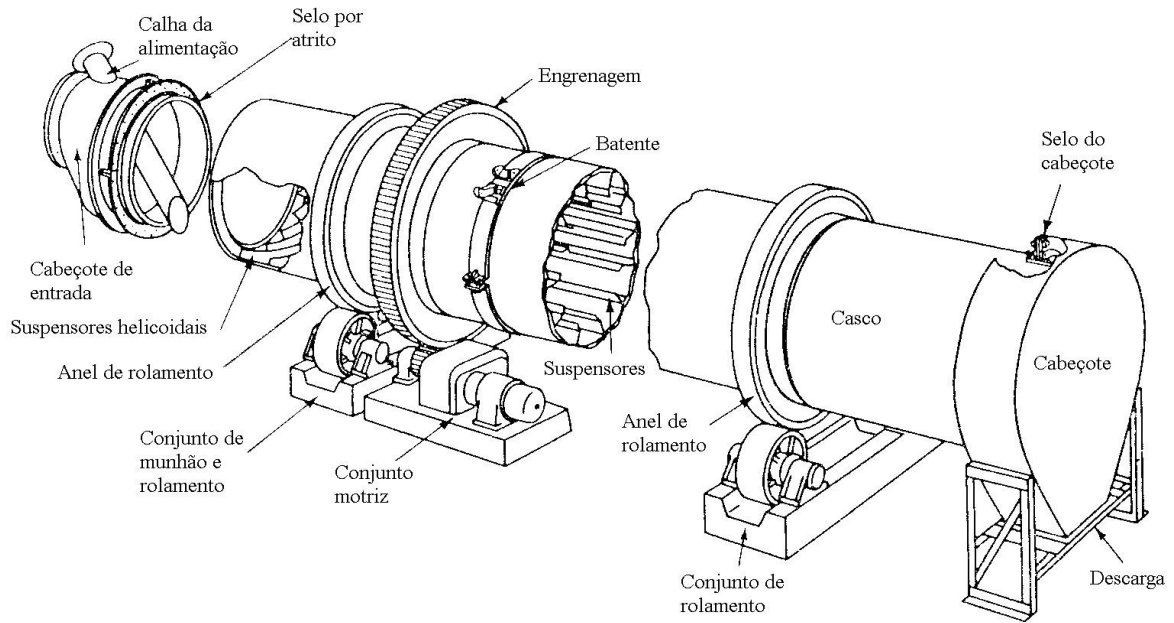


Figura 9. Esquema do secador com aquecimento direto (PERRY e CHILTON, 1980).

Conforme Perry e Chilton (1973), os secadores rotativos diretos podem apresentar diâmetros que variam entre 1 a 3 m e comprimentos que variam entre 8 e 17 m. A velocidade do ar pode variar em função do tamanho das partículas (NONHEBEL e MOSS, 1971)

No secador rotativo direto, a velocidade de rotação do casco e a forma e o número de suspensores são muito importantes para um bom desempenho na secagem dos produtos e a utilização de cada tipo de suspensor está relacionada às propriedades do sólido. Desta forma, alguns modelos de suspensores são mostrados na Figura 10.

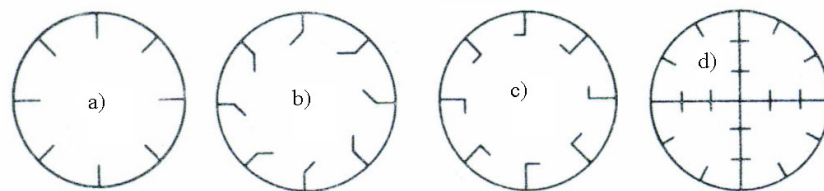


Figura 10. Tipos de suspensores do secador rotativo direto: a) radiais, b) com dobra a 45°, c) com dobra a 90° e d) casco com diafragmas (PERRY e CHILTON, 1980).

2.3 CONSUMO ENERGÉTICO DOS SECADORES ROTATIVOS

A operação de secagem é identificada como uma das maiores consumidoras de energia nas plantas industriais, contribuindo para o aumento dos custos de produção. Mujumdar (1987) relacionou o consumo de energia para vários tipos de secadores, sendo que, para os rotativos, pode variar de 4600 a 9200 kJ/kg de água evaporada. Segundo Strumillo *et al.* (1995), o consumo de energia em secadores rotativos diretos pode ser de 66.10^9 MJ/ano e a eficiência está na faixa de 40 a 70%, encontrando-se consumos de 27.10^9 MJ/ano para polpas e alfafa. Ainda conforme estes autores, o consumo de energia em secadores rotativos indiretos é pouco menor que aquele e de 53.10^9 MJ/ano e a eficiência se encontra na faixa de 75 a 90%. Estes valores de consumo e eficiência são relativos, pois envolvem propriedades do sólido, do fluido e do equipamento.

A utilização do secador rotativo indireto na secagem de farelo de soja também é grande consumidora de energia, como têm mostrado alguns trabalhos de pesquisa na seqüência.

Jongeneelen (1976), ao avaliar o consumo em várias operações de uma planta industrial de processamento da soja, constatou que a secagem do farelo de soja em secadores rotativos indiretos pode corresponder a até 23% da energia gasta na planta, o que representa 0,6 MJ/kg de soja processada. Nesse sentido, o autor propôs a secagem do farelo em secador/resfriador a vácuo.

Também preocupados com este consumo e com a eficiência energética da secagem de farelo no secador rotativo indireto, Paraíso *et al.* (2004b) fizeram um estudo de avaliação energética preliminar deste processo. Para isso, o consumo e a eficiência foram calculados para várias temperaturas de vapor nos tubos e três condições operacionais, considerando todo o comprimento do secador (pontual). As equações utilizadas pelos autores foram as seguintes:

$$e_t = G_s v_s c_{psl} \frac{dt_s}{dz} + G_s \lambda_l R \quad (10)$$

$$e_s = G_s \lambda_l R \quad (11)$$

$$e_f = \frac{e_s}{e_t} \quad (12)$$

em que: e_t é a energia gasta com a elevação da temperatura do sólido (calor sensível) mais a energia gasta com a vaporização da umidade (calor latente) (W); G_s , a massa específica do farelo (kg/m); v_s , a velocidade axial de deslocamento de farelo de soja no secador (m/s);

c_{ps1} , o calor específico do farelo (J/kg K); t_s , a temperatura do farelo (K); z , o comprimento do secador; λ_l , o calor de vaporização da água (J/Kg); R , a taxa de secagem do farelo de soja (kg H₂O/kg sol. seco s); e_s , a energia gasta com a vaporização da umidade no secador (W) e e_f , a eficiência energética do secador.

Os resultados apresentados por Paraíso *et al.* (2004b) indicaram que a condição de operação que forneceu a maior eficiência para o secador foi a seguinte: $T_{sini} = 100^\circ\text{C}$ e $X_{sini} = 0,24$ (b.s.), com um consumo de $2,2 \cdot 10^5$ W. Além disso, com o aumento da temperatura do vapor nos tubos observou-se uma elevação do consumo energético de forma proporcional.

Luz *et al.* (2009a), seguindo a mesma abordagem, realizaram um estudo de desempenho do secador rotativo e variaram, também, a temperatura do vapor nos tubos e as condições de secagem. Contudo, os autores aplicaram outras equações para calcular a eficiência energética do secador (e_f) e a energia total consumida pelo secador (e_t), sendo as mesmas representadas pelas Equações 13 a 15.

$$e_t = \frac{\int_{T_{sini}}^{T_s} \rho_s V_s v_s (c_{ps} + X_{sini} c_{pw}) dT_s + \int_0^z \rho_s V_s \lambda_l K (X_s - X_e) dz}{z} \quad (13)$$

$$e_s = \frac{\int_0^z \rho_s V_s \lambda_l K (X_s - X_e) dz}{z} \quad (14)$$

$$e_f = \frac{e_s}{e_t} \quad (15)$$

em que: e_t é a energia gasta com a elevação da temperatura do sólido (calor sensível) mais a energia gasta com a vaporização da umidade (calor latente) (W); T_s , a temperatura do farelo ($^\circ\text{C}$); T_{sini} , a temperatura inicial do farelo ($^\circ\text{C}$); ρ_s , a massa específica do farelo (kg/m^3); V_s , o volume de farelo no secador (m^3); v_s , a velocidade axial de deslocamento de farelo no secador (m/s); c_{ps} , o calor específico do farelo (J/kg $^\circ\text{C}$); X_{sini} , a umidade inicial do farelo no secador (b.s.); X_s , a umidade do farelo no secador (b.s.); X_e , a umidade de equilíbrio do farelo no secador (b.s.); c_{pw} , o calor específico da água (J/kg $^\circ\text{C}$); λ_l , o calor de vaporização da água (J/Kg); e_s , a energia gasta com a vaporização da umidade no secador (W) e e_f , a eficiência térmica do secador .

Luz *et al.* (2009a) encontraram uma eficiência máxima em torno de 80% para as condições analisadas, sendo esta dentro da faixa de 75 a 90% como sugerem Strumillo e Kudra (1986) e Mujumdar (1995) para o secador rotativo de aquecimento indireto. Ainda

conforme Luz *et al.* (2009a), a temperatura de vapor nos tubos (T_{vt}) que forneceu esta eficiência para $T_{sini} = 90^\circ\text{C}$ e $X_{sini} = 0,24$ (b.s.), foi 84°C ; já, para $T_{sini} = 100^\circ\text{C}$ e $X_{sini} = 0,24$ (b.s.), foi 93°C ; e para a $T_{sini} = 100^\circ\text{C}$ e $X_{sini} = 0,26$ (b.s.), foi $92,5^\circ\text{C}$. Além disso, o trabalho desses autores mostra que, quando são aplicadas temperaturas de vapor acima destes valores, o consumo energético aumenta e ocorre o superaquecimento do farelo; no caso de temperaturas inferiores, o consumo de energia também aumenta, mas ocorre transferência de calor do farelo para os tubos. A condição com $T_{sini} = 90^\circ\text{C}$ e $X_{sini} = 0,24$ (b.s.) e $T_{vt} = 84^\circ\text{C}$ apresentou o menor consumo energético, com 3,4 MW.

O consumo de energia para o estudo da secagem de farelo em secador rotativo direto pode ser estimado a partir da metodologia descrita no Best Practice Manual – Dryers (2007), como apresentado a seguir.

$$EE_t = (c_{pa} + Y_{amb}c_{pv})(T_{aini} - T_{aamb}) \quad (16)$$

$$e_{s1} = (c_{pa} + Y_{amb}c_{pv})(T_{aini} - T_{aamb}) \frac{(100 - r)}{100} \quad (17)$$

$$r = \frac{\left(\frac{(c_{pa} + Y_{amb}c_{pv})(T_{aini} - T_a)}{c_{pw}(T_a - T_{sini}) + \lambda} - (Y_a - Y_{amb}) \right)}{\frac{(c_{pa} + Y_{amb}c_{pv})(T_{aini} - T_a)}{c_{pw}(T_a - T_{sini}) + \lambda}} \quad (18)$$

$$e_{f1} = \frac{e_{s1}}{EE_t} \quad (19)$$

em que: EE_t é o calor total fornecido ao secador (kJ/Kg); c_{pa} , o calor específico do ar (kJ/kg °C); Y_{amb} , a umidade ambiente do ar (b.s.); c_{pv} , o calor específico do vapor de água (kJ/kg °C); T_{aini} , a temperatura de entrada do ar (°C); T_{aamb} , a temperatura do ar ambiente (°C); e_{s1} , a energia gasta com a vaporização da umidade no secador (kJ/kg); T_a , a temperatura de saída do ar (°C); c_{pw} , o calor específico da água (kJ/kg °C); T_{sini} , a temperatura inicial do farelo (°C); λ , o calor de vaporização da água (kJ/Kg); Y , a umidade final do ar (b.s.) e e_{f1} , a eficiência térmica do secador.

2.4 MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO DOS SECADORES ROTATIVOS DIRETO E INDIRETO

Segundo Ramirez (1997), a modelagem e a simulação constituem técnicas muito utilizadas na solução de problemas na área da engenharia de processos, tendo importância, industrialmente, na investigação de parâmetros e distúrbios do processo e na extrapolação

de dados, por apresentar baixo custo e realização de tarefas de forma rápida. Também podem ser somadas a essas vantagens a maior facilidade na realização de testes com modelos do que com testes em uma planta real. Neste sentido, foram desenvolvidos programas computacionais especializados, os simuladores de processos químicos, como HYSYS[®], HYSIM[®], PROCESS[®], SPEEDUP[®], ASPENPLUS[®], conforme apresenta Himmelblau (1998). O MATLAB[®] e MAPLE[®] tem características distintas e constituem “ambientes de programação”, sendo o primeiro, na sua origem, mais voltado para o cálculo numérico e o segundo, para a solução algébrica. Atualmente, as versões de ambos apresentam as duas formas de solução.

Conforme Gong e Mujumdar (2008), os softwares citados anteriormente não têm pacotes específicos para a secagem. Neste contexto, os autores sugeriram em seu trabalho três possíveis softwares comerciais para processos de secagem em regime permanente e situações bem específicas, sendo eles o Simprosys, dryPAK e o DRYSEL. O Simprosys foi desenvolvido para Windows, o dryPAK para DOS e o DRYSEL para Aspen.

De acordo com Strumillo e Kudra (1986), a modelagem baseia-se em: equações que caracterizam o sistema, tais como balanços de massa, de energia e de momento, e equações empíricas e teóricas; princípios de operações unitárias; coeficientes de secagem; condições limites de operação.

Uma vez determinado o modelo, é realizada a simulação, que consiste na resolução das suas equações de forma simultânea, para obter o resultado das variáveis de saída do processo. A simulação, normalmente, é realizada pela implementação do modelo em *softwares* computacionais, como os citados anteriormente. Contudo, os resultados obtidos por simulação podem apresentar desvios em relação aos experimentais ocasionados por aproximações no desenvolvimento do modelo. Assim, para tornar o modelo aceitável determina-se que os desvios devam estar abaixo de 5% para modelos em regime permanente (VOGEL, 1992). Ainda segundo este autor, a validação do modelo transiente, para fim de análise e sintonia de sistemas de controle, é contemplada pela validação do modelo permanente. Luyben e Luyben (1997), ao descrever a identificação de modelos de processo para a aplicação de sistemas de controle, também consideram a validação do modelo dinâmico a partir do modelo estacionário.

A modelagem e a simulação também têm sido realizadas na secagem de diversos materiais desde muito tempo, principalmente para secadores rotativos, no sentido de se

obter melhorias no processo. A maior parte dos trabalhos publicados está relacionada aos secadores de contato direto com modelagem dinâmica, como são mostrados a seguir.

Douglas *et al.* (1993) realizaram a modelagem e a simulação da secagem industrial de açúcar em fluxo contracorrente para estimar a umidade e a temperatura de saída deste produto e implementar sistemas de controle no secador. Os regimes analisados foram o estacionário e o dinâmico, sendo ambos solucionados através do pacote Speedup[®] e validados com dados industriais. Adicionalmente, os autores analisaram os efeitos de distúrbios no sistema para o regime dinâmico, tais como, a variação da temperatura, do fluxo e da umidade de entrada do açúcar, do fluxo de entrada do ar e da velocidade de rotação do secador. Os resultados mostraram que os desvios obtidos para a umidade e a temperatura finais do açúcar foram em torno de $\pm 10\%$, em relação aos dados industriais.

Pérez-Corrêa *et al.* (1998) modelaram e simularam um modelo transiente para um secador rotativo direto para o estudo da implementação de sistemas de controle. Para isso, os autores utilizaram dados de Zavala e Moya (1994) sobre a secagem do farelo de soja em um secador piloto com fluxos concorrentes. Entre estes dados, encontram-se os parâmetros de operação e físico-químicos do farelo de soja, bem como dados experimentais em regime estacionário da secagem do farelo. Os dados do farelo foram utilizados no estudo do modelo dinâmico com perturbações na velocidade axial do farelo no secador, na sua umidade inicial e no seu fluxo de alimentação, manipulando a temperatura de entrada do ar. Os resultados do modelo foram satisfatórios, podendo o mesmo ser utilizado para representar a secagem do farelo em escala piloto e industrial.

Yliniemi (1999) modelou e simulou o secador de fluxo concorrente para calcita (CaCO_3), de forma estacionária e dinâmica, aplicando dados experimentais de taxa de secagem de calcita em várias condições operacionais e dados da literatura. O objetivo do estudo foi encontrar as variáveis que mais perturbaram o sistema, avaliando-se a variação da umidade de entrada do sólido, as variações da umidade de entrada e da velocidade do sólido juntas e a variação da temperatura de entrada do ar, para manipulá-las em controle estratégico. A solução numérica dos modelos foi obtida utilizando-se o *Multimedia Toolbook* e *Simulink* do MATLAB[®], encontrando-se os respectivos desvios de 1,7; 1,2 e -4,9%, para a umidade, e de -18, -19 e 24% para a temperatura da calcita, ao comparar-se os dados experimentais com os simulados.

Rastikian *et al.* (1999) apresentam a modelagem e a simulação de um secador rotativo direto de açúcar de fluxo contracorrente em regime permanente, com a finalidade de determinar os coeficientes de transferência de massa e de calor do produto por meio dos

perfis de umidade e temperatura simulados pelo modelo. No entanto, o secador apresenta duas zonas distintas em seu interior, a zona I de secagem e a zona II de reaquecimento do açúcar. A zona de secagem é caracterizada por um decréscimo da umidade e da temperatura do açúcar devido às altas taxas de evaporação e, a zona de reaquecimento, uma elevação da temperatura do açúcar e quase estabilidade ou pequena diminuição de sua umidade. Considerando este fato, os resultados mostraram que o modelo é válido e representa bem a secagem apenas na zona de secagem do secador, mas é suficiente para a determinação dos melhores coeficientes de transferência de massa e de temperatura nesta área.

Didriksen (2002) realizou a modelagem dinâmica de um secador de açúcar de beterraba por contato direto para utilizá-la no estudo de sistemas de controle *feedback* e preditivo. Para isso, foram consideradas cinco equações para o balanço de massa (três relacionadas a três regiões distintas do sólido, uma para o sólido seco e outra para o gás de secagem) e quatro equações para o balanço de energia (três relacionadas a três regiões distintas do sólido e outra para o gás de secagem). O modelo apresentou resultados satisfatórios, podendo ser utilizado na predição das umidades e temperaturas das fases sólida e gasosa e no controle de processo.

Iguaz *et al.* (2003) estudaram a modelagem e a simulação dinâmica de um secador direto de vegetais com fluxo para estimar a umidade de saída do produto e as temperaturas de saída do produto e do ar e estudos de sistemas de controle. Os resultados foram obtidos considerando-se o secador discretizado e utilizando-se o *Simulink* e o método numérico ode15 do MATLAB[®], sendo o modelo validado com dados de um secador semi-industrial. O trabalho foi complementado com análises do efeito da variação da inclinação, da velocidade de rotação do secador, da umidade e do fluxo de entrada do sólido e do fluxo e da temperatura do ar. Deste modo, foi observado que a temperatura de entrada do ar influencia de forma significativa a umidade final do produto e a temperatura final do ar.

Arruda (2008) realizou a modelagem e simulação da secagem de fertilizante em regime estacionário para os secadores rotativos direto convencional de fluxo contracorrente e roto-fluidizado, almejando obter as melhores condições de trabalho de cada um e, realizar uma comparação de desempenho entre os mesmos. Para isso, o autor levantou dados de fluidodinâmica do secador rotativo convencional, de isotermas de equilíbrio e de cinética de secagem do fertilizante e solucionou o modelo empregando a sub-rotina BVP4C do MATLAB[®]. Os resultados obtidos para os perfis de umidade e de temperatura do fertilizante ao longo dos secadores mostraram boa concordância entre os dados

simulados e experimentais, mostrando que o modelo proposto para os equipamentos pode ser utilizado para prever a umidade e a temperatura final do fertilizante.

A modelagem genérica de secadores com aquecimento indireto foi realizada por Shene e Bravo (1998), os quais desenvolveram modelos em regime permanente e transiente baseados em balanços de massa e energia. Os autores solucionaram os modelos pelo método de Runge-Kutta de 5ª ordem e compararam os perfis simulados de umidade e temperatura do sólido ao longo do comprimento do secador, avaliando as mudanças de fração volumétrica de sólido no secador, de velocidade de rotação, e do coeficiente de transferência de calor. Foram encontrados perfis de umidade do sólido que decaem quase linearmente para ambos os modelos, mas menores para o regime transiente. Já os perfis da temperatura do sólido, permaneceram constantes ao longo do tempo para o regime permanente, exceto quando ocorre a variação do coeficiente da transferência de calor. Os perfis de temperatura em regime transiente apresentaram uma elevação exponencial. Mas, sem dúvida, o fator que alterou os perfis foi a variação da transferência de calor. Tal fato é explicado pela aplicação de um valor constante para o coeficiente de transferência de calor no regime permanente, enquanto que, no regime transiente, este coeficiente varia em função das condições operacionais e, portanto, os comportamentos dos perfis de umidade e de temperatura do sólido apresentam-se mais realistas.

A secagem do farelo de soja é realizada normalmente em secadores de aquecimento indireto. Porém, observou-se na literatura, uma carência quanto à modelagem matemática deste processo em específico, e sendo os poucos trabalhos apresentados por Sartori (2001), Paraíso *et al.* (2004a) e Luz (2006).

Sartori (2001) realizou a modelagem e a simulação dinâmica da secagem do farelo de soja. O autor realizou a discretização do secador e determinou os coeficientes de transferência de calor envolvidos pelo ajuste de dados experimentais. Além disso, foram analisadas as possibilidades de aplicação do modelo simulado no controle preditivo.

Paraíso *et al.* (2004a) e Luz (2006) desenvolveram um modelo para a secagem do farelo em regime estacionário, tendo como meta a simulação de situações operacionais. A solução numérica do modelo foi obtida pelo método de *Runge-Kutta* e *Bogacki* e *Shampine* dada pela sub-rotina *ode23* do MATLAB® e o modelo validado, aplicando-se dados operacionais da indústria de óleo da Cooperativa Mourãoense (COAMO). A diferença entre os trabalhos deve-se à aplicação de dados experimentais no segundo trabalho. Deste modo, Paraíso *et al.* (2004a) obtiveram desvios para a umidade final do farelo de 2,5% em relação ao valor industrial (0,16 b.s.), enquanto que Luz (2006) obteve os respectivos

desvios de umidade e temperatura finais do farelo de 2,14% e 3,5% em relação aos dados na indústria (0,14 b.s. e 95°C). Adicionalmente, Luz (2006) avaliou os perfis de umidade e temperatura do farelo ao longo do secador para diferentes umidades relativas do ar de 30, 40, 50, 60 e 70%, temperatura inicial do farelo de 90, 100, 110 e 120°C, e umidades iniciais de 0,20; 0,22; 0,24 e 0,26 (b.s.). Os resultados mostraram que a umidade e a temperatura final do farelo são afetadas, na maior parte, pela variação da umidade relativa do ar e pela temperatura inicial do farelo.

2.5 ESTRATÉGIAS DE CONTROLE EM PROCESSOS INDUSTRIAIS

Em muitos processos industriais é comum o aparecimento de perturbações ou distúrbios imprevisíveis que podem aumentar o consumo de energia e prejudicar a qualidade final do produto. Neste sentido, os sistemas de controle contribuem para a manutenção dos processos dentro de seus pontos operacionais mais eficientes; previnem condições instáveis no processo que possam por em perigo pessoas e/ou equipamentos; mostram dados aos operadores da planta, para que possam manter o processo seguro e eficiente (COELHO, 2007).

Estes controles são constituídos de um conjunto de ações e equipamentos como sensores e controladores que agem sobre um processo industrial, para manter uma variável de saída dentro de uma faixa desejada. Os controladores são constituídos de modelos algorítmicos, e os mais comuns são os por realimentação (*feedback-FB*), preditivo (*feedforward-FF*), cascata, diferencial, controle de relação, etc (*INDUSTRIAL STEAM SYSTEM PROCESS-CONTROL SCHEMES*, 2007). Dentro do *FB*, os modos básicos de controle mais utilizados são o Proporcional, Integral e Derivativo (*PID*) e o liga-desliga (*on-off*). Outros tipos de controle são utilizados quando modelos envolvidos no processo são empíricos, tais como, as redes neurais (*NN*). O controle lógico *fuzzy* (*FLC*) é baseado no *FB* com um adicional de informações qualitativas como cor ou uniformidade do material (SEBORG *et al.*, 1989).

O projeto de controle necessita de três fases: modelagem dinâmica, projeto do controlador e sua implementação. A etapa de modelagem matemática requer conhecimentos da planta de processamento e sua formulação envolve equações de leis físicas que levam em conta os sinais de entrada e de saída e parâmetros padrões ou desejados. A fase de projeto do controlador objetiva encontrar uma boa performance para o processo a partir do modelo e, devido a este corresponder a um comportamento

aproximado para a planta, pode apresentar discrepâncias, as quais não são conhecidas antes da fase de implementação. A etapa de implementação do modelo pode ser feita utilizando-se um computador digital, sendo que o ajuste para obter os melhores resultados é obtido experimentalmente (YOANNOU e SUN, 1996).

Conforme Silva (2005), o desenvolvimento do controlador depende, essencialmente, da qualidade do modelo do processo, da simulação computacional que torna mais fácil a análise de controle robusto (variação dos parâmetros internos), da tolerância a ruídos de qualquer espécie e permite personalizar a sintonia para determinado processo. O autor ainda defende a simulação pela maior possibilidade de contribuir para a obtenção de resultados satisfatórios de processo que os métodos empíricos e analíticos.

Dentro do contexto abordado anteriormente, os secadores rotativos tem sido muito estudados, visando melhorias de performance operacional, custos e qualidade do produto por meio de diversos tipos de estratégias de controle.

Yliniemi (1999) e Savaresi *et al.* (2001) abordam as dificuldades de se controlar um secador rotativo, devido ao grande período de tempo envolvido, principalmente quando se trata de manter a umidade de saída do produto e de se medir outras variáveis que podem oferecer riscos ambientais. Assim, o controle é usualmente empregado para manter a umidade final do produto dentro de limites especificados, maximizar a produção, minimizar o consumo de energia e os distúrbios, além de manter a temperatura do sólido sob certa condição para evitar a degradação. Ainda segundo o autor, as estratégias de controle fundamentam-se em modelos de processos, em técnicas de sistemas inteligentes, na lógica *fuzzy* e em redes neurais. Tsoureloudis e Kiralakis (2006) também comentam da dificuldade de aplicação do controle em secadores industriais, devido ao tamanho do equipamento e ao longo tempo de residência do sólido, e ao atraso entre a ação de controle e a resposta.

Segundo Pérez-Côrrea *et al.* (1998), as variáveis que podem ser manipuladas no secador rotativo direto são: temperatura de entrada e fluxo de gás, a taxa de alimentação de sólidos e velocidade de rotação do secador. O fluxo de entrada do gás é uma variável fácil de ser manipulada e que afeta outras variáveis de saída de forma rápida e eficiente, além de estar relacionada diretamente com as características do sólido e mecanismo de secagem. Outras variáveis que podem ser controladas, conforme Van Boxtel e Knol (1996), Lipták (1998) e Savaresi *et al.* (2001), são: temperatura de entrada e de saída do gás, umidade do produto, fluxo de gás, temperatura do produto e umidade do gás de saída.

Lipták (1998) apresenta os esquemas típicos de controle de secadores rotativos diretos para fluxos contracorrentes e concorrentes. No primeiro caso, os controles são realizados para manter o fluxo e a temperatura de entrada do ar, e a pressão. No segundo caso, a temperatura do ar de entrada é a variável manipulada. Em ambos os casos, há presença de alarmes, junto aos sensores, para evitar degradação do produto a ser seco. Os esquemas para os secadores de fluxo contracorrente e concorrente são apresentados nas Figuras 11 e 12, respectivamente.

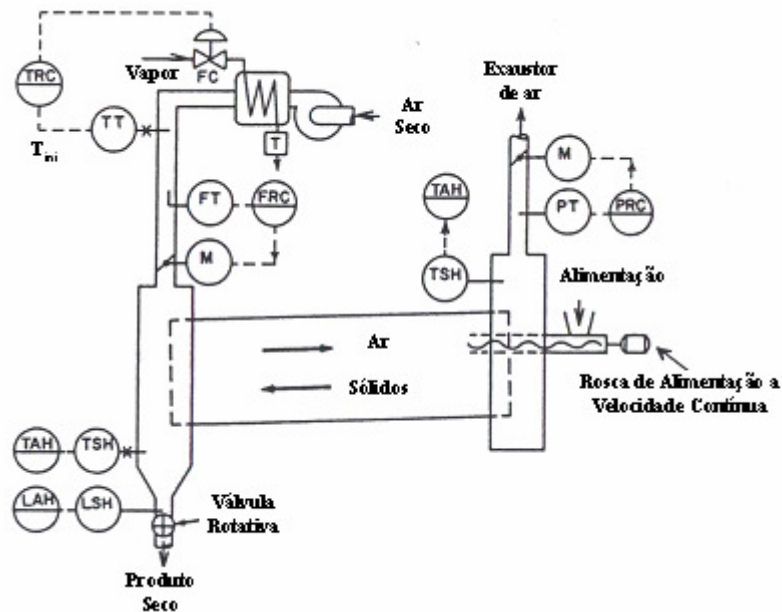


Figura 11. Controle sobre o secador rotativo de fluxo contracorrente (LIPTÁK, 1998)

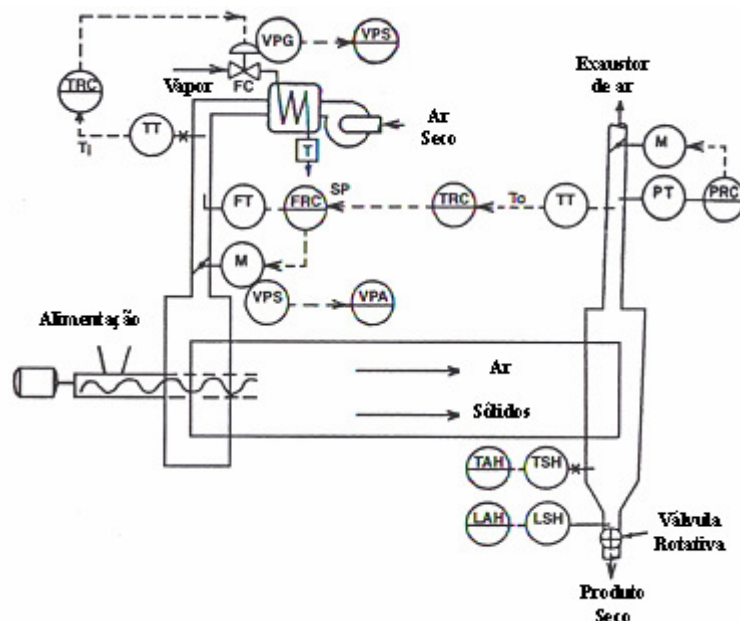


Figura 12. Controle sobre o secador rotativo de fluxo concorrente (LIPTÁK, 1998)

Pérez-Corrêa *et al.* (1998) analisaram a aplicação dos controles proporcional-integral-derivativo (*PID*) e adaptivo em um secador rotativo direto de farelo de soja com fluxo concorrente em escala piloto. O estudo deste sistema de controle deve-se a necessidade de ajustes de sintonia periódicos e forma de trabalho inapropriada no controle da umidade e temperatura de saída do produto. Os resultados encontrados pelos autores mostram que ambos os sistemas de controle indicaram resultados satisfatórios. Entretanto, de acordo com critérios de sintonia, o sistema adaptivo se destaca em relação ao *PID* pelos menores valores de erro apresentados e maiores índices de controle.

Yliniemi (1999) desenvolveu pesquisas visando a implementação de sistemas de controle híbridos secadores rotativos diretos de calcita. Segundo a autora, o controle por realimentação puro é inadequado para manter a variável a umidade de saída da calcita controlada e propôs a análise de controles híbridos. Os controles híbridos foram desenvolvidos com base nas ações proporcional e integral (*PI*) e no controle lógico fuzzy (*FLC*) e nas ações proporcional-integral (*PI*) e em redes neurais (*neural network - NN*). Antes de partir para o estudo dos sistemas híbridos a autora avaliou isoladamente o *PI* e o *feedforward-feedback (FF)* com a finalidade de comparar estes sistemas com os híbridos. Os resultados foram analisados por simulação e em planta piloto e forneceram melhores desempenhos, em termos de precisão, estabilidade, velocidade e custos de controle, para o *FF* seguido do *PI/FLC*. Embora o *FF* tenha sido melhor, era necessário adquirir conhecimentos teóricos e empíricos para o secador, bem com impedimentos de programação que para o tempo real de utilização ficam inviáveis. Com isso, o *PI/FLC* teve aplicação de destaque na secagem da calcita pelo conhecimento e experiência do operador.

Ortega *et al.* (2005) pesquisaram a utilização do *PID* para o secador rotativo direto de fluxos concorrentes utilizando um sistema de múltiplas entradas e múltiplas saídas (*MIMO*). Os autores objetivavam encontrar as melhores condições operacionais do *MIMO*. Para isso, as variáveis controladas foram a umidade do produto de saída do secador e a temperatura do ar de exaustão e, as manipuladas foram o fluxo mássico de combustível e a umidade do produto. Os resultados experimentais e simulados foram comparados e mostraram atingir os critérios de controlabilidade.

Arjona *et al.* (2005) propuseram o emprego do *PID* na secagem de orujo em secador rotativo direto com fluxos concorrentes. O orujo é o produto residual da extração do óleo de oliva (torta), mas após este processo ainda apresenta grande quantia óleo e precisa ser submetido à secagem antes da nova extração de óleo. São necessários dois secadores em série para secar o orujo, e as temperaturas do ar de secagem são

elevadíssimas (700 a 800°C), podendo interferir sobre a qualidade do produto e o consumo de energia. As perturbações na secagem do orujo apontadas pelos autores são a de umidade de entrada deste produto e a temperatura de entrada do gás de secagem e a periódica limpeza da caixa coletora de orujo na saída do primeiro secador. Deste modo, o *PID* foi utilizado de modo a controlar a umidade de saída do orujo pela manipulação da temperatura do gás de secagem e da intensidade de controle, tendo a umidade inicial do orujo como variável perturbada. Assim, a umidade do orujo foi melhor controlada pela manipulação da intensidade do sistema de controle.

Jover e Alastruey (2006) analisaram a aplicação do *PID* de formas monovariável (*Single Input and Single Output SISO*) e multivariável (*Multiple Input and Multiple Output MIMO*) em um secador rotativo direto de um produto não identificado com fluxos paralelos. O objetivo dos autores foi encontrar a melhor forma de controlar a umidade de saída do produto do secador. As variáveis manipuladas no *PID SISO* foram a temperatura de entrada do ar, a velocidade de rotação do secador e fluxo do ar para o laço com controle da temperatura de saída do produto; e, a temperatura de entrada do ar, a velocidade de rotação do secador, o fluxo do ar e o fluxo de entrada do produto para o controle da umidade de saída do produto e do ar de secagem. Os resultados indicam que o *PID MIMO* apresenta menor tempo de simulação e de estabilização, a menor ocorrência de oscilação pode ser obtida com duas variáveis apenas.

Conforme Lipták (2005), no secador rotativo indireto, normalmente, se manipula a pressão do vapor nos tubos para controlar a temperatura do vapor, como mostrado na Figura 13.

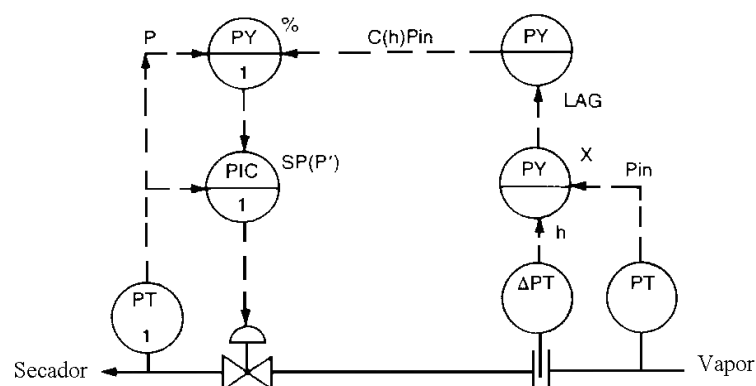


Figura 13. Controle sobre o secador rotativo indireto (LIPTÁK, 2005)

A escolha da estratégia de controle depende do conhecimento do comportamento das variáveis de processo. Neste sentido, estão envolvidos o modo de operação do

equipamento, a forma de funcionamento entre o processo e os equipamentos de instrumentação, as características de processo (sistemas estáveis ou instáveis) e os parâmetros de resposta do sistema (OLIVEIRA *et al.*, 1999). Assim, aproveitando a grande experiência demonstrada pelos trabalhos mencionados anteriormente sobre a implementação do *PID SISO* e *MIMO* na secagem de diversos materiais, verifica-se neste tipo de controle uma boa oportunidade de aplicá-lo na secagem industrial de farelo de soja para evitar perturbações e diminuir custos de produção.

Os conceitos básicos para o desenvolvimento do *PID* neste estudo são apresentados a seguir.

2.5.1 Controladores em *Feedback*

O controle por realimentação (*feedback*) é uma malha de controle utilizada para compensar efeitos de perturbações. Este controle é discutido e caracterizado por Jumah *et al.* (1995) e Bequette (2003). Seus componentes e sua forma de funcionamento podem ser melhor explicados utilizando-se a Figura 14.

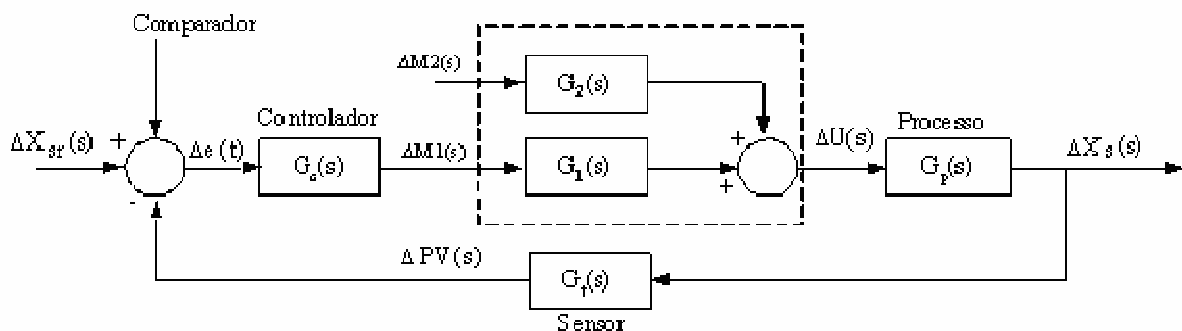


Figura 14. Diagrama de blocos de um sistema com controle (loop fechado)

Na Figura 14, observa-se a presença de um sensor/transmissor, um controlador de processo e o processo. Este sistema trabalha na seguinte ordem: a variável controlada, ΔX_s , é medida e convertida para um variável sinal, ΔPV , por um sensor/transmissor, G_t . O controle *feedback* compara o sinal ΔPV com o valor desejado (*set point*), X_{sr} , e alimenta o sinal de erro, e , através de uma função transferência de controle, G_c . O controlador, então, corrige a variável manipulada, por meio de um elemento final de controle (por exemplo, uma válvula) através de uma função transferência, G_f . A variável manipulada juntamente com a variável perturbada, ΔM_2 , com função transferência G_2 , produzem um novo sinal de processo, ΔU , e o envia através de uma função de processo, G_p . Em função das relações

destas variáveis, podem ser encontrados vários tipos de controladores em *feedback*, podendo o sinal ser elétrico ou pneumático.

De acordo com Oliveira *et al.* (1999) e Bequette (2003), os controladores em *feedback* podem ser classificados em vários tipos a medida que foram evoluindo suas propriedades, como mostrado a seguir:

- Liga – Desliga (*On-Off*)

Este controle é o mais simples e mais econômico dos tipos de controle, pois só permite duas ações no elemento final de controle: ou liga ou desliga, ou situações de válvulas totalmente abertas ou totalmente fechadas, por exemplo. Com essas poucas alternativas a variável manipulada só varia entre valores máximos ou mínimos dependendo da resposta da variável controlada. Com isso, a aplicação deste tipo de controle é restrita, pois está sujeita as oscilações no processo, erro de *off-set* e tempo morto muito grande.

- Proporcional (*P*)

Este controle foi desenvolvido para evitar o movimento de oscilação da variável controlada por controle *on-off* e sua atuação ocorre de forma proporcional ao valor do desvio e instantâneo. Um inconveniente de sua utilização pode ser o erro de *off-set*, o qual pode ser eliminado ou não pela ação do operador. Para a ocorrência do segundo caso, se o valor de *off-set* for relevante deve-se dispor de outra forma de controle mais criteriosa.

- Integral (*I*)

O controle integral foi desenvolvido para eliminar os erros de *off-set* dos controles proporcionais que não podem ser eliminados pelo operador em processos em grande escala. A atuação deste tipo de controle em situações de processo perturbado é feita com relação ao tempo lentamente e vai existir até que o desvio seja anulado. Em função da lentidão, o controle integral pode não desempenhar seu papel com eficiência para processos rápidos.

- Proporcional – Integral (*PI*)

O controle proporcional-integral une as vantagens dos controles integral e proporcional de forma a eliminar as oscilações e os desvios de *off-set* de processo de forma instantânea e ao longo do tempo. A atuação instantânea do controle *PI* pode torná-lo ineficiente em processos lentos. Em termos de precisão e de custo, o *PI* apresenta resultados médios.

- Derivativo (*D*)

O controle derivativo atua fornecendo uma correção antecipada do desvio e diminuindo o tempo de resposta do sistema, sendo a ação do controle proporcional à velocidade de desvio. Contudo, este tipo de controle não deve ser usado sozinho, pois tende a produzir respostas rápidas no elemento final de controle, tornando o sistema instável. Além disso, não deve ser utilizada em processos de resposta rápida ou com ruídos no sinal de medição.

- Proporcional –Integral – Derivativo (*PID*)

O controle proporcional, integral e derivativo contempla todas as vantagens individuais de cada um dos controles, ou seja, o termo proporcional anula as oscilações, o integral elimina os desvios de *off-set* e o derivativo, atua na correção antecipada do desvio. Por estas características, o *PID* é o mais preciso no controle de processos, podendo ser aplicado em qualquer condição de processo virtual, e em situações reais, aplicado normalmente em processo lentos e sem ruídos.

As respostas típicas de alguns dos tipos de controle ou sistema sem controle a uma dada perturbação degrau são apresentadas na Figura 15.

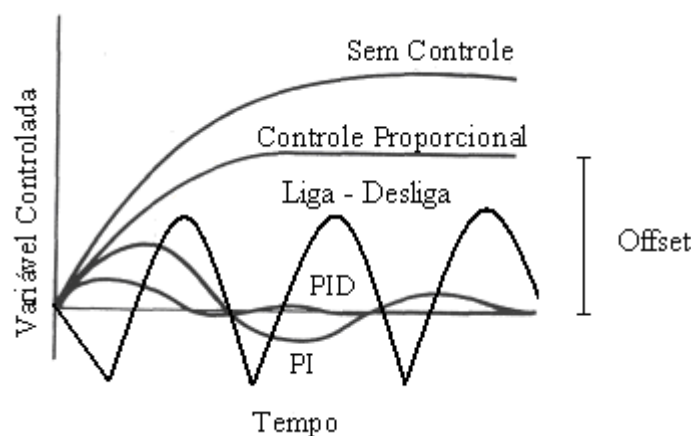


Figura 15. Respostas típicas para variáveis de controle *feedback* (SEBORG *et al.*, 1989)

A Figura 15 apresenta os desvios das curvas de resposta da variável controlada com o tempo a partir de um estado estacionário. Nela é possível observar que a medida que são inseridos os sistemas de controle proporcional, Liga-Desliga, *P*, *PI*, *PID*, o sistema atinge o estado estacionário mais rapidamente e o *off-set* é reduzido.

2.5.1.1 Controle *PID*

Segundo Seborg *et al.* (1989), a aplicação do controle proporcional, integral e derivativo (*PID*) ocorre na engenharia desde os anos 30. Atualmente, o *PID* é muito utilizado nas indústrias para sistemas de controle linear sem variações dinâmicas, por ser fácil de utilizar, necessitando, entretanto, de manutenção constante (PÉREZ-CÔRREA *et al.*, 1998). Conforme Willis (1999), este controle constitui um algoritmo robusto e fácil de ser entendido e o seu desempenho depende do processo dinâmico da planta. Por outro lado, o *PID* é considerado o tipo de controle mais caro (*INDUSTRIAL STEAM SYSTEM PROCESS-CONTROL SCHEMES*, 2007).

Aström e Hägglund (2001) descrevem a aplicação do controle *PID* como o tipo de controle mais utilizado atualmente nas malhas industriais, com cerca de 90% das mesmas. Além disso, o *PID* constitui a arquitetura básica de controles automáticos, sendo a primeira forma utilizada experimentalmente em controles com realimentação.

2.5.1.1.1 Algoritmo do *PID*

De acordo com Bequette (2003), o controlador *PID* é baseado em três ações de controle, o proporcional, o integral e o derivativo, para gerar um só sinal de controle $u(t)$. Estas ações são representadas por cada termo da Equação 20 de forma consecutiva.

$$u(t) = k_p e(t) + k_i \int_0^t e(\tau) d\tau + k_d \frac{de(t)}{dt} \quad (20)$$

em que: $u(t)$ é o sinal de controle; k_p , o ganho proporcional; $e(t)$, o erro atuante ($X_s - X_{sr}$); k_i , o ganho integral, e k_d , o ganho derivativo.

A Equação 20 pode ser reescrita de acordo com as considerações mostradas nas Equações 21 e 22 (BEQUETTE, 2003).

$$k_i = \frac{k_p}{\tau_i} \quad (21)$$

$$k_d = k_p \tau_d \quad (22)$$

em que: τ_i é o tempo integral, τ_d , o tempo derivativo.

Ao substituir as Equações 21 e 22 na Equação 20, tem-se a Equação 23, dada a seguir.

$$u(t) = k_p \left[e(t) + \frac{1}{\tau_i} \int_0^t e(\tau) d\tau + \tau_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (23)$$

Normalmente, as equações em função do tempo são solucionadas por sistemas computacionais como equações no domínio de *Laplace*, desta forma a Equação 23 fica:

$$u(s) = k_p \left(1 + \frac{I}{\tau_i s} + \tau_d s \right) e(s) = k_p \left(\frac{\tau_d \tau_i s^2 + \tau_i s + I}{\tau_i s} \right) e(s) \quad (24)$$

2.5.1.1.2 Parâmetros de sintonia do *PID*

Existem vários métodos para determinar os parâmetros de sintonia controle *PID*, tais como, Ziegler-Nichols, Tyreus-Luyben, Cohen-Coon, ferramentas de software, Biggest Log Modulus (BLT) (LIPTÁK, 1998; OGATA, 1998; BEQUETTE, 2003). A utilização de cada um está relacionada às características do processo investigado.

Aström e Hägglund (2004) definiram método de Ziegler-Nichols como o mais comum na determinação dos parâmetros de sintonia do controle *PID*, contudo, gera resultados com pouca robustez. Tal fato pode ser esclarecido pela falta de dados sobre processo em questão. Neste sentido, vem crescendo o desenvolvimento de outros métodos mais eficientes de ajuste de sintonia.

Conforme Berto *et al.* (2004) e Fernandes Jr. *et al.* (2005), o método de *Ziegler-Nichols* baseia-se num ajuste em malha fechada até a obtenção de oscilações de amplitude constante. Os valores dos ganhos do controle *PID*, os termos integral e derivativo são ajustados a um valor mínimo, enquanto que, o termo proporcional é aumentado até encontrar o termo chamado “ganho crítico” (k_{co}), comprovado por uma oscilação no sinal de saída do laço (*loop*). Obtidos os valores de k_{co} e do período de oscilação (P_o), os mesmos podem ser substituídos na relação apresentada por Luyben e Luyben (1997) e Lipták (1998), resultando nas seguintes equações.

$$k_p = 0,6k_{co} \quad (25)$$

$$\tau_i = \frac{P_o}{2} \quad (26)$$

$$\tau_d = \frac{P_o}{8} \quad (27)$$

A determinação dos parâmetros de sintonia por Cohen-Coon é baseada em uma técnica gráfica e foi desenvolvida, segundo Coughanowr e Lowell (1986), para ajustar os controladores pela aplicação de pequenas perturbações em malha aberta, as quais asseguram a operação numa faixa linear. Este método depende de leituras prévias na planta aplicadas quando há respostas de desvio com razão de decaimento de $\frac{1}{4}$ (WILLIS,

1999). Para tanto, a estimativa dos valores do desvio mínimo e das propriedades favoráveis podem ser calculadas em função do registro da curva da variável medida ($G(t)$), versus tempo (t), como mostrado na Figura 16.

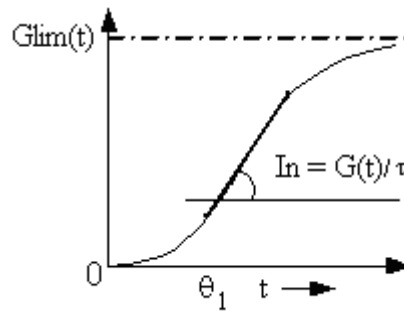


Figura 16. Curva típica de reação de processo (COUGHANOWR e LOWELL, 1986)

Ao analisar a Figura 16, nota-se a presença de uma curva em S, na qual ao traçar-se uma reta tangente do ponto de inflexão à abscissa, encontra-se o tempo morto aparente (θ_I). A inclinação (I_n) desta reta é dada pela Equação 28.

$$I_n = \frac{G_{lim}(t)}{\tau} \quad (28)$$

em que: τ é o tempo aparente.

Como a inclinação (I_n), é proporcional à $1/\tau$, a Equação 28 pode ser reescrita como:

$$\tau = \frac{G_{lim}(t)}{I} \quad (29)$$

O ganho de processo em regime estabelecido (k_r) pode ser calculado como:

$$k_r = \frac{G_{lim}(t)}{Me} \quad (30)$$

em que: $G(t)$ é a variável medida, e Me a medida da perturbação.

Após a determinação dos valores de τ , k_c e θ_I (Figura 16), calcula-se os parâmetros de ajuste k_p , τ_i e τ_d conforme as equações dadas a seguir.

$$k_p = \frac{1}{k_r} \frac{\tau}{\theta} \left(\frac{4}{3} + \frac{\theta}{4\tau} \right) \quad (31)$$

$$\tau_i = \theta \frac{32 + 6(\theta/\tau)}{13 + 8(\theta/\tau)} \quad (32)$$

$$\tau_d = \theta \frac{4}{11 + 2(\theta/\tau)} \quad (33)$$

Ainda conforme Willis (1999), para um tempo morto muito pequeno (quase zero), o ganho no controle pode ser predito. Este método não é indicado para os casos em que o

tempo de atraso é zero ou não existe. O método *Biggest Log Modulus* (BLT) e o método de *Tyres-Luyben* consistem em uma extensão do método de *Ziegler-Nichols*.

2.5.1.1.3 Critérios de desempenho do *PID*

Segundo Corriou (2004), o *PID* deve garantir a estabilidade e um desempenho satisfatório para uma larga faixa de frequências, ser robusto (ser intensivo para vários processos e na modelagem de erros), manter a variável controlada sem largas variações, as variações do *set point* devem ser rápidas e moderadas, etc.

Neste sentido, os critérios mais utilizados para avaliar as melhores condições de atuação do *PID* para uma perturbação em degrau são: tempo para atingir o primeiro pico, tempo de elevação (*rise time*), tempo de estabilização, taxa de amortecimento ou área mínima (*decay ratio*), frequência ou período de oscilação do regime transiente (P_o), taxa de excedimento do limite (*overshoot ratio*) (BEQUETTE, 2003). Estes critérios são ilustrados na Figura 17.

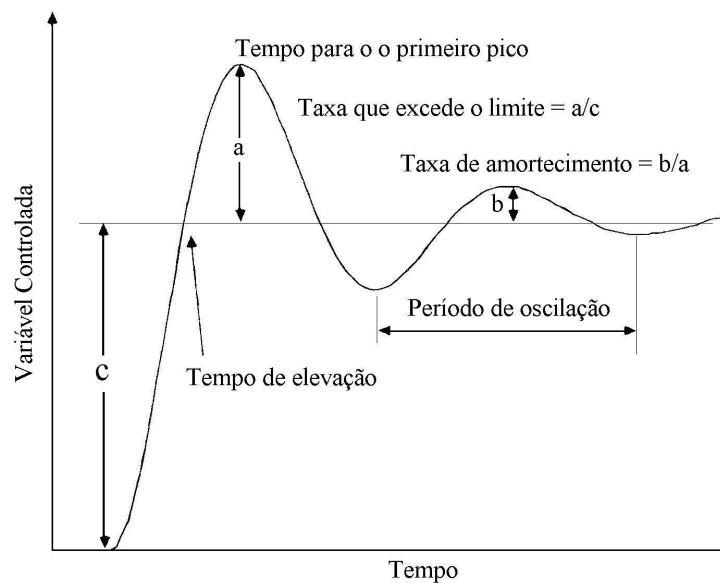


Figura 17. Curva de resposta de processo com controle *PID* e perturbação em degrau (BEQUETTE, 2003)

O *rise time* é tempo em que se atinge o valor do novo regime estacionário. O *overshoot* corresponde a razão entre o primeiro pico e o novo regime estacionário. A taxa de amortecimento é definida como a razão entre os dois primeiros picos e normalmente corresponde a $1/4$. O período de oscilação é o tempo decorrido entre sucessivos picos.

Outra forma de melhorar estes critérios de escolha de uso do *PID* é pela alteração manual dos parâmetros deste controle. Ao aumentar o valor do ganho proporcional (k_p), a resposta do processo é menos lenta, no entanto se este for muito grande aumenta a oscilação do sistema. O aumento do tempo integral (τ_i) torna o controle *PID* mais lento, enquanto que, o tempo derivativo apresenta dificuldades de generalização de comportamento, pois ao ser aumentado (em pequenos valores) tende a melhorar a resposta, diminuindo o erro ao máximo, entretanto, a aplicação de valores grandes leva à oscilação do sistema (SEBORG *et al.*, 1989). A variação destes efeitos também podem ser verificadas nas Figuras 18 a 20.

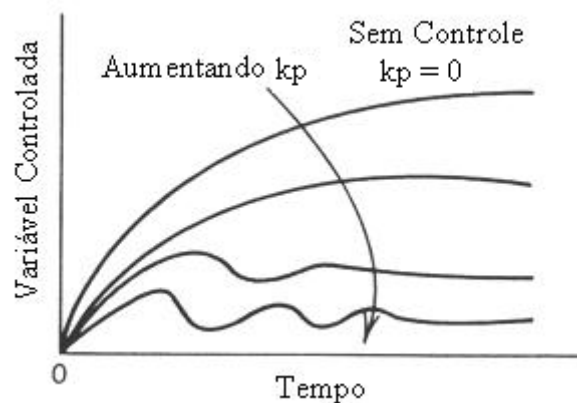


Figura 18. Efeito do controle proporcional (SEBORG *et al.*, 1989)

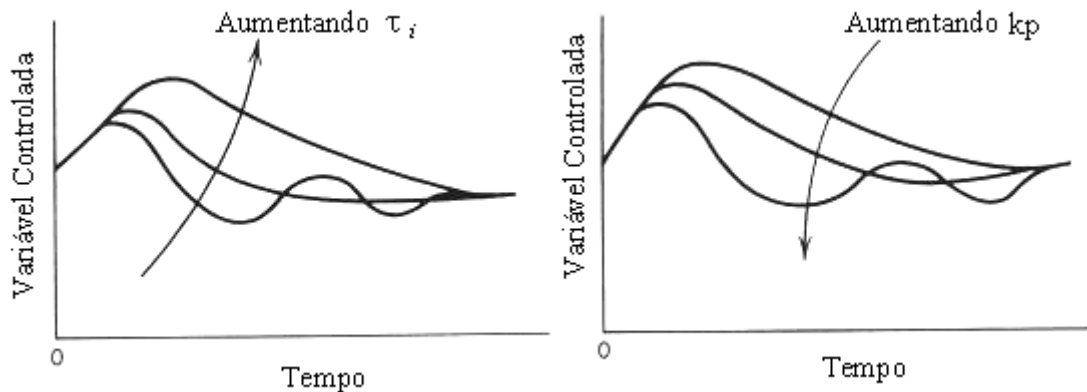


Figura 19. Efeitos: a) do reajuste do tempo integral; b) do ganho proporcional (SEBORG *et al.*, 1989)

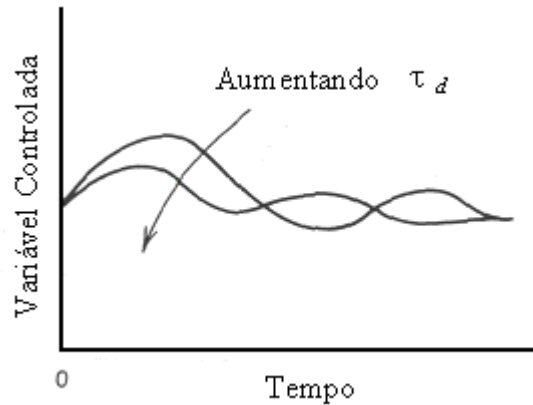


Figura 20. Efeito do tempo derivativo (SEBORG *et al.*, 1989)

Segundo Silva (2005), o bom desempenho do controlador *PID* do sistema da planta onde está incluso depende da sintonia dos seguintes termos: a) das condições de saturação do sinal atuante, b) da limitação do ganho do termo derivativo em altas frequências, e c) da ponderação do sinal de referência por um fator adequado. Shaw e Simões (1999) descrevem que a sintonia depende da otimização simultânea destes termos.

Outros critérios de avaliação do controle *PID* envolvem o cálculo do desvio ou erro, tais como, a Integral do Erro Absoluto (*ITAE*), ou a Integral do Erro Quadrático (*ISE*).

Conforme Silva (2005), o cálculo da Integral do Erro Absoluto ponderado pelo Tempo (*ITAE*) (Equação 34) constitui um índice de desempenho realizado em função do erro, assim sendo, para um erro inicial grande, o resultado é um valor pequeno da integral, caso contrário, a resposta dos tempos finais é penalizada.

$$ITAE = \int_0^{\infty} t|e(t)|dt \quad (34)$$

Outro índice de desempenho é a Integral do Erro Quadrático (*ISE*) (Equação 35) caracterizado pela facilidade de ser calculado e proporcionar grandes ponderações para erros grandes, e pequenas ponderações para erros pequenos. Além disso, é pouco seletivo, ou seja, as variações nos parâmetros do processo levam a pequenas variações no índice *ISE*. A mudança para minimizar este índice pode ser uma resposta rápida, e baixa estabilidade relativa tendo como consequência oscilações (SILVA, 2005).

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t)dt \quad (35)$$

As técnicas de sintonia podem ser conferidas de forma mais detalhada nos trabalhos de Luyben (1986), Seborg *et al.* (1989), Zhuang e Atherton (1993), Ogata (1998), Panagopoulos *et al.* (1998), Aström e Hägglund (2001), e Bandyopadhyay *et al.* (2001), os quais constituem a base das pesquisas recentes.

2.5.1.1.4 Entradas de processo padrão

Conforme Seborg *et al.* (2004), normalmente define-se variáveis de entrada aquelas que influenciam as variáveis de saída processo, podendo ser diferenciadas em variáveis perturbadas ou manipuladas. Deste modo, as variáveis de entrada podem apresentar seis tipos de variações que são em: degrau, rampa, pulso retangular, senoidal, impulso, e aleatórias.

As entradas em degrau são decorrentes de perturbações repentinas nos processos industriais e são representadas pela Equação 36.

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ Mag & t \geq 0 \end{cases} \quad (36)$$

em que: $U(t)$ é o desvio da variável de entrada; t , o tempo, e Mag , a magnitude da variação.

Normalmente, as equações em função do tempo são solucionadas por sistemas computacionais como equações no domínio de *Laplace*, assim, a Equação 36 resulta em:

$$U(t) = \frac{Mag}{s} \quad (37)$$

As entradas em rampa ocorrem frequentemente em processos industriais e podem apresentar aumento ou decréscimo gradual por um certo tempo com inclinação constante. A entrada em rampa é representada pela Equação 38.

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ at & t \geq 0 \end{cases} \quad (38)$$

em que: a é o coeficiente angular.

A transformada de Laplace para a Equação 38 é representada a seguir.

$$U(t) = \frac{a}{s^2} \quad (39)$$

As entradas em pulso retangular por algum motivo apresentam entrada em degrau, mas voltam ao estado original, sendo tal comportamento representado pela Equação 40.

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ n & 0 \leq t \leq t_w \\ 0 & t \geq t_w \end{cases} \quad (40)$$

em que: n é a amplitude do degrau e t_w , a largura do pulso.

Ao transformar as relações da Equação 40 por Laplace, tem-se apenas uma equação, como apresentado a seguir:

$$U(s) = \frac{n}{s^2} (1 - e^{-t_w s}) \quad (41)$$

A entrada em pulso também pode ser triangular e a equação que representa o comportamento da variável de entrada no sistema é:

$$U(t) = \frac{2}{t_w} (t - 2(t - t_w)S(t - t_w/2) + (t - t_w)S(t - t_w)) \quad t \geq 0 \quad (42)$$

Ao aplicar a transformada de Laplace na Equação 42, tem-se:

$$U(s) = \frac{2}{t_w} \left(\frac{1 - 2e^{-t_w s/2} + e^{-t_w s}}{s^2} \right) \quad (43)$$

A entrada sinusoidal representa as perturbações cíclicas em um determinado processo e são representadas pela Equação 44.

$$U(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ A_m \sin \omega t & t \geq 0 \end{cases} \quad (44)$$

em que: A_m é a amplitude e ω , a frequência angular que está relacionada com o período P ($P = 2\pi/\omega$).

A transformada de Laplace para a Equação 44 é:

$$U(s) = \frac{A_m \omega}{s^2 + \omega^2} \quad (45)$$

A entrada em impulso apresenta a transformada de Laplace mais simples de todas, como pode ser verificado pela Equação 46. Entretanto, este tipo de comportamento é raramente encontrado em plantas industriais.

$$U(s) = 1 \quad (46)$$

Com as entradas aleatórias fica complicado definir as funções do tempo e as transformadas de Laplace. Deste modo, sugere-se avaliar as perturbações por métodos estatísticos, como média ou desvio padrão.

2.5.1.1.5 Critérios do modelo de processo para o desenvolvimento de sistemas de controle *feedback*

O projeto de sistemas de controle depende de modelos que representem o processo com precisão e, para identificar o melhor deles, comparam-se suas curvas de resposta perturbadas em degrau e suas frequências com o processo real (LUYBEN e LUYBEN, 1997). Os critérios desta técnica são melhores explicados a partir da Figura 21.

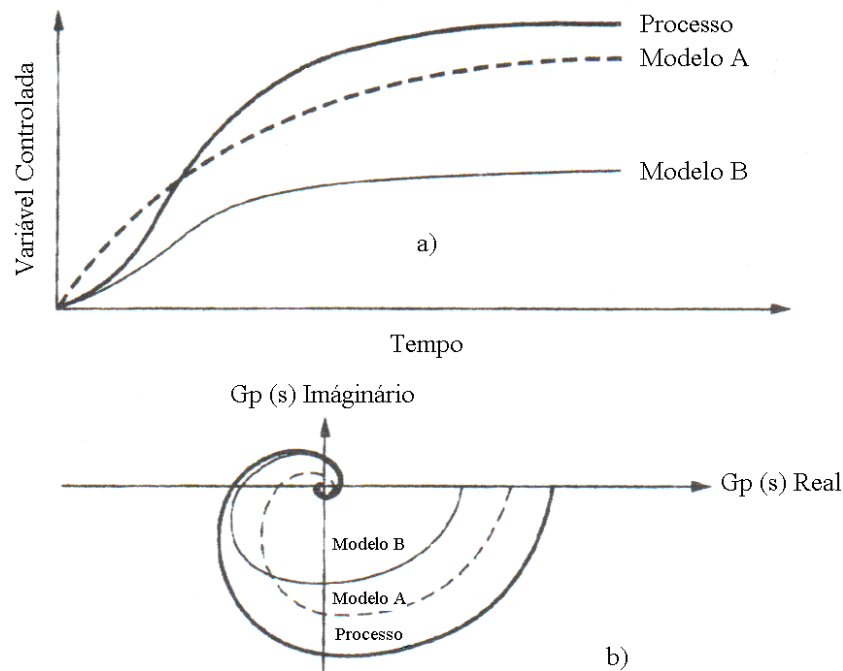


Figura 21. Curvas de resposta e frequência de um processo real e de dois modelos A e B (LUYBEN e LUYBEN, 1997)

Na Figura 21a) pode ser observado que o modelo A ajusta melhor o processo real próximo ao regime estacionário, enquanto que o modelo B ajusta melhor o processo no início do regime transiente. Esses comportamentos dos modelos geram dúvidas quanto as suas aplicações ainda, sendo então utilizada a metodologia de Nyquist que consiste na representação gráfica dos valores das funções transferência dos modelos e do processo, como apresentado na Figura 21b). Esta por sua vez, considera que o melhor modelo para o controle *feedback* é aquele que apresenta a curva mais próxima do processo real para a faixa de frequência acima do ponto $(-1,0)$, como o modelo B. Com isso, verifica-se que o melhor modelo é aquele que representa melhor a dinâmica do processo.

2.5.1.1.6 Variáveis manipuladas, perturbadas e controladas

O conhecimento das possíveis variáveis perturbadas, manipuladas e controladas é muito importante para a estrutura do projeto de controle dos processos. Desta forma, as estruturas de controle podem ser montadas com simples entrada e simples saída (*Single Input and Single Output SISO*), múltiplas entradas e simples saída (*Multiple Input and Single Output MISO*) e múltiplas entradas e múltiplas saídas (*Multiple Input and Multiple Output MIMO*).

A escolha das variáveis de controle normalmente está relacionada ao julgamento de aspectos econômicos, de segurança, de limitações, e da disponibilidade e confiança de sensores. Moore e Dows (1981), citado por Luyben e Luyben (1997), propõem uma técnica para a escolha dessas variáveis em um processo por meio da decomposição do valor singular pelo uso de elementos de uma matriz de processo regime estacionário. A escolha das variáveis manipuladas é dada pelo maior valor singular mínimo da matriz ganho. Outra forma de fazer a escolha das variáveis é pela eliminação das combinações pobres como a sugerida pelo índice de Niederlinsk (1971), citado por Luyben e Luyben (1997), que quando negativos indicam combinações instáveis. O bom senso também contribui para eliminação de combinações esta técnica, como a presença de tempo morto muito grande num dado processo (LUYBEN e LUYBEN, 1997).

2.6 CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO II

A revisão apresentada neste capítulo permitiu obter as seguintes conclusões:

- as características de secagem do farelo de soja apresentadas são importantes para o sucesso do modo de operação e futuros estudos de projeto de secadores, modelagem, simulação e controle deste processo.
- verificou-se uma lacuna de trabalhos de secadores alternativos ao convencional secador rotativo indireto de farelo de soja em termos de custos de produção e de qualidade deste produto, cujas propriedades são importantes para a sua competitividade no mercado;
- a utilização de um secador rotativo direto pode favorecer este processo pela própria temperatura que o farelo sai do *DT* e pelo uso do ar de secagem na temperatura ambiente, o que pode ser importante também para a economia de energia da planta de processamento da soja;

- a utilização de estratégias de controle, como o *PID*, pode tornar a utilização do secador rotativo direto mais significativa.

Nos próximos capítulos serão apresentados os materiais e métodos, principais resultados e discussões e conclusões sobre cada um dos secadores rotativos indireto e direto com a finalidade de avaliar a utilização de cada um deles.

CAPÍTULO III

3 MATERIAIS E MÉTODOS

No Capítulo III, são apresentados os materiais e a seqüência de procedimentos necessários a modelagem matemática e a simulação dos secadores rotativos com aquecimento indireto e direto, assim como suas respectivas análises de desempenho energético e aplicação dos sistemas de controle *PID*.

3.1 MATERIAIS

3.1.1 Secador Rotativo da COAMO

O secador rotativo indireto industrial de farelo em avaliação encontra-se instalado na Cooperativa de Campo Mourão (COAMO), localizada na região Noroeste do Paraná - Brasil e apresenta 17 m de comprimento do cilindro, 2 m de diâmetro, rotação de 7 rpm, inclinação de 5° e 87 tubos internos, sendo 32 deles com diâmetro externo de 2,5 in, 23 com 3 in e 32 com 4 in.

A carga e descarga de farelo neste equipamento, bem como a forma de operação são realizados como apresenta-se na seção 2.2.1, sendo controlada somente a pressão de vapor nos tubos em função da necessidade de um teor de umidade final do farelo maior ou menor.

3.1.2 Farelo de Soja

O farelo de soja tostado da COAMO é alimentado ao secador com uma vazão 77000 toneladas/h e apresenta umidade inicial entre 0,20 a 0,24 (b.s.). A umidade final após a secagem pode variar de acordo com sua finalidade, devendo ser de 0,14 (b.s.) para a comercialização, de acordo com a Portaria n° 795 de 15/12/93 do Ministério da Agricultura. Para atender a esta especificação, normalmente o vapor de aquecimento do secador é utilizado a 1,5 atm de pressão absoluta (correspondendo a 111°C).

A temperatura de entrada do farelo no secador é próxima a 100°C, podendo sair com temperaturas variáveis em função da umidade final do farelo na saída do equipamento.

3.2 ESTUDO DO SECADOR ROTATIVO INDIRETO

3.2.1 Modelagem Matemática Dinâmica do Secador Rotativo Indireto

O estudo da dinâmica de secagem do farelo é normalmente realizado com o objetivo de prever o perfil de resposta do sistema, quando o processo é submetido a variações de carga ou perturbações no sistema. Este estudo é efetivado normalmente utilizando-se um modelo dinâmico, apresentado mais detalhadamente a seguir.

O desenvolvimento do modelo matemático dinâmico do secador rotativo de farelo com aquecimento indireto em regime transiente foi realizado a partir de um modelo simplificado em regime permanente obtido por Luz (2006), de um modelo desenvolvido por Sartori (2001) em regime transiente na secagem do mesmo material e também por Yliniemi (1999), em regime transiente na secagem de calcita. A aplicação de um modelo dinâmico está relacionada à futura aplicação de sistemas de controle do secador, os quais dependem fundamentalmente do tempo.

O modelo dinâmico é obtido por meio de equações diferenciais de balanço de massa e de energia num volume de controle do secador rotativo indireto, considerando-se a presença da fase sólida, constituída pelo farelo de soja, e da fase gasosa, constituída pelo vapor de água e pequena quantidade de ar. O volume de controle que representa este sistema é apresentado na Figura 22.

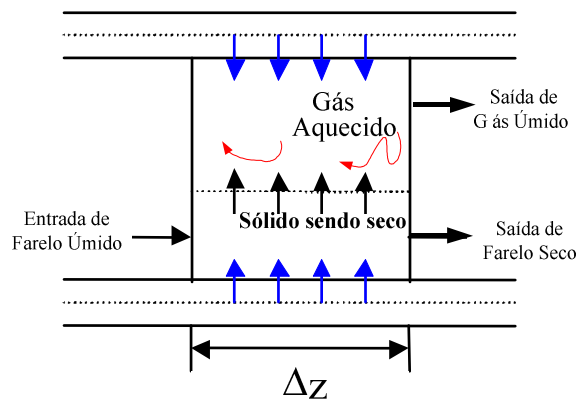


Figura 22. Esquema do volume de controle do secador

A fim de se obter um modelo simplificado, foram admitidas as seguintes hipóteses, de acordo com Yliniemi (1999), Sartori (2001) e Luz (2006):

- O escoamento é unidimensional;
- A densidade do farelo permanece constante ao longo do secador;
- O tempo de residência médio é constante ao longo do secador;

- d) O coeficiente global de transferência de calor entre o vapor e sólido permanece constante ao longo do secador e do tempo;
- e) O coeficiente de transferência de massa varia em função da temperatura do meio secante e da umidade contida no sólido;
- f) A transferência de calor para o farelo por condução é desprezível, quando comparada com o calor de convecção;
- g) A transferência de umidade da fase gasosa para o sólido é desprezível;
- h) A transferência de massa é da fase sólida para a fase vapor;
- i) A fase sólida é homogênea;
- j) A perda de carga é desprezível;
- k) Os calores específicos são constantes;
- l) A velocidade axial de deslocamento do sólido é constante ao longo do secador e do tempo;
- m) A temperatura e a umidade da fase sólida são funções da coordenada axial e do tempo;
- n) A temperatura da parede dos tubos é constante ao longo do secador, e corresponde a temperatura do vapor de aquecimento saturado;
- o) As perdas de calor para o ambiente são desprezíveis;
- p) A energia de dessorção é igual a energia de evaporação.

3.2.1.1 Balanço de massa

O balanço de massa para o farelo de soja (Figura 22) no elemento diferencial do secador é dado pela Equação literal 47 e, matematicamente, pela Equação 48:

$$\begin{aligned} & \{ \text{Umidade no sólido no elemento diferencial} |_t \\ & - \text{Umidade no sólido no elemento diferencial} |_{t+\Delta t} \} = \\ & - \{ \text{Umidade que entrou com o sólido no elemento diferencial} |_z \\ & + \text{Umidade que saiu com o sólido no elemento diferencial} |_{z+\Delta z} \\ & - \text{Umidade evaporada do sólido no elemento diferencial} \} \end{aligned} \quad (47)$$

$$M_s X_s |_t - M_s X_s |_{t+\Delta t} = -\dot{M}_s X_s \Delta t |_z + \dot{M}_s X_s \Delta t |_{z+\Delta z} - M_s R \Delta t \quad (48)$$

em que: M_s é a massa de farelo de soja (kg); X_s , a umidade do farelo (b.s.); t , o tempo (s); \dot{M}_s , a vazão mássica de farelo (kg/s); z , o comprimento do volume de controle do secador (m) e R , a taxa de secagem (1/s).

A massa de farelo (M_s) e a vazão mássica do farelo (\dot{M}_s) são definidas pelas Equações 49 e 50, respectivamente.

$$M_s = \rho_s A_s \Delta z \quad (49)$$

$$\dot{M}_s = v_s A_s \rho_s \quad (50)$$

em que: ρ_s é a massa específica do farelo seco (kg/m^3); A_s , a área ocupada por sólido (m^2) e v_s , a velocidade axial de deslocamento do farelo no secador (m/s).

Ao substituir as Equações 49 e 50 na Equação 48, tem-se:

$$\rho_s A_s \Delta z X_s |_{t+\Delta t} - \rho_s A_s \Delta z X_s |_{t-\Delta t} = \rho_s A_s v_s X_s \Delta t |_{z-\Delta z} - \rho_s A_s v_s X_s \Delta t |_{z+\Delta z} - \rho_s A_s R \Delta z \Delta t \quad (51)$$

Ao simplificar os termos $\rho_s A_s$, comuns a todos os termos, tem-se:

$$\Delta z X_s |_{t+\Delta t} - \Delta z X_s |_{t-\Delta t} = v_s X_s \Delta t |_{z-\Delta z} - v_s X_s \Delta t |_{z+\Delta z} - R \Delta z \Delta t \quad (52)$$

Dividindo-se a Equação 52 por $\Delta z \Delta t$, e aplicando-se os limites quando $\Delta z \rightarrow 0$, e $\Delta t \rightarrow 0$ tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(X_s |_{t+\Delta t} - X_s |_{t-\Delta t})}{\Delta t} = - \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{(v_s X_s |_{z-\Delta z} - v_s X_s |_{z+\Delta z})}{\Delta z} - R \quad (53)$$

Como a velocidade de deslocamento do farelo (v_s) é constante, a Equação 53 é reescrita, ficando:

$$\frac{dX_s}{dt} = -v_s \frac{dX_s}{dz} - R \quad (54)$$

A taxa de secagem (R) foi calculada por meio da Equação 55.

$$R = K (X_s - X_e) \quad (55)$$

em que: K é o coeficiente de transferência de massa entre o ar e o farelo ($1/\text{s}$) e X_e , a umidade de equilíbrio do farelo (b.s.).

Ao substituir a Equação 55 na Equação 54, tem-se:

$$\frac{dX_s}{dt} = -v_s \frac{dX_s}{dz} - K (X_s - X_e) \quad (56)$$

3.2.1.2 Balanço de energia

O balanço de energia para o farelo de soja (Figura 22) no elemento diferencial do secador é representado, de forma literal, pela Equação 57 e, matematicamente, pela Equação 58.

$$\begin{aligned}
& \{ \text{Energia no sólido no elemento diferencial} \}_t \\
& - \text{Energia no sólido no elemento diferencial} \}_{t+\Delta t} = \\
& \{ - \text{Energia que entrou com o sólido no elemento diferencial} \}_z \\
& + \text{Energia que saiu com o sólido no elemento diferencial} \}_{z+\Delta z}
\end{aligned} \tag{57}$$

+Calor adquirido por convecção para evaporar a umidade do sólido no elem. dif.
- Calor de vaporização da umidade do sólido no elemento diferencial}

$$M_s H_s |_{t+\Delta t} - M_s H_s |_t = -\dot{M}_s \Delta t H_s |_z + \dot{M}_s \Delta t H_s |_{z+\Delta z} + A_s \Delta z \dot{Q} \Delta t - M_s \lambda R \Delta t \tag{58}$$

em que: H_s é a entalpia do sólido (kJ/kg); \dot{Q} , o calor sensível de vaporização da água (kJ/kg) e λ , o calor latente de vaporização da água (kJ/kg).

A Equação 58 foi reescrita substituindo-se os termos M_s e \dot{M}_s , definidos pelas Equações 49 e 50.

$$\begin{aligned}
& \rho_s A_s \Delta z H_s |_{t+\Delta t} - \rho_s A_s \Delta z H_s |_t = \\
& - \rho_s A_s v_s \Delta t H_s |_z + \rho_s A_s v_s \Delta t H_s |_{z+\Delta z} + A_s \dot{Q} \Delta z \Delta t - \rho_s A_s \lambda R \Delta z \Delta t
\end{aligned} \tag{59}$$

Ao dividir a Equação 59 por $\rho_s A_s$, tem-se:

$$\Delta z H_s |_{t+\Delta t} - \Delta z H_s |_t = -v_s \Delta t H_s |_z + v_s \Delta t H_s |_{z+\Delta z} + \frac{\dot{Q} \Delta z \Delta t}{\rho_s} - \lambda R \Delta z \Delta t \tag{60}$$

Dividindo-se a Equação 60 por $\Delta z \Delta t$, e aplicando-se os limites quando $\Delta z \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$, tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{(H_s |_{t+\Delta t} - H_s |_t)}{\Delta t} = - \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{lim(v_s H_s |_z - v_s H_s |_{z+\Delta z})}{\Delta z} + \frac{\dot{Q}}{\rho_s} - \lambda R \tag{61}$$

Ou:

$$\frac{dH_s}{dt} = -v_s \frac{dH_s}{dz} + \frac{\dot{Q}}{\rho_s} - \lambda R \tag{62}$$

A entalpia do sólido (H_s) é calculada conforme apresentado na Equação 63.

$$H_s = (c_{ps} + X_{sini} c_{pw}) T_s \tag{63}$$

em que: c_{ps} é o calor específico do farelo (kJ/kg °C); X_{sini} , a umidade inicial do sólido (b.s.) e c_{pw} , o calor específico da água líquida (kJ/kg °C).

O calor recebido pelo sólido (\dot{Q}), foi obtido conforme a Equação 64, sendo considerado que a temperatura de vapor nos tubos (T_{vt}) é igual a temperatura do ar dentro do secador (T_a).

$$\dot{Q} = a_s h_c (T_{vt} - T_s) \tag{64}$$

em que: a_s é a área superficial do farelo de soja pelo volume do secador (m^2/m^3); h_c , o coeficiente de transferência de calor entre o sólido e os tubos de vapor ($kJ/sm^2 \text{ } ^\circ C$) e T_{vt} , a temperatura do vapor de aquecimento do farelo ($^\circ C$).

Ao substituir as Equações 63 e 64 na Equação 62, tem-se:

$$\frac{d((c_{ps} + X_{sini}c_{pw})T_s)}{dt} = -v_s \frac{d((c_{ps} + X_{sini}c_{pw})T_s)}{dz} + \frac{a_s h_c (T_{vt} - T_s)}{\rho_s} - \lambda R \quad (65)$$

Como $(c_{ps} + X_{sini}c_{pw})$ é constante, a Equação 65 é simplificada:

$$\frac{dT_s}{dt} = -v_s \frac{dT_s}{dz} + \frac{1}{(c_{ps} + X_{sini}c_{pw})} \left(\frac{a_s h_c (T_{vt} - T_s)}{\rho_s} - \lambda R \right) \quad (66)$$

Substituindo a Equação 55 na Equação 66, tem-se:

$$\frac{dT_s}{dt} = -v_s \frac{dT_s}{dz} + \left(\frac{1}{c_{ps} + X_{sini}c_{pw}} \right) \left(\frac{a_s h_c (T_{vt} - T_s)}{\rho_s} - \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (67)$$

3.2.1.3 Equações complementares

A solução das equações diferenciais requer que sejam conhecidas algumas propriedades do farelo de soja e variáveis do secador rotativo, as quais podem ser obtidas a partir das Equações 68 a 83, mostradas a seguir, sendo que o diâmetro médio do farelo, determinado experimentalmente por granulometria por Luz (2006), é de 1,5 mm.

O coeficiente de transferência de massa farelo-ar (K) é calculado segundo Luz *et al.* (2009b) conforme a Equação 68. Esta equação de K foi ajustada para os dados do farelo em uma faixa de temperatura do ar (T_a) que vai de 50 a 97 $^\circ C$, como já apresentado na seção 2.1.2.2.

$$K = (-4,7 \cdot 10^{-3} T_a + 0,77) X_s^2 + (2,2 \cdot 10^{-3} T_a - 0,25) X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{71,81}{T_a}\right) \quad (68)$$

A umidade de equilíbrio (X_e) é calculada conforme apresentado por Luz *et al.* (2006a) pela Equação 69.

$$X_e = \frac{0,834}{\left(1 + 0,036(T_a + 273,15) \ln\left(\frac{1}{ur}\right)\right)} \quad (69)$$

em que ur é a umidade relativa do ar de secagem (%/100).

As Equações 68 e 69 apresentam K e X_e calculado em função da temperatura do ar (T_a). Entretanto, a quantidade de ar no secador rotativo indireto é pequena e a interferência do ar é menor neste caso. Deste modo, considerou-se que a aplicação destas equações no

modelo matemático deve considerar que a temperatura do ar é a mesma do farelo. No caso de X_e , a temperatura do ar não teve muita influência sobre a X_e como a ur , como discutido na seção 2.1.2.3. Além disso, a ur foi considerada constante, pois a substituição de seu valor por uma equação, como a apresentada por Marin *et al.* (2001) em que $ur = ur(Tbs, Tu, P)$, não teve resultados satisfatórios, necessitando-se de maior tempo para fazer outras investigações a respeito disso.

A área superficial do farelo de soja pelo volume do secador (a_s) é calculada por meio da Equação 70 (CUTLIP e SHACHAN, 1999).

$$a_s = \frac{6 f_s}{\Psi d_p} \quad (70)$$

em que: f_s é a fração de sólidos no secador; Ψ , a esfericidade do farelo e d_p , o diâmetro da partícula (m).

A esfericidade do farelo (Ψ) é determinada conforme mostrado na Equação 71 (GEANKOPLIS, 1993).

$$\Psi = \frac{1}{10} / 10^{1,82(1-\varepsilon)} \quad (71)$$

em que ε é a fração de vazios do farelo.

A fração de vazios do leito parado (ε) é obtida pela Equação 72 (HENDERSON e PERRY, 1976).

$$\varepsilon = 1 - \frac{\rho_{ap}}{\rho_s} \quad (72)$$

em que: ρ_{ap} é a massa específica aparente do sólido (kg/m^3) e ρ_s , a massa específica do sólido (kg/m^3).

O volume de sólido (V_s) é calculado conforme a Equação 73.

$$V_s = \frac{\dot{M}_s t_r}{\rho_s} \quad (73)$$

em que t_r é o tempo de residência do farelo no secador em regime permanente (s).

O tempo de residência do farelo (t_r) é determinado de acordo com o modelo mostrado pela Equação 74 (PERRY e CHILTON, 1980).

$$t_r = \frac{0,19L}{N^{0,9} D_e S} \quad (74)$$

em que: L é o comprimento do secador (m); N é a velocidade de rotação do secador (rpm); D_e , o diâmetro efetivo do secador (m) e S , a inclinação do secador (m/m).

O volume do secador (V_{sec}) é determinado de acordo com a Equação 75.

$$V_{sec} = \frac{L\pi D_e^2}{4} \quad (75)$$

O diâmetro efetivo do secador (D_e) é obtido conforme mostrado na Equação 76.

$$D_e = d_{sec} - d_{tub} \quad (76)$$

em que: d_{sec} é o diâmetro real do secador (m) e d_{tub} , a soma do diâmetro dos tubos do secador rotativo (m).

O coeficiente de transferência de calor convectivo (h_c) é o mais significativo e, por isso, é considerado como global, sendo calculado por meio da correlação proposta por Whitaker (1972), conforme mostrado pela Equação 77.

$$N_u = 2 + (0,4R_e^{0,5} + 0,06R_e^{2/3})P_r^{0,4} \quad (77)$$

em que: N_u é o número de Nusselt; R_e , o número de Reynolds e P_r , o número de Prandtl.

O número de Nusselt (N_u) é definido conforme a Equação 78 (WHITAKER, 1972).

$$N_u = h_c d_p / k_v \quad (78)$$

em que k_v é a condutividade térmica do vapor (kW/m K).

O número de Reynolds (R_e) é calculado conforme a Equação 79, considerando que $0,35 < R_e < 76000$ (WHITAKER, 1972).

$$R_e = d_p v_t \rho_v / \mu_v \quad (79)$$

em que: v_t é a velocidade terminal das partículas (m/s); ρ_v , a densidade específica do vapor (kg/m^3) e μ_v , a viscosidade do vapor (kg/ms).

O número de Prandtl (P_r) é determinado conforme a Equação 80, considerando que $0,71 < P_r < 380$ (WHITAKER, 1972).

$$P_r = c_{pv} \mu_v / k_v \quad (80)$$

em que: c_{pv} é o calor específico do vapor de água (kJ/kg °C).

O cálculo da velocidade terminal das partículas de farelo (v_t) é realizado por meio da Equação 81, considerando que o regime é turbulento e apresenta um coeficiente de arraste (C_D) de 0,44 (CUTLIP e SHACHAN, 1999).

$$v_t = \left(\frac{4d_p g (\rho_s - \rho_v)}{3C_D \rho_v} \right)^{0,5} \quad (81)$$

em que g é a aceleração gravitacional (m/s^2).

A velocidade axial de deslocamento do sólido (v_s) foi obtida por meio do modelo apresentado pela Equação 82 (BALCHEN e MUMMÉ, 1998).

$$v_s = \frac{\Delta z}{\Delta t} = \frac{L}{t_r} \quad (82)$$

O cálculo do calor de vaporização da água (λ) é realizado pela Equação 83.

$$\lambda = 2500 - c_{pv}(T_s) \quad (83)$$

3.2.2 Solução Numérica do Modelo do Secador Rotativo Indireto

Para solucionar numericamente o modelo matemático do secador rotativo indireto foram desenvolvidos dois programas, um principal e uma sub-rotina no MATLAB[®].

O programa principal foi desenvolvido com base em:

- dados calculados pelas equações complementares (seção 3.2.1.3);
- dados operacionais (umidade e temperatura do farelo, vazão de sólidos) e dados de projeto (diâmetro interno e comprimento) do secador industrial rotativo indireto da COAMO;
- dados físicos do farelo;
- dados de umidade relativa do ar na região de localização da COAMO;
- equação do balanço de massa para o farelo de soja (Equação 56);
- equação do balanço de energia para o farelo de soja (Equação 67);
- equação do coeficiente de transferência de massa (Equação 68);
- equação da umidade de equilíbrio do farelo de soja (Equação 69).

A sub-rotina foi desenvolvida indicando-se a sub-rotina do MATLAB[®] necessária para se obter a solução das equações diferenciais 56 e 69 (função *ode45* que utiliza o método numérico de *Runge-Kutta* e *Dormand-Prince*), bem como as condições de contorno da umidade e da temperatura inicial do farelo, a variação do tempo e o número de elementos usados na discretização do secador. A utilização da sub-rotina *ode45* está relacionada a obtenção de resultados coerentes na solução das equações diferenciais parciais (*EDOs*) e por ela solucionar até mesmo equações do mesmo gênero em condições *stiff*.

Os resultados numéricos e gráficos dos perfis de temperatura e de umidade do farelo de soja e do ar ao longo do tempo foram conferidos chamando-se pelo nome da sub-rotina na tela principal do MATLAB[®].

A partir do modelo desenvolvido, foi realizada sua validação e a análise da influência da variação das condições operacionais.

3.2.3 Validação do Modelo do Secador Rotativo Indireto

A finalidade deste estudo é avaliar a capacidade do modelo de prever a umidade e a temperatura final deste produto. Assim, para validar o modelo matemático do secador rotativo indireto, dados de umidade e temperatura de farelo de soja foram obtidos na planta industrial da COAMO (Cooperativa de Campo Mourão). Para isso, cinco amostras foram coletadas nesta empresa no tempo de residência do secador e depois, suas umidades contidas foram analisadas nos laboratórios do departamento de Engenharia Química da UEM pelo método da estufa. Quanto a determinação das temperaturas de entrada e saída do farelo no secador, utilizou-se um medidor de temperatura do tipo infravermelho.

A validação do modelo poderia ser mais completa utilizando-se valores de umidade para diferentes pontos do secador, o que se mostrou impossível devido as características do mesmo.

3.2.4 Influência das Condições Operacionais

A secagem do farelo de soja no secador rotativo indireto pode ser influenciada por variáveis importantes, sendo as principais:

- variação da temperatura de vapor nos tubos: necessidade de maior ou menor quantidade de transferência de calor ao farelo para a remoção de sua umidade;
- variação da umidade inicial do farelo de soja: mudanças na umidade do produto na saída do dessolventizador/tostador (equipamento ao qual o farelo é submetido antes da secagem) ou junção de produtos de alimentação do secador com umidades diferentes, como farelo de soja e lecitina, por exemplo;
- variação da velocidade de deslocamento do farelo de soja: necessidade de aceleração ou desaceleração da correia de transporte entre o DT e o secador, ou da velocidade de rotação do secador.

Entretanto, a extensão do efeito dessas variações sobre a umidade e a temperatura na descarga de farelo do secador ainda é uma lacuna e seu estudo é significativo para distinguir quais delas podem ser manipuladas e perturbadas na análise da dinâmica deste processo. Desta forma, realizou-se várias simulações com modelo dinâmico proposto para o secador rotativo indireto utilizando-se dados próximos às condições normais de operação para avaliar os seus efeitos sobre a umidade e temperatura finais do farelo. Os dados utilizados nesta análise são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1. Condições de operação avaliadas.

Parâmetros Variados	Condições Avaliadas		
	Menor	Média	Maior
Temperatura do vapor de aquecimento (°C)	101	111	121
Umidade inicial do farelo de soja (b.s.)	0,20	0,22	0,24
Velocidade de deslocamento do farelo (m/s)	0,0656	0,0820	0,0984

Uma vez definidas as variáveis de processo, os dados de umidade e temperatura finais do farelo foram simulados utilizando-se os programas e dados apresentados na seção 3.2.2, mudando apenas uma variável da Tabela 1 de cada vez, mantendo-se as restantes constantes. Os resultados das simulações para cada caso foram analisados por comparação gráfica.

3.2.5 Consumo Energético

A avaliação do consumo de energia na secagem, tendo-se como volume de controle todo o secador, objetiva averiguar a condição de temperatura do vapor de aquecimento que leve ao menor consumo energético, confiando àquela a manutenção da qualidade final do farelo e o menor custo de produção. Neste sentido, considerou-se, para efeito de comparação e quantificação com o secador rotativo direto (seção 3.3.4), que somente os gastos com energia na forma térmica são relevantes. como a de movimentação do farelo, a de circulação do ar ou do vapor, etc, são aproximadamente iguais entre os secadores em análise.

Assim, o consumo energético do secador rotativo indireto de farelo de soja foi avaliado de duas formas. Na primeira, avaliou-se somente os gastos de energia com a secagem do farelo e, na segunda, os gastos de energia com a secagem do farelo e os gastos de energia com a elevação da água até a temperatura de vapor nos tubos.

3.2.5.1 Consumo de energia na secagem do farelo no secador rotativo indireto

Para a avaliação da energia total consumida pelo secador rotativo indireto (E_t), para diferentes temperaturas de vapor nos tubos de aquecimento do sólido, utilizou-se a Equação 84, apresentada por Luz *et al.* (2009a).

$$E_t = \frac{\int_{T_{sini}}^{T_s} \rho_s V_s v_s (c_{ps} + X_{sini} c_{pw}) dT_s + \int_0^z \rho_s V_s \lambda K (X_s - X_e) dz}{z} = E_{ta} + E_{tb} \quad (84)$$

em que: E_t é o consumo total de energia (kW); E_{ta} , a energia gasta com a elevação da temperatura do farelo (kW); E_{tb} , a energia gasta com a vaporização da umidade (kW).

O fator de eficiência (FEf) é um valor que possibilita avaliar a quantidade de energia fornecida ao secador que está sendo efetivamente aplicada no processo para vaporizar a água. Seu cálculo também é baseado na avaliação apresentada por Luz *et al.* (2009a) e Smith (2005) e pode ser estimado pela Equação 85.

$$FEf = \frac{\int_0^z \rho_s V_s \lambda K (X_s - X_e) dz}{E_t} \quad (85)$$

As Equações 84 e 85 foram aplicadas no programa MATLAB[®], sendo solucionadas empregando-se dados operacionais iniciais da secagem do farelo e dados resultantes do modelo em regime permanente, dados de projeto do secador e do próprio farelo, avaliando-se diferentes condições de temperatura do vapor nos tubos.

3.2.5.2 Consumo de energia na secagem do farelo aquecendo a água da temperatura ambiente até temperatura do vapor de secagem

A avaliação do consumo energético da secagem do farelo, considerando-se o aquecimento da água até a temperatura de secagem, é realizada aplicando-se a Equação 86.

$$E_{t1} = \frac{M_v (\Delta H_v) + \int_{T_{sini}}^{T_s} \rho_s V_s v_s (c_{ps} + X_{sini} c_{pw}) dT_s + \int_0^z \rho_s V_s \lambda K (X_s - X_e) dz}{E_{tc} + E_{ta} + E_{tb}} = \quad (86)$$

em que: M_v é a massa de vapor nos tubos (kg); H_v , a entalpia do vapor nos tubos (kJ/kg); E_{tc} , a energia gasta para elevar a temperatura da água líquida até a temperatura do vapor de aquecimento na secagem (kW).

A determinação da massa de vapor (M_v) é realizada, para cada condição, utilizando-se a Equação 87. Tal cálculo é necessário pelo desconhecimento da vazão de vapor na indústria.

$$M_v = \frac{E_t}{\Delta H_v} \quad (87)$$

O fator de eficiência (FEf) é calculado aplicando-se a mesma definição da seção 3.2.5.1, conforme mostrado na Equação 88.

$$FEf = \frac{\int_0^z \rho_s V_s \lambda K (X_s - X_e) dz}{E_{t1}} \quad (88)$$

A solução das Equações 86 a 88 é realizada da mesma maneira apresentada para a seção 3.2.5.1.

3.2.6 Desenvolvimento do Controle *PID* para o Secador Rotativo Indireto

O estudo da viabilidade de aplicação do controle *PID SISO* e *MISO* no processo de secagem do farelo de soja deve ser desenvolvido em três etapas: desenvolvimento de um modelo dinâmico do processo de secagem, avaliação da dinâmica de processo e aplicação do controle *PID* de forma computacional.

3.2.6.1 Desenvolvimento do modelo dinâmico de secagem do farelo

O desenvolvimento do modelo matemático para aplicação no controle foi baseado no modelo de parâmetros distribuídos apresentado anteriormente. Entretanto, as Equações 56 e 67 foram modificadas para representar o sistema como se fosse de parâmetros concentrados, sendo esta simplificação compensada pela introdução de um retardo por transporte, isto é, considera-se que, fisicamente, este volume de controle (concentrado) percorre o secador.

A modificação realizada na Equação 56 teve apenas o termo dX_s/dz substituído por $(X_s - X_{sini})/(L-0)$, enquanto que, na Equação 67, apenas o termo dT_s/dz foi substituído por $(T_s - T_{sini})/(L-0)$. Tal fato é considerável pois o que interessa nesta análise são somente as umidades e temperaturas de entrada e saída do farelo do secador, já que não temos como controlar pontos localizados ao longo do comprimento do secador. Também haveria muitas equações de balanços de massa e energia do modelo de parâmetros discretos a serem implementadas no controle deste sistema, sendo que o que interessa é principalmente o tempo para atingir o regime permanente. Desta forma, obteve-se um modelo de parâmetros concentrados representado pelos balanços de massa e de energia descritos abaixo.

O balanço de massa para o farelo de soja no controle é dado pela Equação 89.

$$\frac{dX_s}{dt} = -\frac{v_s}{L} (X_s - X_{sini}) - K (X_s - X_e) \quad (89)$$

O balanço de energia para o farelo de soja no controle é dado pela Equação 90.

$$\frac{dT_s}{dt} = -\frac{v_s}{L}(T_s - T_{sini}) + \left(\frac{I}{(c_{ps} + X_{sini}c_{pw})} \right) \left(\frac{a_s h_c V_{sec} (T_{vt} - T_s)}{M_s} - \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (90)$$

A solução numérica das Equações 89 e 90 foi obtida por meio do programa MATLAB®, empregando-se os mesmos dados operacionais iniciais da secagem do farelo e os dados de projeto do secador e do próprio farelo apresentados na seção 3.2.2.

3.2.6.2 Dinâmica de secagem do farelo

O estudo da dinâmica de secagem do farelo é normalmente realizado com o objetivo de prever o perfil de resposta do sistema, quando o processo é submetido a variações de carga ou perturbações. Este estudo é efetivado utilizando-se normalmente um modelo dinâmico, o qual já foi mostrado anteriormente.

Entretanto, a implementação do modelo dinâmico ao computador necessita ser realizada na forma de Equações de Estado para facilitar a interação das equações envolvidas na aplicação do sistema de controle. Para isso, o modelo dinâmico (Equações 89 e 90) foi linearizado pela aplicação das séries de Taylor obtendo-se Equações semelhantes às Equações 91 e 92, as quais devem ser solucionadas simultaneamente. O uso de Equações de Estado com a linearização é aceitável e justificável neste caso, pois almeja-se uma avaliação comparativa da dinâmica da secagem do farelo sobre as variáveis operacionais mais em termos qualitativos que quantitativos. Já para uma avaliação das estratégias de controle, a linearização também é justificável, pois o sistema de controle deverá manter o ponto operacional próximo ao valor desejado.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (91)$$

$$y = Dx \quad (92)$$

em que: \dot{x} representa as equações diferenciais de balanço de massa e de energia do sistema; x , as variáveis controladas, u , as variáveis de entrada, y , as variáveis de saída e A , B , D , os respectivos coeficientes destas variáveis.

As variáveis manipuladas e perturbadas foram definidas a partir do estudo das condições operacionais das variáveis que mais influenciaram no resultado da umidade e da temperatura finais do farelo. A partir das simulações verificou-se que as variáveis que podem ser manipuladas são a velocidade de entrada do farelo (v_s) e a temperatura do vapor de aquecimento do farelo (T_{vt}) e as perturbadas podem ser, a umidade de entrada do farelo no secador (X_{sini}) e a velocidade de deslocamento do farelo (v_s). Deste modo, estas

variáveis foram analisadas nos sistemas de controle, sugerindo-se trabalhar de acordo com os casos apontados na Tabela 2.

Tabela 2. Variáveis do controle *feedback*

Casos	Variáveis	Variáveis	Variáveis
	Perturbadas	Manipuladas	Controladas
I	X_{sini}	v_s	X_s
II	v_s	T_{vt}	X_s
III	X_{sini}	T_{vt}	X_s

Assim, \dot{x} , x , u , A , B e D podem ser apresentados pelas Equações 93 a 100.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dX_s}{dt} \\ \frac{dT_s}{dt} \end{bmatrix} \quad (93)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_s \\ T_s \end{bmatrix} \quad (94)$$

sendo u para o caso I da Tabela 2:

$$u = \begin{bmatrix} X_{sini} \\ v_s \end{bmatrix} \quad (95)$$

sendo u para o caso II da Tabela 2:

$$u = \begin{bmatrix} v_s \\ T_{vt} \end{bmatrix} \quad (96)$$

sendo u para o caso III da Tabela 2:

$$u = \begin{bmatrix} X_{sini} \\ T_{vt} \end{bmatrix} \quad (97)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (98)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (99)$$

$$D = \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} \quad (100)$$

sendo os elementos das matrizes A e B definidos pelas Equações 101 a 116.

$$a_{11} = -\frac{v_s}{L} - (X_s - X_e) \left(2(-4,7 \cdot 10^{-3} T_s + 7,7 \cdot 10^{-1}) X_s + (2,2 \cdot 10^{-3} T_s - 0,25) + K \right) \quad (101)$$

$$a_{12} = -(X_s - X_e) \left(\begin{array}{l} -4,7 \cdot 10^{-3} X_s^2 + 2,2 \cdot 10^{-3} X_s - 2,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{71,81}{T_s^2} \right) \exp\left(\frac{71,81}{T_s} \right) + \\ K \left(0,834 \left(\frac{0,036 \ln(1/ur)}{1 + (T_s + 273,15) 0,036 \ln(1/ur)^2} \right) \right) \end{array} \right) \quad (102)$$

$$a_{21} = -(\lambda / (C_s + X_{sini} C_w)) (X_s - X_e) \left(\begin{array}{l} 2(-4,7 \cdot 10^{-3} T_s + 7,7 \cdot 10^{-1}) X_s \\ + (2,2 \cdot 10^{-3} T_s - 0,25) + K \end{array} \right) \quad (103)$$

$$a_{22} = -\frac{v_s}{L} + \left(\frac{I}{C_s + X_{sini} C_w} \right) \left(\begin{array}{l} -\frac{a_s h_c V_{sec}}{M_s} - C_v K (X_s - X_e) + \lambda (X_s - X_e) \\ \left(-4,7 \cdot 10^{-3} X_s^2 + 2,2 \cdot 10^{-3} X_s - 2,7 \cdot 10^{-3} \left(\frac{71,81}{T_s^2} \right) \exp\left(\frac{71,81}{T_s} \right) \right) + \\ \left(\lambda K \left(0,834 \left(\frac{0,036 \ln(1/ur)}{1 + (T_s + 273,15) 0,036 \ln(1/ur)^2} \right) \right) \right) \end{array} \right) \quad (104)$$

sendo para o caso I da Tabela 2:

$$b_{11} = \frac{(X_{sini} - X_s)}{L} \quad (105)$$

$$b_{12} = \frac{v_s}{L} \quad (106)$$

$$b_{21} = \frac{(T_{sini} - T_s)}{L} \quad (107)$$

$$b_{22} = \left(\frac{-C_w}{(C_s + X_{sini} C_w)^2} \right) \left(-\frac{a_s h_c V_{sec} (T_s - T_{vt})}{M_s} - \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (108)$$

sendo para o caso II da Tabela 2:

$$b_{11} = \frac{(X_{sini} - X_s)}{L} \quad (109)$$

$$b_{12} = 0 \quad (110)$$

$$b_{21} = \frac{(T_{sin} - T_s)}{L} \quad (111)$$

$$b_{22} = \left(\frac{a_s h_c V_{sec}}{(C_s + X_{sini} C_w) M_s} \right) \quad (112)$$

sendo para o caso III da Tabela 2:

$$b_{11} = \frac{vS}{L} \quad (113)$$

$$b_{12} = 0 \quad (114)$$

$$b_{21} = \left(\frac{-C_w}{(C_s + X_{sini} C_w)^2} \right) \left(-\frac{a_s h_c V_{sec} (T_s - T_{vt})}{M_s} - \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (115)$$

$$b_{22} = \left(\frac{a_s h_c V_{sec}}{(C_s + X_{sini} C_w) M_s} \right) \quad (116)$$

Na etapa seguinte, o modelo dinâmico para cada caso da Tabela 2 foi simulado no programa MATLAB[®] com mesmos dados operacionais iniciais da secagem do farelo, dados de projeto do secador e do próprio farelo apresentados na seção 3.2.2. Os dados de operação finais foram obtidos a partir dos valores médios do modelo em regime permanente. A aplicação dos valores médios se deve a utilização de um modelo com parâmetros concentrados.

A aplicação do modelo dinâmico em cada caso da Tabela 2 foi realizada com perturbações nas variáveis de entrada em degrau de 7% (todas as perturbações consideradas neste trabalho são em relação às variáveis de desvio), podendo-se observar o desvio das variáveis controladas e os tempos de resposta e de estabilização do processo de secagem graficamente. Os desvios da umidade final do farelo por sua vez foram minimizados com a utilização de sistemas de controle *PID* pelas técnicas apresentadas a seguir.

3.2.6.3 Aplicação do controle *PID* no secador rotativo indireto

A aplicação de um sistema de controle no secador rotativo tem como principal objetivo controlar propriedades que interferem na qualidade final do farelo, ou seja, controlar sua umidade de saída do secador. Deste modo, optou-se avaliar os sistemas de controle *PID SISO* (*Single Input and Single Output*) e *MISO* (*Multiple Input and Single Output*) desenvolvidos no programa MATLAB[®].

3.2.6.3.1 Controle *PID SISO*

O controle *PID SISO* tem como principais componentes um sensor/transmissor, um controlador e um processo, cujo funcionamento é o mesmo apresentado na seção 2.5.1, sendo seu diagrama de blocos representado pela Figura 23.

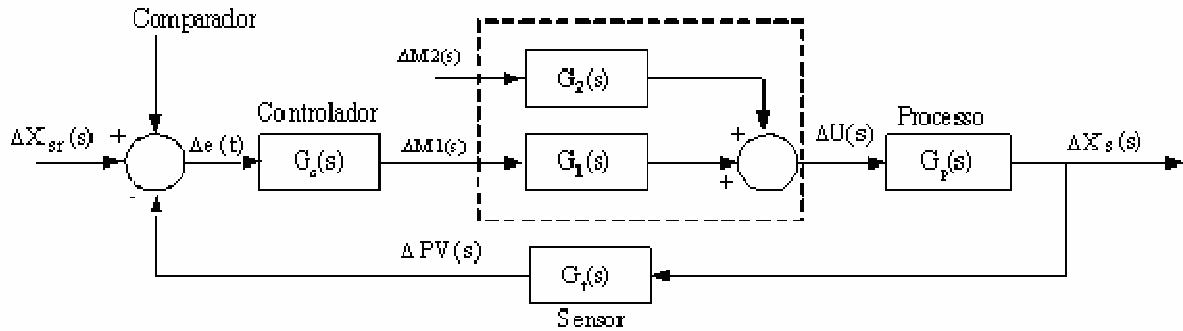


Figura 23. Diagrama de blocos de um sistema *PID SISO*

O sistema de controle apresentado na Figura 23 foi aplicado na secagem do farelo para cada caso da Tabela 2, sendo que a função transferência necessária para controlar a umidade final do farelo (ΔX_s) é representada pela Equação 117 (LIPTAK, 1998).

$$\Delta X_s(s) = \frac{G_c(s)G_f(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_f(s)G_p(s)G_t(s)} \Delta M_1(s) + \frac{G_2(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_f(s)G_p(s)G_t(s)} \Delta M_2(s) \quad (117)$$

A determinação de cada uma das funções de transferência e parâmetros de ajuste apresentados pela Equação 117 foi feita utilizando-se o MATLAB[®], conforme descrito a seguir.

As funções transferência $G_1(s)$ e $G_2(s)$ foram determinadas inicialmente considerando o sistema sem controle (malha aberta), sendo o cálculo de ΔX_s realizado pela aplicação de sistemas lineares no domínio de *Laplace*, como mostrado no diagrama de blocos da Figura 24.

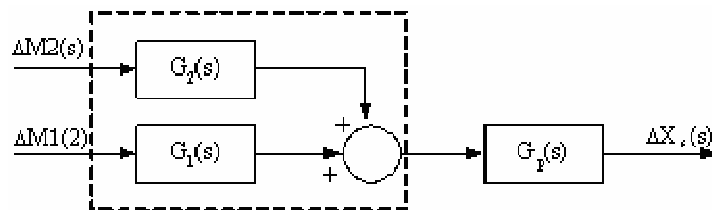


Figura 24. Diagrama de blocos de um sistema em malha aberta

Na Figura 24 as variáveis identificadas como ΔM , ΔC e ΔX_s , correspondem as variáveis manipuláveis, perturbáveis e controláveis para cada caso da Tabela 2, e deste modo, a variação de umidade do farelo (ΔX_s) foi calculada pela aplicação de sistemas lineares no domínio de *Laplace*, conforme mostra-se na Equação 118.

$$\Delta X_s(s) = G_1(s)\Delta M_1 + G_2(s)\Delta M_2 \quad (118)$$

A função transferência da variável perturbada, $G_2(s)$, foi determinada com a aplicação de uma perturbação degrau unitário na variável ΔM_2 da Equação 118, anulando-se a variável ΔM_1 , conforme a Equação 119.

$$G_2(s) = \frac{\Delta X_s}{\Delta M_2} = D(sI - A)^{-1}B \quad (119)$$

em que: I é a matriz identidade e as matrizes A , B e D já foram definidas pelas Equações 101 a 116.

A função transferência da variável manipulada, $G_1(s)$, foi determinada de forma semelhante a $G_2(s)$, conforme apresentado na Equação 120.

$$G_1(s) = \frac{\Delta X_s}{\Delta M_1} = D(sI - A)^{-1}B \quad (120)$$

A princípio, o sistema foi considerado como de parâmetros concentrados de acordo com as Equações 89 e 90. No entanto, o sistema se comporta como de parâmetros distribuídos e para adicionar esta característica ao modelo uma função de tempo de retardo por transporte no secador foi acrescentada ao sistema, conforme representado pela Equação 121.

$$G_{rt}(s) = \exp(-\theta.s) \quad (121)$$

sendo θ dado pela Equação 122.

$$\theta = \frac{L}{v_s} \quad (122)$$

Depois, $G_1(s)$ e $G_2(s)$ foram multiplicadas pela Equação 121, tornando-se $G_1'(s)$ e $G_2'(s)$, como mostrado nas Equações 123 e 124, respectivamente.

$$G_2'(s) = \frac{\Delta X_s}{\Delta C} = (D(sI - A)^{-1}B). \exp(-\theta.s) \quad (123)$$

$$G_1'(s) = \frac{\Delta X_s}{\Delta M} = (D(sI - A)^{-1}B). \exp(-\theta.s) \quad (124)$$

Em seguida, $G_1'(s)$ e $G_2'(s)$ foram aplicadas no sistema com controle mostrado na Figura 23, substituindo $G_1(s)$ e $G_2(s)$, respectivamente, possibilitando o cálculo das funções transferência restantes da Equação 117.

Considerando-se que o sensor/transmissor acompanha um tempo de retardo por transporte entre a esteira de descarga do farelo e o sensor (t_{rt}) é de 20 s, sua função transferência, $G_t(s)$, foi calculada conforme a Equação 125.

$$G_t(s) = \exp(-t_{rt} \cdot s) \quad (125)$$

Para obter as funções transferência de controle ($G_c(s)$) foi utilizada a Equação 126.

$$G_c(s) = k \left(\frac{k_c}{\tau_i s} (\tau_i \tau_d s^2 + \tau_i s + I) \right) \quad (126)$$

As propriedades de constante de ganho de processo (k_c), de tempo integral (τ_i) e de tempo derivativo (τ_d) foram de acordo com a seção a seguir.

O cálculo da função transferência do processo ($G_p(s)$), foi realizado conforme a Equação 127.

$$G_p(s) = \frac{I}{denominadordeG_1'(s)} \quad (127)$$

em que: *denominadordeG₁'(s)* é o valor do correspondente ao denominador de $G_1'(s)$ e $G_2'(s)$.

Após a obtenção de $G_1'(s)$, $G_2'(s)$, $G_t(s)$, $G_c(s)$ e $G_p(s)$, estas foram substituídas na equação de saída da variável controlada $\Delta X_s(s)$, dada pela Equação 117, considerando-se que $G_1(s)$ e $G_2(s)$ desta equação devem ser substituídos por $G_1'(s)$ e $G_2'(s)$.

A aplicação da Equação 117 foi avaliada para cada caso da Tabela 2 sob perturbações nas variáveis de entrada pseudo-aleatórias, em degrau e impulso, sendo estas últimas perturbações de 7% (todas as perturbações consideradas neste trabalho são em relação às variáveis de desvio). Os resultados obtidos com a aplicação destas perturbações foram comparados graficamente junto com os resultados gerados no sistema sem controle e com resposta em degrau unitário (seção 3.4.2.) para avaliar o tempo de resposta e de estabilização do processo de secagem.

O desempenho do controle *PID* para cada caso da Tabela 2 foi avaliado em função da Integral do Erro Quadrático (*ISE*), conforme mostrado na Equação 128.

$$ISE = \int_0^{\infty} e^2(t) dt \quad (128)$$

Além da aplicação e análise do controle *PID SISO* para cada caso da Tabela 2 aplicando-se os dados de entrada aplicados na seção 3.2.6.2, o sistema *PID SISO* foi avaliado para os casos I e III da Tabela 2 aplicando-se os dados de entrada das três melhores condições resultantes da avaliação energética da seção 3.2.5.2. A nova análise tem como objetivo mostrar tendências de comportamento no tempo de resposta e na estabilização do processo de secagem, sendo atingida pela comparação gráfica dos resultados e pela *ISE*.

3.2.6.3.2 Ajuste o sistema de controle *PID*

As propriedades de constante de ganho de processo (k_c), de tempo integral (τ_i) e de tempo derivativo (τ_d), definidas segundo o modelo Ziegler-Nichols (Luyben e Luyben, 1997), foram obtidas pelo seguinte conjunto de equações.

$$k_c = \frac{ku}{1,7} \quad (129)$$

$$\tau_i = \frac{pu}{2} \quad (130)$$

$$\tau_d = \frac{pu}{8} \quad (131)$$

Para obter as constantes de ganho de processo (ku) e o período de oscilação (pu), foram utilizadas as Equações 132 e 133, como mostrado a seguir.

$$ku = gm \quad (132)$$

$$pu = \frac{2\pi}{wcp} \quad (133)$$

Para calcular as margens de ganho (gm) e de fase (pm) e as frequências (wcp e wcp), utilizou-se a resposta de magnitude (mag), a fase em degrau ($phase$) e a frequência (w), calculadas pelo método do diagrama de *bode* (definido no MATLAB[®]) na função resultante da multiplicação entre $G_1'(s)$ e $G_t(s)$.

A variável k na Equação 126 representa a relação entre o sinal de entrada e o de saída do controle. No caso I da Tabela 2, k foi calculada conforme definido pela Equação 134.

$$k = \left(\frac{X_{sini} - X_{sdesejada}}{v_s - v_{smin}} \right) I, I \quad (134)$$

A variável k foi calculada pela Equação 135 para os casos II e III.

$$k = \begin{pmatrix} X_{sini} - X_{sdesejada} \\ T_{vt} - T_{vtmin} \end{pmatrix} I, I \quad (135)$$

3.2.6.3.3 Controle PID MISO

O controle *PID MISO* tem como principais componentes dois sensor/transmissor, dois controladores e um processo que funcionam do mesmo modo apresentado na seção 2.5.1, porém com dois conjuntos de blocos *SISO*, sendo seu diagrama de blocos representado pela Figura 25.

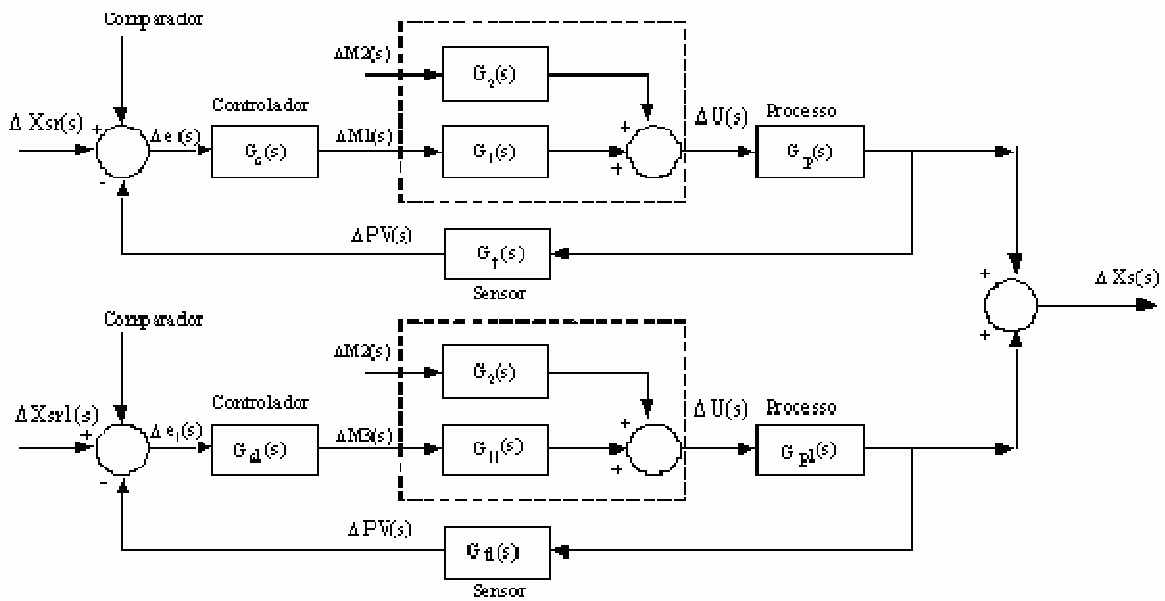


Figura 25. Diagrama de blocos de um sistema com controle *PID MISO*

O sistema de controle apresentado na Figura 25 foi aplicado na secagem do farelo para os casos I e III da Tabela 2, os quais funcionam simultaneamente. A definição de trabalho com estes dois casos está relacionada ao tipo de controle que deve ter a mesma variável perturbada, no caso X_{sini} , e diferentes variáveis manipuláveis, no caso são v_s e T_{aini} . Considerando estes aspectos, a função transferência que representa o controle da umidade final do farelo, X_s , é representada pela Equação 136.

$$\Delta X_s(s) = \frac{G_c(s)G_{t1}(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_{t1}(s)G_p(s)G_t(s)} \Delta M_1(s) + \frac{G_2(s)G_p(s)}{1 + G_c(s)G_{t1}(s)G_p(s)G_t(s)} \Delta M_2(s) + \frac{G_{c1}(s)G_{t1}(s)G_{p1}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{t1}(s)G_{p1}(s)G_t(s)} \Delta M_3(s) + \frac{G_2(s)G_{p1}(s)}{1 + G_{c1}(s)G_{t1}(s)G_{p1}(s)G_t(s)} \Delta M_2(s) \quad (136)$$

Cada uma das funções de transferência e parâmetros de ajuste apresentados pela Equação 136 foram determinados anteriormente para o controle *SISO* nos casos I e III da Tabela 2. Portanto, $G_t(s)$, $G_c(s)$ e $G_p(s)$ foram as mesmas funções utilizadas para o caso I desta Tabela 2, considerando-se que $G_1(s)$, $G_2(s)$ devem ser substituídos por $G_1'(s)$ e $G_2'(s)$ que levam em consideração o tempo de atraso por transporte. Além disso, $G_{cI}(s)$, $G_{tI}(s)$, e $G_{pI}(s)$ foram as mesmas funções $G_c(s)$, $G_t(s)$ e $G_p(s)$ utilizadas para o caso III da mesma Tabela 2, considerando-se que $G_2(s)$ e $G_{tI}(s)$ devem ser substituídos respectivamente por $G_2'(s)$ e $G_t'(s)$ deste caso.

A aplicação da Equação 136 foi avaliada sob as mesmas perturbações nas variáveis de entrada da seção anterior para avaliar o tempo de resposta e de estabilização do processo de secagem graficamente.

O desempenho do controle *PID* para cada caso também foi avaliado em função da Integral do Erro Quadrático (*ISE*), conforme mostrado na Equação 128.

Além da aplicação e análise do controle *PID MISO* utilizando-se os dados de entrada da seção 3.2.6.2, o sistema *PID MISO* foi avaliado com os dados de entrada das três melhores condições resultantes da avaliação energética da seção 3.2.5.2. A nova análise tem como objetivo mostrar tendências de comportamento no tempo de resposta e na estabilização do processo de secagem, sendo atingida pela comparação gráfica dos resultados e pela *ISE*.

3.2.6.4 Validação do modelo dinâmico e da ação do controle *PID*

Para validar o modelo dinâmico do secador rotativo indireto controlado por *PID*, foram coletados dados de operação e de projeto da secagem de farelo na COCAMAR (Cooperativa Agroindustrial de Maringá). O secador desta empresa apresenta características físicas de processo muito semelhantes ao avaliado neste trabalho, o da COAMO.

Assim, foram coletadas 15 amostras na entrada e na saída do secador de farelo da COCAMAR em intervalos de tempo regular em função do tempo médio de residência do produto no equipamento, sendo anotadas também a cada coleta, a temperatura do farelo e do vapor nos tubos. Após a coleta, as amostras foram levadas ao laboratório (DEQ/UEM) para a determinação do teor de umidade, sendo analisados depois juntamente com os dados de temperatura do farelo e do ar na simulação de cada um dos controles I e III propostos na Tabela 2. A escolha da validação por meio destes controles deve-se a disponibilidade dos dados, sendo a mesma realizada de forma apresentadas nas seções 3.2.6.2 e 3.2.6.3.

Nesta validação, a variável perturbada foi a umidade de entrada do farelo no secador, X_{sini} , e o tipo de perturbação foi a pseudo-aleatória uma vez que esta é a que mais se aproxima das ocorridas em sistemas químicos.

A utilização dos dados de outra empresa na validação é favorável já que o modelo proposto neste trabalho é para ser aplicado em qualquer secador rotativo de farelo de soja.

3.3 MODELAGEM MATEMÁTICA DINÂMICA DO SECADOR ROTATIVO DIRETO

3.3.1 Modelagem Matemática do Secador Rotativo Direto em Regime Transiente

O estudo da dinâmica de secagem do farelo é normalmente realizado com o objetivo de prever o perfil de resposta do sistema, quando o processo é submetido a variações de carga ou perturbações. Este estudo é efetivado se normalmente utilizando-se um modelo dinâmico, mostrado mais detalhadamente a seguir.

O modelo matemático dinâmico do secador rotativo por aquecimento direto para a secagem do farelo de soja ainda não foi apresentado na literatura ainda. Deste modo, foi desenvolvido um modelo a partir dos trabalhos apresentados por Yliniemi (1999) e Iguaz *et al.* (2003), representado por equações de balanços de massa e de energia em regime transiente, para que fosse aplicado em um sistema de controle, constituindo-se de conjunto de quatro equações diferenciais parciais. Para isso, considerou-se que a fase sólida é constituída pelo farelo de soja, enquanto que a fase gasosa é constituída por ar e pequena quantidade de vapor de água. O volume de controle que representa o secador em regime de escoamento concorrente é apresentado na Figura 26.

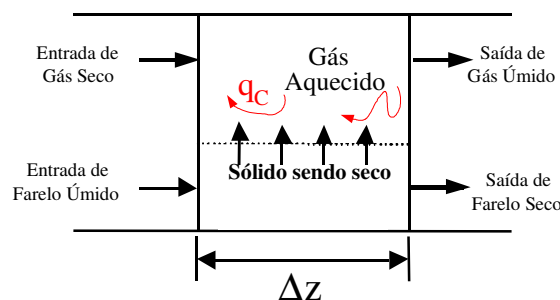


Figura 26. Esquema do volume de controle do secador.

O secador direto a ser estudado será considerado somente com fluxos paralelos e de escoamento concorrente, para não comprometer a direção do fluxo de sólidos e diminuir o arraste de poeira.

O modelo é baseado nas hipóteses apresentadas no trabalho de Yliniemi (1999), bem como nas já apresentadas no desenvolvimento do modelo do secador indireto e baseadas em Sartori (2001) e Luz (2006) (seção 3.2.1):

- a) o coeficiente global de transferência de calor volumétrico é constante ao longo do secador e do tempo;
- b) o escoamento é unidimensional;
- c) a densidade do farelo permanece constante ao longo do secador;
- d) a transferência de calor por condução entre o sólido e o ar de secagem é desprezível;
- e) a velocidade axial de deslocamento do sólido e do ar são constantes ao longo do secador e do tempo;
- f) a distribuição de tamanhos do sólido é constante;
- g) não há reações químicas durante a secagem;
- h) as temperaturas do sólido e do ar de secagem e as umidades contida no sólido e no ar são funções do tempo e da coordenada axial.
- i) o calor perdido pelo secador para a região próxima é desprezível;
- j) o coeficiente de transferência de massa varia em função da temperatura do meio secante e da umidade contida no sólido;
- k) a transferência de massa é da fase sólida para a fase vapor;
- l) a perda de carga é desprezível;
- m) os calores específicos são constantes;
- n) a energia de dessorção é igual a energia de evaporação.

3.3.1.1 Balanço de massa

O balanço de massa para o farelo de soja no elemento diferencial do secador (Figura 26) é dado pela mesma forma equação na seção 3.2.1.1.

$$\frac{dX_s}{dt} = -v_s \frac{dX_s}{dz} - K(X_s - X_e) \quad (137)$$

em que: X_s é a umidade do farelo (b.s.); t , o tempo (s); v_s , a velocidade de deslocamento do farelo no secador (m/s); z , o comprimento do volume de controle do secador (m); K , o

coeficiente de transferência de massa entre o farelo e o ar (1/s) e X_e , a umidade de equilíbrio do farelo (b.s.).

O balanço de massa para o ar no elemento diferencial do secador (Figura 26) é dado pela Equação literal 138 e, matematicamente, pela a Equação 139.

$$\begin{aligned} & \{ \text{Umidade que saiu com o ar do elemento diferencial} |_{t+\Delta t} \\ & - \text{Umidade que entrou com o ar do elemento diferencial} |_t \} = \\ & \{ \text{Umidade que entrou com o ar do elemento diferencial} |_z \end{aligned} \quad (138)$$

$$\begin{aligned} & - \text{Umidade que saiu com o ar do elemento diferencial} |_{z+\Delta z} \\ & + \text{Umidade evaporada do sólido do elemento diferencial} \} \\ & M_a Y |_{t+\Delta t} - M_a Y |_t = \dot{M}_a \Delta t Y |_{z+\Delta z} - \dot{M}_a \Delta t Y |_z + M_s \Delta t R \end{aligned} \quad (139)$$

em que: M_a é a massa de ar seco (kg); Y , a umidade do ar seco (b.s.); \dot{M}_a , a vazão mássica de ar seco (kg/s) e R , a taxa de secagem (1/s).

Ao dividir todos os termos da Equação 139 por Δt , tem-se:

$$\left(\frac{M_a Y |_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M_a Y |_t}{\Delta t} \right) = \dot{M}_a Y |_{z+\Delta z} - \dot{M}_a Y |_z + M_s R \quad (140)$$

Considerando-se que:

$$\dot{M}_a = v_a M_a / \Delta z \quad (141)$$

Ao substituir a Equação 141 na Equação 140, tem-se a Equação 142.

$$\left(\frac{M_a Y |_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M_a Y |_t}{\Delta t} \right) = \left(\frac{v_a M_a Y |_{z+\Delta z}}{\Delta z} \right) - \left(\frac{v_a M_a Y |_z}{\Delta z} \right) + M_s R \quad (142)$$

em que v_a é a velocidade do ar que entra no secador (m/s).

Ao aplicar-se os limites quando $\Delta z \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$ na Equação 142, tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_a (Y |_{t+\Delta t} - Y |_t)}{\Delta t} = - \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{M_a v_a (Y |_{z+\Delta z} - Y |_z)}{\Delta z} + M_s R \quad (143)$$

Ou:

$$\frac{d(M_a Y)}{dt} = - \frac{d(M_a v_a Y)}{dz} + M_s R \quad (144)$$

Como v_a e M_a da Equação 144 são constantes, esta é reescrita:

$$\frac{dY}{dt} = -v_a \frac{dY}{dz} + \frac{M_s}{M_a} R \quad (145)$$

A taxa de secagem (R) da Equação 145 pode ser calculada pela Equação 146.

$$R = K (X_s - X_e) \quad (146)$$

A Equação 146 é substituída na Equação 145, que se transforma em:

$$\frac{dY}{dt} = -v_a \frac{dY}{dz} + \frac{M_s}{M_a} K (X_s - X_e) \quad (147)$$

3.3.1.2 Balanço de energia

O balanço de energia para o sólido no elemento diferencial do secador (Figura 26), é representado, de forma literal, pela Equação 148 e, matematicamente, pela Equação 149.

$$\begin{aligned} & \{-\text{Energia que saiu com o farelo no elemento diferencial}|_{t+\Delta t} \\ & +\text{Energia que entrou com o farelo no elemento diferencial}|_t \} = \\ & \{-\text{Energia que entrou com o farelo no elemento diferencial}|_z \\ & +\text{Energia que saiu com o farelo no elemento diferencial}|_{z+\Delta z} \} \end{aligned} \quad (148)$$

+Calor adquirido por convecção para evaporar a umidade do sol. no elem. dif. |

$$\begin{aligned} & -\text{Calor de vaporização da umidade do sólido do elemento diferencial} \} \\ & -M_s H_s |_{t+\Delta t} + M_s H_s |_t = -\dot{M}_s \Delta t H_s |_z + \dot{M}_s \Delta t H_s |_{z+\Delta z} + \dot{Q} \Delta t - M_s \lambda R \Delta t \end{aligned} \quad (149)$$

em que: M_s é a massa de farelo (kg); H_s é a entalpia do sólido (kJ/kg); t , o tempo (s); \dot{M}_s , a vazão mássica de farelo (kg/s); z , o comprimento do volume de controle do secador (m); \dot{Q} , o calor sensível de vaporização da água (kJ/s); λ , o calor latente de vaporização da água (kJ/kg) e R , a taxa de secagem (1/s).

Ao dividir-se a Equação 149 por Δt , tem-se:

$$-\left(\frac{M_s H_s |_{t+\Delta t}}{\Delta t}\right) + \left(\frac{M_s H_s |_t}{\Delta t}\right) = -\dot{M}_s H_s |_z + \dot{M}_s H_s |_{z+\Delta z} + \dot{Q} - M_s \lambda R \quad (150)$$

sendo que:

$$\dot{M}_s = v_s M_s / \Delta z \quad (151)$$

Ao substituir a Equação 151 na Equação 150, tem-se:

$$-\left(\frac{M_s H_s |_{t+\Delta t}}{\Delta t}\right) + \left(\frac{M_s H_s |_t}{\Delta t}\right) = -\left(\frac{M_s v_s H_s |_z}{\Delta z}\right) + \left(\frac{M_s v_s H_s |_{z+\Delta z}}{\Delta z}\right) + \dot{Q} - M_s \lambda R \quad (152)$$

Aplicando os limites quando $\Delta z \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$ na Equação 152, tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \left(\frac{M_s H_s |_{t+\Delta t} - H_s |_t}{\Delta t}\right) = \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \left(\frac{M_s v_s H_s |_z - H_s |_{z+\Delta z}}{\Delta z}\right) + \dot{Q} - M_s \lambda R \quad (153)$$

Ou:

$$\frac{d(M_s H_s)}{dt} = -\frac{d(M_s v_s H_s)}{dz} + \dot{Q} - M_s \lambda R \quad (154)$$

Como v_s e M_s são constantes, a Equação 154 é reescrita:

$$M_s \frac{dH_s}{dt} = -v_s M_s \frac{dH_s}{dz} + \dot{Q} - M_s \lambda R \quad (155)$$

Dividindo a Equação 155 por M_s , tem-se:

$$\frac{dH_s}{dt} = -v_s \frac{dH_s}{dz} + \frac{\dot{Q}}{M_s} - \lambda R \quad (156)$$

O cálculo da entalpia do sólido (H_s) é realizado conforme a Equação 157.

$$H_s = (c_{ps} + X_{sini} c_{pw}) T_s \quad (157)$$

O cálculo do calor do farelo adquirido por convecção (\dot{Q}) é realizado conforme a Equação 158.

$$\dot{Q} = U_v V_{sec} (T_a - T_s) \quad (158)$$

Ao substituir as Equações 157 e 158 na Equação 156, tem-se:

$$\frac{d((c_{ps} + X_{sini} c_{pw}) T_s)}{dt} = -v_s \frac{d((c_{ps} + X_{sini} c_{pw}) T_s)}{dz} + \frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_s} - \lambda R \quad (159)$$

Como $(c_{ps} + X_{sini} c_{pw})$ é constante, a Equação 159 fica:

$$\frac{dT_s}{dt} = -v_s \frac{dT_s}{dz} + \left(\frac{1}{c_{ps} + X_{sini} c_{pw}} \right) \left(\frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_s} - \lambda R \right) \quad (160)$$

Substituindo-se a Equação 146 na Equação 160, tem-se:

$$\frac{dT_s}{dt} = -v_s \frac{dT_s}{dz} + \left(\frac{1}{c_{ps} + X_{sini} c_{pw}} \right) \left(\frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_s} - \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (161)$$

O balanço de energia para o ar no elemento diferencial do secador (Figura 26) é representado, de forma literal, pela Equação 162 e, matematicamente, pela Equação 163.

$$\begin{aligned} & \{ \text{Energia que saiu com o ar no elemento diferencial} |_{t+\Delta t} \\ & - \text{Energia que entrou com o ar no elemento diferencial} |_t \} = \\ & \{ \text{Energia que entrou com o ar no elemento diferencial} |_z \\ & - \text{Energia que saiu com o ar no elemento diferencial} |_{z+\Delta z} \} \end{aligned} \quad (162)$$

-Calor adquirido por convecção para evaporar a umidade do sól. no elem. dif.

+Calor de vaporização da umidade do sólido no elemento diferencial}

$$M_a H_a |_{t+\Delta t} - M_a H_a |_t = \dot{M}_a \Delta t H_a |_z - \dot{M}_a \Delta t H_a |_{z+\Delta z} - \dot{Q} \Delta t + M_s \lambda R \Delta t \quad (163)$$

em que: M_a é a massa de ar seco (kg); H_a , a entalpia do ar seco (kJ/kg); t , o tempo (s); \dot{M}_a , a vazão mássica de ar seco (kg/s); z , o comprimento do volume de controle do secador (m);

\dot{Q} , o calor sensível de vaporização da água (kJ/s); λ , o calor latente de vaporização da água (kJ/kg) e R , a taxa de secagem (1/s).

Ao simplificar a Equação 163 por Δt , tem-se:

$$\left(\frac{M_a H_a |_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M_a H_a |_t}{\Delta t} \right) = \dot{M}_a H_a |_z - \dot{M}_a H_a |_{z+\Delta z} - \dot{Q} + M_s \lambda R \quad (164)$$

Considerando-se que \dot{M}_a pode ser definido como:

$$\dot{M}_a = v_a M_a / \Delta z \quad (165)$$

Ao substituir a Equação 165 na Equação 164, tem-se:

$$\left(\frac{M_a H_a |_{t+\Delta t}}{\Delta t} \right) - \left(\frac{M_a H_a |_t}{\Delta t} \right) = \frac{M_a v_a H_a |_z}{\Delta z} - \left(\frac{M_a v_a H_a |_{z+\Delta z}}{\Delta z} \right) - \dot{Q} + M_s \lambda R \quad (166)$$

Ao aplicar-se os limites quando $\Delta z \rightarrow 0$ e $\Delta t \rightarrow 0$ na Equação 166, tem-se:

$$\lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{M_a (H_a |_{t+\Delta t} - H_a |_t)}{\Delta t} = - \lim_{\Delta z \rightarrow 0} \frac{M_a (v_a H_a |_{z+\Delta z} - v_a H_a |_z)}{\Delta z} - \dot{Q} + M_s \lambda R \quad (167)$$

Ou:

$$\frac{d(M_a H_a)}{dt} = - \frac{d(M_a v_a H_a)}{dz} - \dot{Q} + M_s \lambda R \quad (168)$$

Considerando-se que M_a e v_a são constantes na Equação 168, esta é reescrita:

$$M_a \frac{d(H_a)}{dt} = -M_a v_a \frac{d(H_a)}{dz} - \dot{Q} + M_s \lambda R \quad (169)$$

Ao simplificar o termo M_a da Equação 169, tem-se:

$$\frac{d(H_a)}{dt} = -v_a \frac{d(H_a)}{dz} - \frac{\dot{Q}}{M_a} + \frac{M_s}{M_a} \lambda R \quad (170)$$

A entalpia do ar (H_a) é determinada conforme apresentado na Equação 171.

$$H_a = (c_{pa} + Y_{ini} c_{pv}) T_a \quad (171)$$

em que: c_{pa} é o calor específico do ar seco (kJ/kg °C); Y_{ini} , a umidade inicial do ar no secador (b.s.); c_{pv} , o calor específico do vapor (kJ/kg °C) e T_a , a temperatura do ar (°C).

O cálculo do calor transferido para o farelo por convecção (\dot{Q}) é realizado conforme a Equação 158.

$$\dot{Q} = U_v V_{sec} (T_a - T_s) \quad (172)$$

Ao incluir as Equações 171 e 158 na Equação 170, tem-se:

$$\frac{d((c_{pa} + Y_{ini} c_{pv}) T_a)}{dt} = -v_a \frac{d((c_{pa} + Y_{ini} c_{pv}) T_a)}{dz} - \frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_a} + \frac{M_s}{M_a} \lambda R \quad (173)$$

Como $(c_{pa} + Y_{ini}c_{pv})$ é constante, a Equação 172 pode ser reescrita como:

$$\frac{dT_a}{dt} = -v_a \frac{dT_a}{dz} + \frac{I}{(c_{pa} + Y_{ini}c_{pv})} \left(-\frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_a} + \frac{M_s}{M_a} \lambda R \right) \quad (174)$$

Substituindo a Equação 146 na Equação 173, tem-se:

$$\frac{dT_a}{dt} = -v_a \frac{dT_a}{dz} + \frac{I}{(c_{pa} + Y_{ini}c_{pv})} \left(-\frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_a} + \frac{M_s}{M_a} \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (175)$$

3.3.1.3 Equações complementares

A massa de ar seco (M_a) é ser calculada conforme a Equação 175, sendo ΔY admitido em 0,147 (b.s.).

$$M_a = \frac{M_s \Delta X_s}{\Delta Y} \quad (176)$$

O coeficiente de transferência de massa (K) é calculado segundo Luz *et al.* (2009b), conforme a Equação 176.

$$K = (-4,7 \cdot 10^{-3} T_a + 0,77) X_s^2 + (2,2 \cdot 10^{-3} T_a - 0,25) X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \exp\left(\frac{71,81}{T_a}\right) \quad (177)$$

A umidade de equilíbrio (X_e) é calculada conforme a Equação 177 (LUZ *et al.*, 2006a). Neste caso, a ur foi considerada constante, pois a substituição de seu valor por uma equação, como a apresentada por Marin *et al.* (2001) em que $ur = ur(T_b, T_u, P)$, não teve resultados satisfatórios, necessitando-se de maior tempo para fazer mais investigações.

$$X_e = \frac{0,834}{\left(1 + 0,036 T_a \ln\left(\frac{1}{ur}\right)\right)} \quad (178)$$

O coeficiente de transferência de calor convectivo (U_v) é o mais significativo e, por isso, é considerado como global, sendo calculado por meio da correlação apresentada por Myklestad (1963) para um secador rotativo direto para pedra pome (citado em Rastikian *et al.*, 1999).

$$U_v = 420 \left(\frac{v_a}{A}\right)^{0,8} \quad (179)$$

em que A é a área da seção transversal do secador (m^2).

Este modelo de U_v foi adotado em função de uma pesquisa realizada com vários modelos apresentados na literatura de modo a encontrar aquele que apresentasse um valor

de umidade final do farelo próximo ao industrial (0,14 b.s.), conforme apresentado por Luz et al. (2009c).

A determinação da velocidade de deslocamento do ar no secador foi realizada a partir de simulações do modelo, considerando-se que esta propriedade deveria ser baixa para não provocar o arraste de poeira.

3.3.2 Solução Numérica e Validação do Modelo do Secador Rotativo Direto

Para solucionar numericamente o modelo matemático do secador rotativo direto utilizou-se o *software* MATLAB[®], sendo desenvolvidos dois programas, um principal e uma sub-rotina.

O programa principal foi desenvolvido com base em:

- dados calculados a partir das equações complementares (seções 3.2.1.3 e 3.3.1.3);
- dados operacionais (umidade e temperatura do farelo, vazão de sólidos) e de projeto de secador industrial rotativo indireto da COAMO (diâmetro interno e comprimento), visando comparações futuras entre os secadores rotativos direto e indireto;
- dados de umidade absoluta e umidade relativa do ar para diversas temperaturas de secagem obtidos a partir da carta psicrométrica (GEANKOPLIS, 1993) ;
- temperaturas de secagem do farelo mais baixas que as utilizadas no secador rotativo indireto, visto que as propriedades físicas do secador direto não exigem altas temperaturas e o produto seca em função dos gradientes de umidade do ar.
- equações de balanço de massa para o sólido e para o ar (Equações 137 e 147);
- equações de balanço de energia para o sólido e para o ar (Equações 161 e 174);
- equação do coeficiente de transferência de massa (Equação 176);
- equação da umidade de equilíbrio (Equação 177);
- equação do coeficiente de transferência de calor (Equação 178).

A sub-rotina foi desenvolvida indicando-se a sub-rotina do MATLAB[®] necessária para se obter a solução das equações diferenciais 137, 147, 161 e 174 (função ode45, baseado no método numérico de *Runge-Kutta* e *Dormand-Prince*, pelo mesmo motivo realizado para o secador rotativo indireto apresentado na seção 3.2.2), bem como as condições de contorno da umidade e da temperatura inicial do farelo e do ar, a variação do tempo e o número de elementos usados na discretização do secador. Os resultados numéricos e gráficos dos perfis de temperatura e de umidade do farelo de soja e do ar ao

longo do tempo foram conferidos chamando-se pelo nome da sub-rotina na tela principal do MATLAB®.

Após a obtenção dos perfis de umidade e temperatura final do farelo de soja, o modelo dinâmico proposto para o secador rotativo direto industrial foi validado de forma qualitativa. Isso ocorreu devido a este secador ainda não ser utilizado para este fim.

3.3.3 Influência da Variação das Condições Operacionais

A secagem do farelo de soja no secador rotativo direto também deve ser influenciada por diversas variáveis. Considerando-se que este equipamento ainda não foi utilizado para este fim, acredita-se que algumas delas possam variar pelos mesmos motivos ocorridos para o secador indireto e, outras, como as identificadas na literatura, para o secado rotativo direto, por Douglas *et al.* (1993) e por Arruda (2008).

- variação da temperatura do ar de secagem: necessidade de maior ou menor quantidade de transferência de calor ao farelo para a remoção de sua umidade;
- variação da umidade inicial do farelo de soja: mudanças na umidade do produto na saída do dessolventizador/tostador (equipamento ao qual o farelo é submetido antes da secagem) ou junção de produtos de alimentação do secador com umidades diferentes, como farelo de soja e lecitina, por exemplo;
- variação da velocidade de deslocamento do farelo de soja: necessidade de aceleração ou desaceleração da correia de transporte entre o *DT* e o secador, ou da velocidade de rotação do secador;
- variação da umidade inicial do ar de secagem: necessidade de maior ou menor remoção da umidade do farelo ocasionada por gradientes de concentração;
- variação da velocidade de deslocamento do ar de secagem: necessidade de maior ou menor arraste de umidade do farelo em função do tempo.

Entretanto, a extensão do efeito dessas variações sobre a umidade e a temperatura na descarga de farelo do secador ainda é uma lacuna e seu estudo é significativo para distinguir quais delas podem ser manipuladas e perturbadas na análise da dinâmica deste processo. Desta forma, realizou-se várias simulações com modelo dinâmico proposto para o secador rotativo direto utilizando-se dados próximos as condições normais de operação para avaliar os seus efeitos sobre a umidade e temperatura finais do farelo. Os dados utilizados nesta análise são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Condições de operação avaliadas

Parâmetros Variados	Condições Avaliadas		
	Menor	Média	Maior
Temperatura inicial do ar de aquecimento (°C)	80	90	100
Umidade inicial do farelo de soja (b.s.)	0,20	0,22	0,24
Velocidade de deslocamento do farelo (m/s)	0,0656	0,0820	0,0984
Umidade inicial do ar (b.s.)	0,08	0,09	0,10
Velocidade de deslocamento do ar (m/s)	0,37	0,46	0,55

Uma vez definidas as variáveis de processo, os dados de umidade e temperatura do farelo e do ar foram simulados utilizando-se os mesmos programas e dados apresentados na seção 3.3.2, mudando apenas uma variável de cada vez da Tabela 3 e mantendo-se as restantes constantes. Considerando as variações de temperatura inicial do ar de secagem, as condições de umidade relativa e umidade absoluta do ar foram recalculadas, utilizando-se a carta psicrométrica para analisar a variação de temperatura do ar. Em seguida, os resultados das diferentes simulações foram avaliados por comparação gráfica, sendo apresentados no capítulo IV.

3.3.4 Análise Energética do Secador Rotativo Direto

O consumo energético do secador rotativo direto foi avaliado, considerando-se para efeito de comparação e quantificação com o secador rotativo indireto (seção 3.2.5), que somente os gastos com energia na forma térmica são relevantes e que outras energias, como a de movimentação do farelo, a de circulação do ar ou do vapor, etc, são aproximadamente iguais para os secadores em análise.

O consumo energético do secador rotativo direto foi avaliado de forma diferente à realizada com o secador rotativo indireto em função das próprias características que os diferem. Ou seja, a quantidade de ar no secador indireto utilizada para a secagem é menor que no rotativo direto. Desta forma, a avaliação do consumo de energia para o secador direto é realizada somente considerando a elevação da temperatura do ar ambiente até a temperatura de secagem.

3.3.4.1 Consumo de energia na secagem do farelo no secador considerando o aquecimento do ar ambiente à temperatura de secagem

A avaliação do consumo de energia na secagem, tendo-se como volume de controle o secador, objetiva averiguar as condições de operação com menor consumo energético, confiando àquelas a manutenção da qualidade final do farelo e o menor custo de produção.

A avaliação do consumo energético da secagem do farelo em secador rotativo direto (E_{t2}), considerando-se o aquecimento do ar ambiente até a temperatura de secagem, é realizada aplicando-se a Equação 179.

$$E_{t2} = \frac{M_a (\Delta H_a) v_a}{z} \quad (180)$$

sendo que: M_a é a massa de ar a secagem (kg); ΔH_a , a variação da entalpia do ar entre a temperatura de secagem e a ambiente (kJ/kg); v_a , a velocidade de entrada do ar no secador (m/s); z , o comprimento do secador (m) em que a umidade do farelo atinge o valor mais próximo do industrial (0,14 b.s.).

A Equação 179 foi aplicada para várias temperaturas do ar de secagem, sendo o cálculo de M_a realizado considerando-se, a princípio, um balanço de massa entre o ar e o sólido em regime permanente.

A Equação 179 foi aplicada no programa MATLAB[®], sendo solucionada empregando-se dados operacionais iniciais da secagem do farelo e dados resultantes do modelo em regime permanente, dados de projeto do secador e do próprio farelo, avaliando-se diferentes condições de temperatura do ar de secagem.

Neste caso, a análise da eficiência da secagem foi descartada, sendo suficiente o estudo do consumo energético.

3.3.5 Desenvolvimento do Controle *PID* para o Secador Rotativo Direto

O estudo da viabilidade de aplicação dos controles *PID SISO* e *MISO* no processo de secagem do farelo de soja deve ser desenvolvido em três etapas: desenvolvimento de um modelo do processo de secagem, avaliação da dinâmica de processo e aplicação do controle *PID* de forma computacional.

3.3.5.1 Desenvolvimento do modelo de secagem do farelo

O desenvolvimento do modelo matemático para aplicação no controle foi baseado no modelo de parâmetros distribuídos apresentado anteriormente, tendo-se as Equações 137, 147, 161 e 174 modificadas para representar o sistema como se fosse de parâmetros concentrados. Assim, da mesma forma que para a secagem indireta, esta modificação foi compensada pela introdução de um retardo por transporte, isto é, considera-se que, fisicamente, este volume de controle (concentrado) percorre o secador.

A modificação realizada na Equação 137 teve apenas o termo dX_s/dz substituído por $(X_s - X_{sini})/(L-0)$, na Equação 147 apenas o termo dY/dz foi substituído por $(Y - Y_{ini})/(L-0)$, na Equação 161 apenas o termo dT_s/dz foi substituído por $(T_s - T_{sini})/(L-0)$, enquanto que, na Equação 174 apenas o termo dT_a/dz foi substituído por $(T_a - T_{aini})/(L-0)$. Tal fato é considerável pois o que interessa nesta análise são somente as umidades e temperaturas de entrada e saída do farelo do ar e do secador, já que não há como controlar pontos localizados ao longo do comprimento do secador. Também haveria muitas equações de balanços de massa e energia do modelo de parâmetros discretos a serem implementadas no controle deste sistema, sendo que o mais importante é o tempo para atingir o regime permanente. Desta forma, obteve-se um modelo de parâmetros concentrados representado pelos balanços de massa e de energia descritos abaixo.

O balanço de massa para o farelo de soja no controle foi realizado conforme a Equação 180.

$$\frac{dX_s}{dt} = -\frac{v_s}{L}(X_s - X_{sini}) - K(X_s - X_e) \quad (181)$$

sendo K e X_e dado pelas Equações 176 e 177, respectivamente.

O balanço de massa para o ar no controle é dado pela Equação 181.

$$\frac{dY}{dt} = -\frac{v_a}{L}(Y - Y_{ini}) + \frac{M_s}{M_a}K(X_s - X_e) \quad (182)$$

O balanço de energia para o farelo de soja no controle foi realizado de acordo com a Equação 182.

$$\frac{dT_s}{dt} = -\frac{v_s}{L}(T_s - T_{sini}) + \frac{I}{(c_{ps} + X_{sini}c_{pw})} \left(\frac{U_v V_{sec}(T_a - T_s)}{M_s} - \lambda K(X_s - X_e) \right) \quad (183)$$

sendo U_v dado pela Equação 178.

O balanço de energia para o ar no controle é dado pela Equação 183.

$$\frac{dT_a}{dt} = -\frac{v_a}{L}(T_a - T_{aini}) + \frac{I}{(c_{pa} + Y_{ini}c_{pv})} \left(-\frac{U_v V_{sec}(T_a - T_s)}{M_a} + \frac{M_s}{M_a} \lambda K(X_s - X_e) \right) \quad (184)$$

3.3.5.2 Dinâmica de secagem do farelo

O estudo da dinâmica de secagem do farelo é normalmente realizado com o objetivo de prever o perfil de resposta do sistema quando o processo é submetido a variações de carga ou perturbações. Este estudo é efetivado utilizando-se normalmente um modelo dinâmico, o qual já foi mostrado anteriormente.

Entretanto, a implementação do modelo dinâmico ao computador requer a formulação matemática empregando Equações de Estado com a finalidade de facilitar e interagir com as variáveis necessárias a aplicação do sistema de controle. Para isso, o modelo dinâmico (Equações 180 e 182) foi linearizado pela aplicação das séries de Taylor obtendo-se equações semelhantes às Equações 184 e 185, as quais devem ser solucionadas simultaneamente. O uso de Equações de Estado com a linearização é aceitável e justificável neste caso, pois almeja-se uma avaliação comparativa da dinâmica da secagem do farelo sobre as variáveis operacionais mais em termos qualitativos que quantitativos. Já para uma avaliação das estratégias de controle, a linearização também é justificável, pois o sistema de controle deverá manter o ponto operacional próximo ao valor desejado.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (185)$$

$$y = Dx \quad (186)$$

em que: \dot{x} representa as equações diferenciais de balanço de massa e de energia, x , as variáveis controladas, u , as variáveis de entrada, y , as variáveis de saída e A , B , D , os respectivos coeficientes destas variáveis.

As variáveis manipuladas e perturbadas foram definidas a partir do estudo de influência das condições operacionais (seção 3.3.3) em que foram observadas as variáveis que mais influenciaram no resultado da umidade e da temperatura finais do farelo mostrados pelas simulações. Entre as variáveis que podem ser manipuladas estão a velocidade de deslocamento do farelo (v_s) e a temperatura inicial do ar de aquecimento do farelo, (T_{aini}) e entre as perturbáveis, a temperatura inicial do farelo (X_{sini}) e a velocidade de entrada e deslocamento do farelo (v_s). Deste modo, estas variáveis foram analisadas de acordo com os casos apontados na Tabela 4.

Tabela 4. Variáveis do controle *feedback*.

Casos	Variáveis	Variáveis	Variáveis
	Perturbadas	Manipuladas	Controladas
I	X_{sini}	v_s	X_s
II	v_s	T_{aini}	X_s
III	X_{sini}	T_{aini}	X_s

Assim, \dot{x} , x , u , A , B e D podem ser apresentados pelas Equações 186 a 193.

$$\dot{x} = \begin{bmatrix} \frac{dX_s}{dt} \\ \frac{dT_s}{dt} \end{bmatrix} \quad (187)$$

$$x = \begin{bmatrix} X_s \\ T_s \end{bmatrix} \quad (188)$$

sendo u para o caso I da Tabela 4:

$$u = \begin{bmatrix} X_{sini} \\ v_s \end{bmatrix} \quad (189)$$

sendo u para o caso II da Tabela 4:

$$u = \begin{bmatrix} v_s \\ T_{aini} \end{bmatrix} \quad (190)$$

sendo u para o caso III da Tabela 4:

$$u = \begin{bmatrix} X_{sini} \\ T_{aini} \end{bmatrix} \quad (191)$$

$$A = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix} \quad (192)$$

$$B = \begin{bmatrix} b_{11} & b_{12} \\ b_{21} & b_{22} \end{bmatrix} \quad (193)$$

$$D = \begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix} \quad (194)$$

sendo os elementos das matrizes A e B definidos pelas Equações 194 a 209.

$$a_{11} = -\frac{v_s}{L} - (3(-4,7 \cdot 10^{-3} T_a + 7,7 \cdot 10^{-1}) X_s^2 + 2(2,2 \cdot 10^{-3} T_a - 0,25) X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(71,81/T_a) - X_e (2(-4,7 \cdot 10^{-3} T_a + 7,7 \cdot 10^{-1}) X_s + 2,2 \cdot 10^{-3} T_a - 0,25)) \quad (195)$$

$$a_{12} = 0 \quad (196)$$

$$a_{21} = \left(\frac{I}{C_s + X_{sini} C_w} \right) \left(\begin{array}{l} -\lambda(3(-4,7 \cdot 10^{-3} T_a + 7,7 \cdot 10^{-1}) X_s^2) \\ + 2(2,2 \cdot 10^{-3} T_a - 0,25) X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \cdot \exp(71,81/T_a) \\ - X_e (2(-4,7 \cdot 10^{-3} T_a + 7,7 \cdot 10^{-1}) X_s + (2,2 \cdot 10^{-3} T_a - 0,25)) \end{array} \right) \quad (197)$$

$$a_{22} = -\frac{v_s}{L} + \left(\frac{I}{C_s + X_{sini} C_w} \right) \left(-\frac{U_v V_{sec}}{M_s} + K C_v (X_s - X_e) \right) \quad (198)$$

sendo para o caso I da Tabela 4:

$$b_{11} = \frac{v_s}{L} \quad (199)$$

$$b_{12} = \frac{(X_{sini} - X_s)}{L} \quad (200)$$

$$b_{21} = \left(\frac{-C_w}{(C_s + X_{sini} C_w)^2} \right) \left(\frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_s} - \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (201)$$

$$b_{22} = \frac{(T_{sini} - T_s)}{L} \quad (202)$$

sendo para o caso II da Tabela 4:

$$b_{11} = \frac{(X_{sini} - X_s)}{L} \quad (203)$$

$$b_{12} = -(X_s - X_e) \left(\begin{array}{c} -4,7 \cdot 10^{-3} X_s^2 + 2,2 \cdot 10^{-3} X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \left(-\frac{71,81}{T_a^2} \right) \cdot \exp\left(\frac{71,81}{T_a}\right) \\ \left(0,036 \ln\left(\frac{1}{ur}\right) \right) \\ -K \left(-0,834 \frac{\left(0,036 \ln\left(\frac{1}{ur}\right) \right)}{\left(1 + 0,036 \left(\ln\left(\frac{1}{ur}\right) \right)^2 (T_a + 273,15) \right)} \right) \end{array} \right) \quad (204)$$

$$b_{21} = \frac{(T_{sini} - T_s)}{L} \quad (205)$$

$$b_{22} = \left(\frac{1}{C_s + X_{ini} C_w} \right) \left(\begin{array}{c} \frac{U_v V_{sec} - \lambda (X_e - X_s)}{M_s} \\ \left(-4,7 \cdot 10^{-3} X_s^2 + 2,2 \cdot 10^{-3} X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \left(-\frac{71,81}{T_a^2} \right) \cdot \exp\left(\frac{71,81}{T_a}\right) \right) \\ -K_m \left(-0,834 \frac{\left(0,036 \ln\left(\frac{1}{ur}\right) \right)}{\left(1 + 0,036 \left(\ln\left(\frac{1}{ur}\right) \right)^2 (T_a + 273,15) \right)} \right) \end{array} \right) \quad (206)$$

sendo para o caso III da Tabela 4:

$$b_{11} = \frac{v_s}{L} \quad (207)$$

$$b_{12} = -(X_s - X_e) \left(-4,7 \cdot 10^{-3} X_s^2 + 2,2 \cdot 10^{-3} X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \left(-\frac{71,81}{T_a^2} \right) \cdot \exp\left(\frac{71,81}{T_a}\right) \right) - K \left(-0,834 \frac{\left(0,036 \ln\left(\frac{I}{ur}\right) \right)}{\left(1 + 0,036 \left(\ln\left(\frac{I}{ur}\right) \right)^2 (T_a + 273,15) \right)} \right) \quad (208)$$

$$b_{21} = \left(\frac{-C_w}{(C_s + X_{sini} C_w)^2} \right) \left(\frac{U_v V_{sec} (T_a - T_s)}{M_s} - \lambda K (X_s - X_e) \right) \quad (209)$$

$$b_{22} = \left(\frac{I}{C_s + X_{sini} C_w} \right) \left(\frac{U_v V_{sec} - \lambda (X_e - X_s)}{M_s} \right) \left(-4,7 \cdot 10^{-3} X_s^2 + 2,2 \cdot 10^{-3} X_s + 2,7 \cdot 10^{-3} \left(-\frac{71,81}{T_a^2} \right) \cdot \exp\left(\frac{71,81}{T_a}\right) \right) - K \left(-0,834 \frac{\left(0,036 \ln\left(\frac{I}{ur}\right) \right)}{\left(1 + 0,036 \left(\ln\left(\frac{I}{ur}\right) \right)^2 (T_a + 273,15) \right)} \right) \quad (210)$$

Na etapa seguinte, o modelo dinâmico para cada caso da Tabela 4 foi simulado no programa MATLAB[®] com os dados operacionais, do secador e do farelo definidos na seção 3.3.5, e as condições finais de operação, obtidas pelos valores médios do modelo em regime permanente. A aplicação dos valores médios se deve a utilização de um modelo dinâmico com parâmetros concentrados.

O modelo constituído pelas Equações 186 a 209 no MATLAB[®] foi avaliado com perturbações em degrau de 7% (todas as perturbações consideradas neste trabalho são em relação às variáveis de desvio) para observar os desvios das variáveis controladas e os tempos de resposta e de estabilização do processo de secagem graficamente. Os desvios na umidade final do farelo por sua vez, podem apresentar-se menores com a utilização de sistemas de controle *PID*.

3.3.5.3 Aplicação do controle *PID* no secador rotativo direto

A aplicação de um sistema de controle no secador rotativo tem como objetivo controlar propriedades que interferem na qualidade do produto final, no caso do farelo, controlar sua umidade final no processo de secagem. Nesta seção, trabalhou-se da mesma forma realizada nos controles controle *PID SISO* e *MISO* do secador rotativo indireto

(3.2.6.3), sendo os aspectos diferenciais entre os controles dos secadores discutidos a seguir.

3.3.5.3.1 Controle *PID SISO*

O controle *PID SISO* para o secador rotativo direto de farelo de soja tem a mesma estrutura e princípios de funcionamento apresentados na Figura 23 (seção 3.2.6.3), tendo-se as variáveis ΔM , ΔC e ΔX_s substituídas pelas variáveis manipuláveis, perturbáveis e controláveis de cada caso da Tabela 4. Considerando-se este fato, a variação de umidade do farelo (ΔX_s) para cada foi calculada pela aplicação de sistemas lineares no domínio de Laplace, conforme mostrado na Equação 117.

A partir daí, os procedimentos aplicados da Equação 117 a 134 foram repetidos para o controle do secador direto, exceto pela Equação 135 no cálculo de k que foi substituída pela Equação 210, sendo esta aplicada para os casos II e III da Tabela 4.

$$k = \left(\frac{X_{sini} - X_{sdesejada}}{T_{ainimax} - T_{ainimin}} \right) I, I \quad (211)$$

A aplicação da Equação 117 foi avaliada para cada caso da Tabela 4 tendo-se perturbações pseudo-aleatórias e em degrau e em impulso, sendo estas últimas de 7% (todas as perturbações consideradas neste trabalho são em relação às variáveis de desvio). Os resultados obtidos com a aplicação destas perturbações foram comparados graficamente junto com os resultados gerados no sistema sem controle e perturbação em degrau unitário (seção 3.3.5.2) para avaliar o tempo de resposta e de estabilização do processo de secagem.

Além da aplicação e análise do controle *PID SISO* para cada caso da Tabela 4 aplicando-se os dados de entrada aplicados na seção 3.3.5.2, o sistema *PID SISO* foi avaliado para cada caso da Tabela 4 aplicando-se os dados de entrada das três melhores condições resultantes da avaliação energética da seção 3.3.4.1. A nova análise tem como objetivo mostrar tendências de comportamento destas condições no tempo de resposta e na estabilização do processo de secagem, sendo atingida pela comparação gráfica dos resultados e pela *ISE*.

3.3.5.3.2 Controle *PID MISO*

O controle *PID MISO* do secador rotativo direto também apresenta a mesma estrutura e princípios de funcionamento da Figura 25 e foi aplicado na secagem do farelo para os casos I e III da Tabela 4, os quais funcionam simultaneamente. A escolha de

trabalho com estes dois casos está relacionada ao tipo de controle que deve ter a mesma variável perturbada, que no caso é a X_{sini} , e diferentes variáveis manipuláveis, que no caso são v_s e T_{aini} . Considerando estes fatos, a função transferência que representa o controle da umidade final do farelo, X_s , é representada pela Equação 136.

Cada uma das funções de transferência e parâmetros de ajuste apresentados pela Equação 136 foram determinados anteriormente para o controle *SISO* nos casos I e III da Tabela 4. Portanto, $G_I(s)$, $G_2(s)$, $G_I(s)$, $G_c(s)$ e $G_p(s)$ foram as mesmas funções utilizadas para o caso I desta Tabela 4, lembrando-se que $G_I(s)$ e $G_2(s)$ devem ser substituídos por $G_I'(s)$ e $G_2'(s)$ devido ao tempo de atraso por transporte. Além disso, $G_{II}(s)$, $G_{cI}(s)$ e $G_{pI}(s)$ correspondem as mesmas funções $G_I(s)$, $G_c(s)$ e $G_p(s)$ utilizadas para o caso III da mesma Tabela 4, também substituindo $G_{II}(s)$ e $G_2(s)$ respectivamente por $G_I'(s)$ e $G_2'(s)$ deste caso.

A aplicação da Equação 136 foi avaliada sob perturbações em degrau, pseudo-aleatórias e impulso do mesmo modo que da seção anterior para avaliar o tempo de resposta e de estabilização do processo de secagem graficamente.

O desempenho do controle *PID* para cada caso também foi avaliado em função da Integral do Erro Quadrático (*ISE*), conforme mostrado na Equação 128.

Além da aplicação e análise do controle *PID MISO* aplicando-se os dados de entrada aplicados da seção 3.3.5.2, o sistema *PID MISO* foi avaliado com os dados de entrada das três melhores condições resultantes da avaliação energética da seção 3.3.4.1. A nova análise tem como objetivo mostrar tendências de comportamento dessas condições no tempo de resposta e na estabilização do processo de secagem, sendo atingida pela comparação gráfica dos resultados e pela *ISE*.

3.4 CONCLUSÕES SOBRE O CAPÍTULO III

O objetivo deste capítulo foi apresentar uma metodologia para obter e solucionar os modelos dinâmicos da secagem e, avaliar o consumo energético e a implementação do controle *PID* nos secadores industriais rotativos indireto e direto. Para tanto, os modelos dinâmicos foram desenvolvidos a partir de balanços de massa e de energia nos secadores, sendo obtidas duas equações diferenciais parciais para a secagem indireta e quatro equações diferenciais parciais para a secagem direta. Para verificar o consumo de energia térmica dos secadores rotativos foram indicados modelos apresentados na literatura, modelos da literatura complementados e modelos admitidos. Para examinar a utilização do

controle *PID* com as estruturas *SISO* e *MISO* em cada secador, indicou-se a linearização dos modelos dinâmicos e a determinação das funções transferência e dos parâmetros de sintonia (ajustados pelo método de *Ziegler e Nichols*). Como metodologia de solução, validação e análise da influência das condições operacionais com esses modelos e estruturas de controle, indicou-se a utilização do MATLAB[®].

Os desafios deste capítulo foram encontrar um modelo para o coeficiente global de transferência de calor para o secador rotativo direto, fazendo-se necessário investigações a parte, conforme apresentado por Luz *et al.* (2009c).

CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos para os secadores rotativos de farelo de soja indireto e direto, tendo como foco a simulação e análise dos modelos matemáticos sob diferentes condições operacionais, a análise energética e a aplicação de sistemas de controle por realimentação *PID* com diferentes estruturas.

4.1 SECADOR ROTATIVO INDIRETO

Os dados operacionais e de projeto do secador rotativo indireto obtidos na COAMO, os dados climáticos no local desta empresa e os dados de farelo de soja obtidos na literatura necessários para a solução numérica do modelo, a avaliação energética do secador, bem como a aplicação do controle *PID* para o secador rotativo indireto, foram levantados e são apresentados, respectivamente, nas Tabelas 5 e 6.

Tabela 5. Dados operacionais e de projeto do secador de farelo de soja

Dados Operacionais do Secador Rotativo da COAMO		
Propriedades	Símbolos	Dados
Massa do farelo de soja seco (kg)	M_s	3667
Umidade inicial do farelo de soja (b.s.)	X_{ini}	0,22
Umidade final do farelo de soja (b.s.)	X_s	0,14
Temperatura do vapor nos tubos (°C)	T_{vt}	111
Temperatura inicial do farelo de soja (°C)	T_{sini}	100
Temperatura final do farelo de soja (°C)	T_s	95
Dados de Projeto do Secador Rotativo da COAMO		
Propriedades	Símbolos	Dados
Área da seção transversal disponível para secagem (m ²)	A_{sec}	2,68
Comprimento (m)	L	17
Diâmetro (m)	D	2
Inclinação (m/m)	S	0,087
Rotação (rpm)	N	7
Dados Climáticos Médios do Local da COAMO		
Propriedades	Símbolos	Dados
Umidade absoluta do ar (kg vapor H ₂ O/kg ar seco)	Y	0,013
Temperatura média da região (°C)	T_{armed}	25

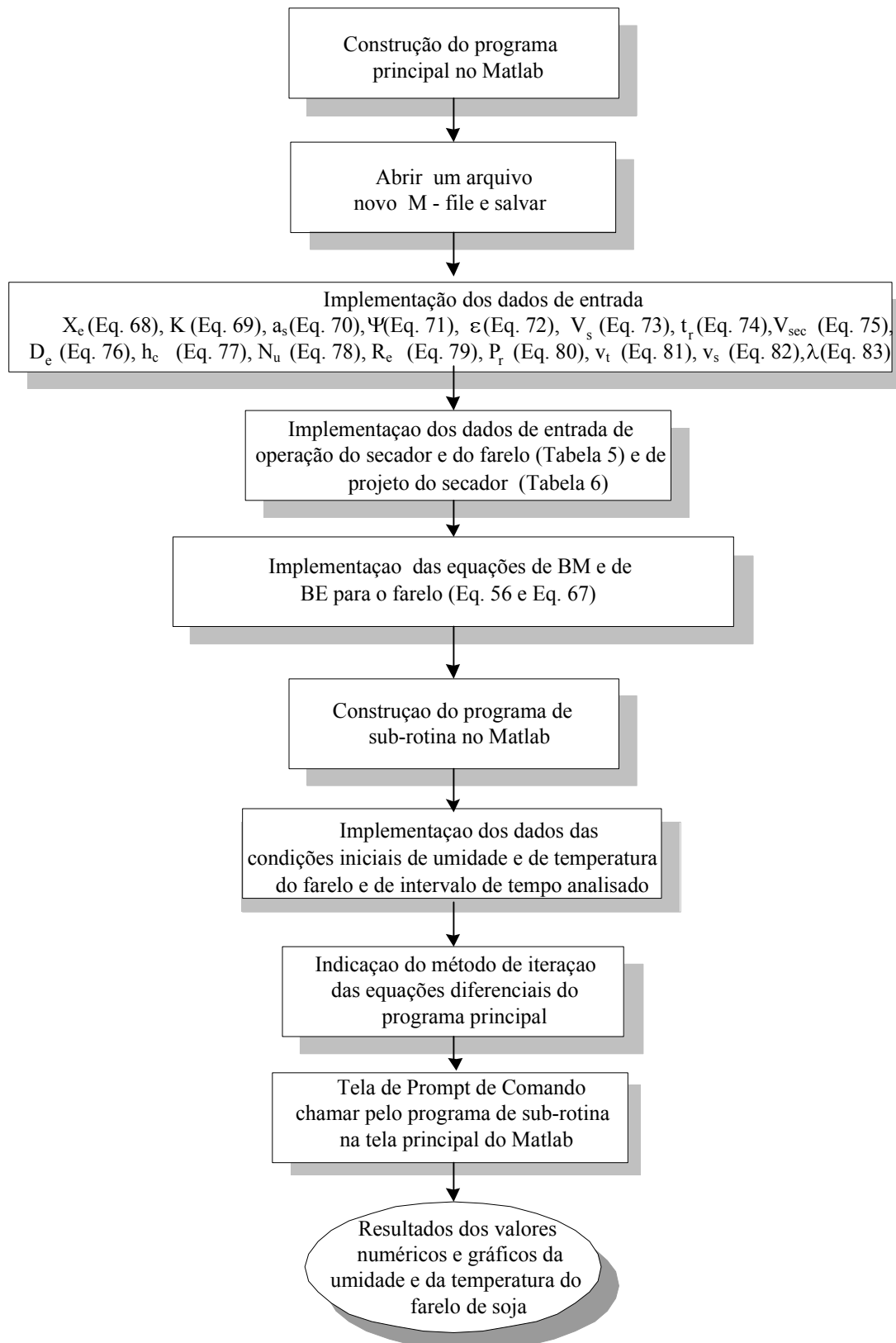
Tabela 6. Dados de farelo de soja

Dados do Farelo de Soja Seco		
Propriedades	Símbolos	Dados
Calor específico do farelo de soja (kJ/kg K)	c_{ps}	1760
Densidade do farelo de soja seco (kg/m ³)	ρ_s	1340
Densidade aparente do farelo de soja seco (kg/m ³)	ρ_{ap}	640
Fração volumétrica do farelo de soja dentro do secador	f_s	0,10
Diâmetro médio das partículas (m)	d_p	0,0015

Os dados do farelo de soja para c_{ps} , ρ , f_s e d_p mostrados na Tabela 6 foram apresentados, respectivamente, por Schumacher (1983), por dados levantados em laboratório, dados calculados e por Luz (2006).

4.1.1 Solução Numérica e Validação do Modelo Matemático

Os resultados da simulação do modelo foram obtidos obedecendo-se às etapas apresentadas no diagrama de blocos da Figura 27.

Figura 27. Diagrama de blocos para obter X_s e T_s .

O desenvolvimento do modelo dinâmico de secagem do farelo de soja em secador indireto com parâmetros discretos foi realizado visando sua aplicação em sistemas de controle para este secador. A intenção de sua aplicação era verificar possíveis alterações no perfil de umidade e temperatura finais do produto nos volumes de controle do secador caso este fosse perturbado. As simulações para validar e analisar a influência das condições operacionais realizadas com este modelo mostraram que não houve variações nos volumes de controle além das esperadas, não achando-se necessário mostrá-las. Além disso, os resultados que interessam nesta análise são as umidades e temperaturas de entrada e saída do farelo do secador, já que não há como controlar pontos localizados ao longo do comprimento do secador. Também haveria muitas equações de balanços de massa e energia do modelo de parâmetros discretos a serem implementadas no controle deste sistema, sendo que interessa o tempo para atingir o regime permanente. Neste sentido, as análises propostas para validar o modelo e verificar as influências das condições operacionais e a aplicação do sistema de controle foram feitas utilizando o modelo com parâmetros concentrados descrito anteriormente. Tal fato torna a visualização e análise dos gráficos mais fáceis, compacta e de processamento rápido, os quais podem ser averiguados a seguir.

Os resultados dos perfis de umidade e temperatura do farelo do modelo do secador rotativo indireto são mostrados nas Figuras 28 e 29.

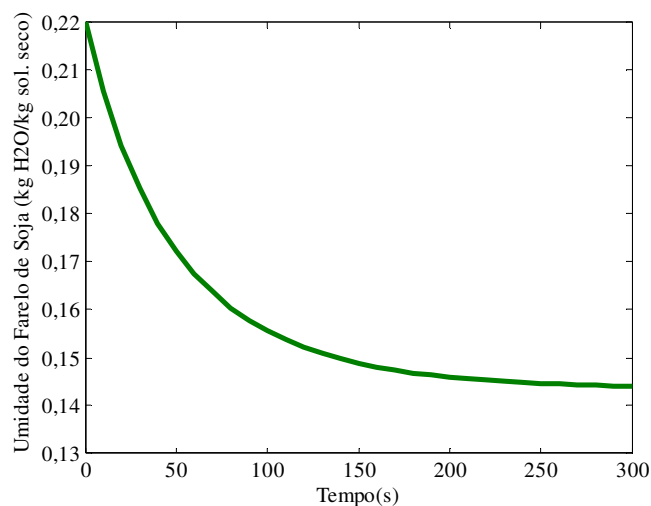


Figura 28. Perfil de umidade do farelo na saída do secador

Ao analisar-se a Figura 28, observa-se que o perfil de umidade do farelo na saída do secador decai expressivamente nos primeiros 50 s e, a partir daí, diminui suavemente ao longo do tempo, atingindo o equilíbrio em torno de 270 s aproximadamente, com umidade

de 0,144 (b.s.). Este comportamento da umidade é semelhante ao de alguns materiais encontrados na literatura. No caso, este perfil é normalmente identificado na secagem de sólidos porosos e semelhante ao obtido por Sartori (2001) na secagem farelo em secador rotativo indireto.

Ainda pode ser verificado, na Figura 28 que a umidade final do farelo se estabiliza em um tempo muito próximo ao tempo de residência médio para este secador que é de 210 s, alcançando um desvio de 2,9% em relação à umidade final obtida na indústria que deve ser de 0,14 (b.s.) (Tabela 5).

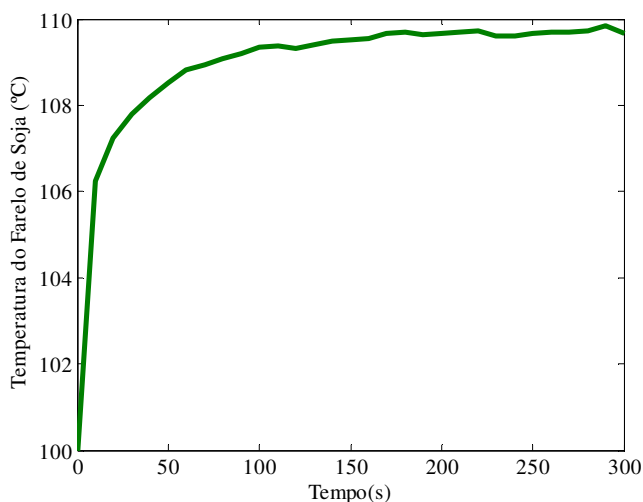


Figura 29. Perfil de temperatura do farelo na saída do secador

Observa-se, na Figura 29, que a temperatura do farelo na saída do secador aumenta significativamente nos primeiros 10 s, passando de 100 para 106°C, seguindo a partir daí, com suave elevação até que, aos 170 s, atinge o estado estacionário, embora com pequenas oscilações não fenomenológicas, com temperaturas em torno 109,7°C. Esta temperatura representa um desvio máximo 15,8% em relação a temperatura final do farelo de soja obtida industrialmente de 95 °C (Tabela 5).

Essa diferença entre os valores simulado e industrial pode ser justificada, pois no trabalho considerou-se que não há perdas de calor para o ambiente e isso é possível de ocorrer na indústria, e somando-se a isso, tem-se os erros de medida desta temperatura pelo sensor manual por infravermelho, medidas não realizadas logo na saída do sensor e até erro do sensor que controla a pressão do vapor no secador.

Um perfil de temperatura semelhante ao da Figura 29 foi observado por Sun *et al.* (1995), na secagem de grãos em secador convectivo, que partiu de uma umidade inicial de 0,278 b.s., apesar do fenômeno físico de secagem ocorrer de forma diferente, e por Sartori

(2001) na secagem farelo em secador rotativo indireto, que partiu de uma umidade de 0,19 b.s.

Nas Figuras 28 e 29 ainda pode ser observado que os perfis de umidade e temperatura do farelo apresentam uma resposta com características de primeira ordem.

Apesar dos valores de desvio encontrados para a umidade e a temperatura final do farelo das Figuras 28 e 29 serem calculados a partir dos dados obtidos por Luz (2006) para o regime permanente, não foi possível calcular os desvios para o modelo dinâmico e validá-lo a partir de dados experimentais. Contudo, pode-se dizer que o modelo matemático proposto para o secador rotativo indireto está validado qualitativamente, uma vez que os perfis apresentados de umidade e de temperatura de saída do farelo de soja estão bem próximos dos apresentados na literatura como os de Sun *et al.* (1995) e de Sartori (2001), já apresentados anteriormente e alcançam valores próximos de umidade do farelo como deseja-se na indústria.

Segundo Vogel (1992), ainda para validar um modelo em regime transiente em processos químicos, para efeito de sintonia e análise do controlador, basta que o modelo em regime permanente esteja validado, ou seja, que apresente um desvio menor que 5%. Como o modelo em regime transiente apresentado neste trabalho foi baseado no trabalho desenvolvido por Luz *et al.* (2009) em regime permanente, que obteve desvios de 2,14% para a umidade e de 3,45% para a temperatura final do farelo, tal fato é confirmado.

Obs.: A análise das Figuras 28 e 29, e as seguintes, também poderia ser realizada substituindo-se os dados da abcissa para espaço.

4.1.2 Influência da Variação das Condições Operacionais

Ao analisar a influência das condições operacionais menor, média e maior apresentadas na Tabela 1 (seção 3.2.4), verificou-se que os perfis de umidade e de temperatura finais do farelo simulados são semelhantes aos obtidos e discutidos na solução numérica e validação do modelo, enquanto que a intensidade desta influência é destacada em cada caso discutido a seguir.

a) Influência da variação de temperatura do vapor

Os resultados dos perfis simulados da umidade e da temperatura do farelo em função do tempo, para diferentes valores da temperatura do vapor de aquecimento, são apresentados nas Figuras 30 e 31.

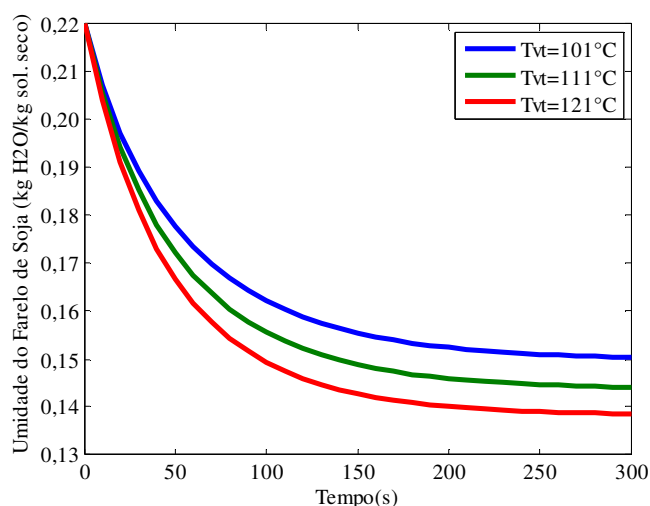


Figura 30. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas do vapor nos tubos

Na Figura 30 verifica-se que o aumento da temperatura do vapor nos tubos (T_{vt}) promove o aumento da evaporação da umidade, obtendo-se, para os casos analisados, um produto mais seco na T_{vt} de 121°C.

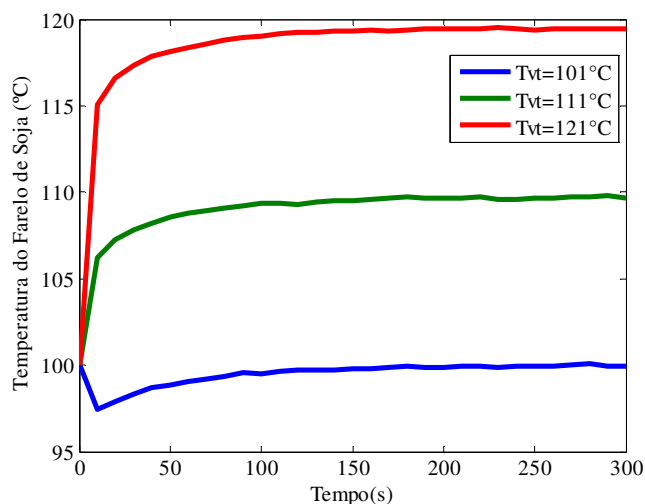


Figura 31. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas do vapor nos tubos

Na Figura 31, observa-se que as maiores temperaturas do vapor de aquecimento (T_{vt}) tendem a produzir um farelo com temperaturas de saída do secador próximas às temperaturas do vapor. Tal fato ocorre devido ao produto entrar no secador já com umidade relativamente baixa, absorvendo calor mais fácil e rapidamente porque gastou

menos energia com a evaporação da umidade. Além disso, para a condição de temperatura de vapor nos tubos (T_{vt}) de 101°C , tem-se uma resposta com comportamento peculiar. Isto provavelmente ocorre porque a energia térmica do farelo na entrada do secador foi usada para a vaporização de sua própria umidade contida e esta transferência de energia térmica é mais rápida do que a transferência de energia térmica da parede dos tubos de vapor para o farelo. Após este tempo de declínio de temperatura do farelo, uma quantidade de água foi evaporada e o farelo começa a ser aquecido pela parede dos tubos de vapor pelo fato de que a taxa de energia recebida pelo farelo passa a ser maior do que a taxa que o próprio farelo utiliza para evaporar o vapor ainda presente nele. Esse comportamento do perfil de umidade de saída do farelo do secador caracteriza um tipo de controle inverso que não será abordado neste trabalho devido a complexidade do mesmo e, também, ele ocorre somente nesta situação específica. Assim, recomenda-se não trabalhar com esta T_{vt} de 101°C , pois esta condição pode gerar instabilidade do secador.

b) Influência da variação da umidade inicial do farelo de soja

Os resultados dos perfis simulados da umidade e da temperatura do farelo em função do tempo, para diferentes valores da umidade inicial do farelo, são apresentados nas Figuras 32 e 33.

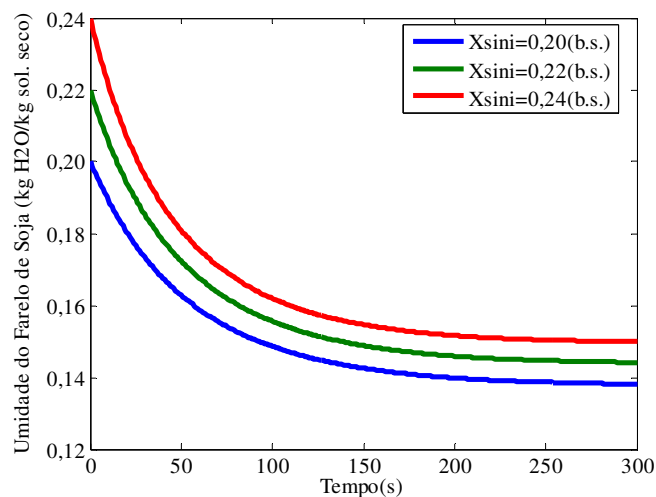


Figura 32. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo

Na Figura 32, observa-se que a elevação da umidade inicial do farelo produz valores maiores da umidade de saída do mesmo, obtendo-se, para os casos analisados, um produto mais seco para a umidade inicial de 0,20 (b.s.). Isso seria o esperado, pois nessa

condição é muito mais fácil se atingir o equilíbrio, já que considerou-se que as condições de secagem utilizadas na análise são as mesmas, exceto claro as umidades iniciais do farelo.

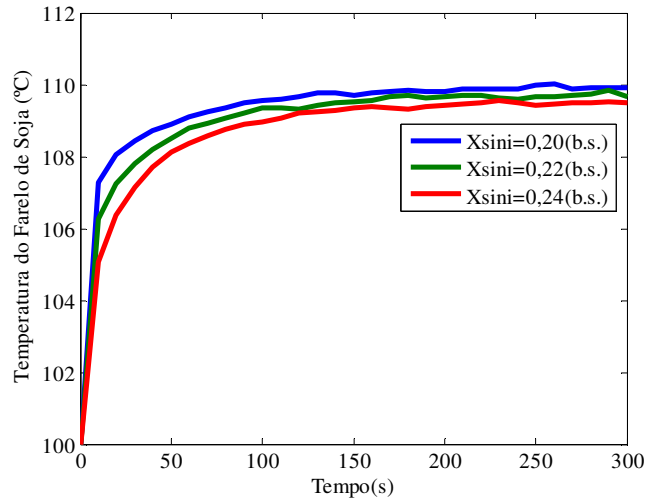


Figura 33. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo

Na Figura 33, observa-se que a elevação da umidade inicial do farelo no secador produz perfis de temperatura final do farelo com valores mais baixos, se distanciando da temperatura de vapor no tubo de aquecimento do produto (111°C). Isto deve-se ao valor de umidade residual no produto que requer uma maior quantidade de energia para a evaporação de água.

c) Influência da variação da velocidade de deslocamento do farelo no secador

Os resultados dos perfis simulados da umidade e da temperatura do farelo em função do tempo, para diferentes valores da velocidade de deslocamento do farelo, são apresentados nas Figuras 34 e 35.

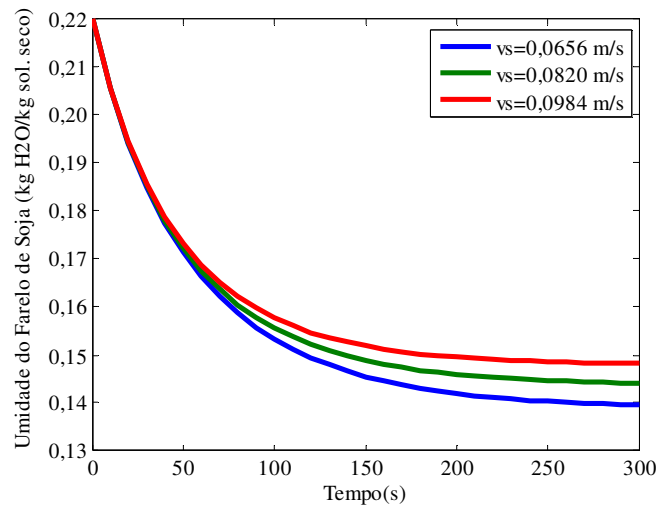


Figura 34. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento do farelo de soja

Na Figura 34, observa-se que a elevação da velocidade de deslocamento do farelo no secador produz umidades finais do farelo mais elevadas. Este fato está relacionado com o menor tempo de exposição do farelo ao calor e ao calor e à transferência de massa. Deste modo, a condição que fornece um produto mais seco foi obtida com a velocidade de 0,0656 m/s.

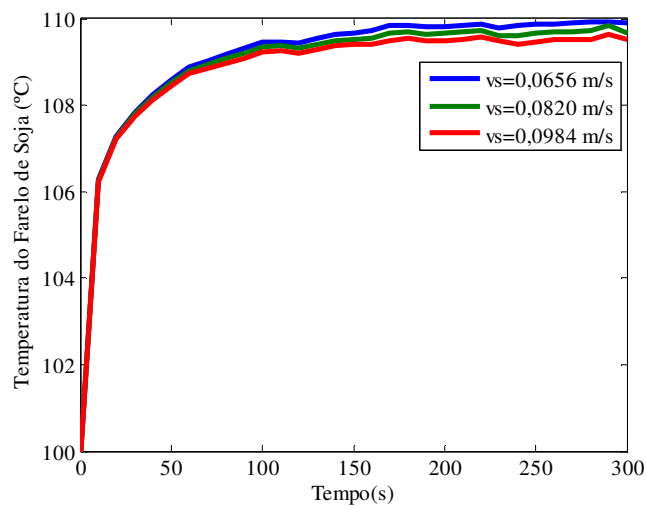


Figura 35. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento do farelo de soja

Na Figura 35 observa-se que a elevação da velocidade de deslocamento do farelo afeta levemente os perfis de temperatura simulados para o farelo de soja na saída do secador.

4.1.3 Avaliação Energética do Secador Rotativo Indireto

4.1.3.1 Consumo de energia na secagem do farelo no secador rotativo indireto

O consumo energético e a eficiência energética da secagem do farelo de soja do secador rotativo indireto foram avaliados aplicando-se as Equações 84 e 85 às condições médias de operação da Tabela 1 e aos dados de projeto e do farelo das Tabelas 5 e 6, variando-se somente as temperaturas do vapor nos tubos. Os resultados desta análise são apresentados na Tabela 7 e nas Figuras 36 e 37.

Tabela 7. Consumo energético e eficiência energética na secagem de farelo de soja

T_{vt} (°C)	X_s (b.s.)	E_{ta} (kW)	E_{tb} (kW)	E_t (kW)	FEf
95	0,132	04953,0	4042,0	08995,0	0,45
98	0,129	02605,4	4127,6	06733,0	0,62
100	0,128	01033,3	4172,7	05206,0	0,80
101	0,127	00513,8	4209,2	04723,0	0,89
111	0,119	07631,6	4440,4	12072,0	0,37
121	0,113	15499,8	4617,2	20117,0	0,23

Observa-se, na Tabela 7, que a medida que a temperatura do vapor nos tubos (T_{vt}) aumenta, maior é a energia consumida na vaporização de umidade no farelo (E_{tb}). Entretanto, a relação da T_{vt} com a energia consumida na elevação da temperatura do farelo (E_{ta}) não mostra uma tendência, mas um ponto mínimo de consumo que ocorre na T_{vt} de 101°C. Sendo assim, esta característica predomina na avaliação do consumo energético do secador rotativo indireto, como se pode notar pelos dados de E_t na Tabela 7 e pela Figura 36.

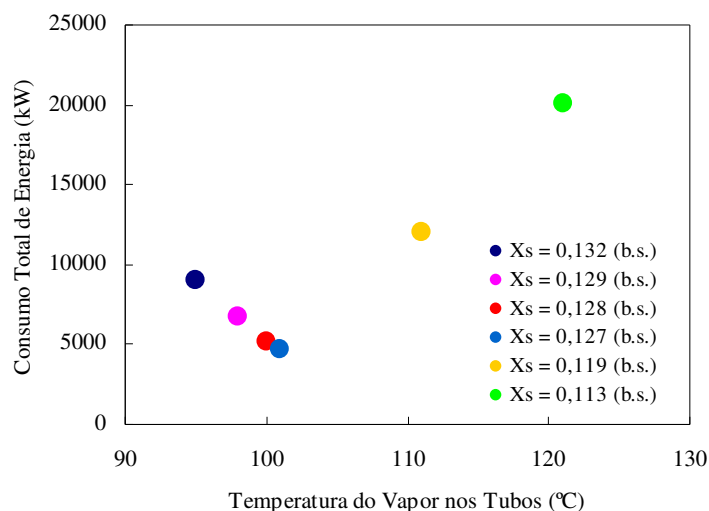


Figura 36. Consumo de energia para diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto

Observa-se, na Figura 36, que o ponto mínimo de consumo de energia é visível e ocorre para temperatura de vapor nos tubos (T_{vt}) de 101°C, sendo de 4,7 MW. Considerando tal fato, verifica-se um grande desperdício de energia nas T_{vt} diferentes deste valor, pois se fornece calor excedente, resultando em umidades finais do farelo menores que a desejada (0,14 b.s.). Além disso, a temperatura inicial do farelo no secador (100°C) já é suficiente para que ocorra a evaporação de umidade, sendo necessário somente mantê-la.

De acordo com a literatura, o perfil e a ordem de grandeza apresentados na Figura 36 são semelhantes ao obtido por Luz (2006) e Luz *et al.* (2009b) na secagem de farelo para o mesmo tipo de secador, sendo justificado, de acordo com estes autores, pela forma com que ocorre a transferência de calor na secagem. Ou seja, a elevação do consumo de energia para valores de $T_{vt} < 101^\circ\text{C}$ ocorre devido a transferência de calor do farelo para os tubos de vapor. Já, a elevação de consumo de energia para valores de $T_{vt} > 101^\circ\text{C}$ está relacionado à transferência de calor dos tubos para o farelo, havendo um superaquecimento deste produto. Portanto, o aumento ou decréscimo de T_{vt} além de 101°C conduz ao desperdício de energia e, conseqüentemente, eleva os custos de operação.

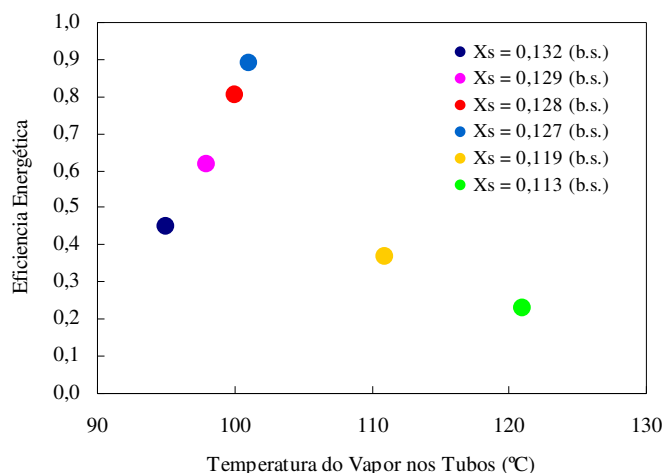


Figura 37. Eficiência energética da secagem para diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto

A eficiência energética da secagem apresentada na Figura 37 mostra uma região com um ponto de máximo ao variar-se a temperatura do vapor nos tubos. Este perfil é decorrente do cálculo da razão entre a quantidade de energia fornecida e consumida na secagem, por isso apresenta um comportamento invertido em relação à Figura 36. Assim, o ponto máximo de eficiência se encontra na temperatura do vapor nos tubos (T_{vt}) de 101°C, na qual foi a menor energia consumida. Tal fato confirma esta condição como a mais adequada à secagem do farelo, estando próxima de 0,90, como sugerido por Strumillo e Kudra (1986), entre 0,7 e 0,9, como sugerido por Perry *et al.* (1997), e próxima de 0,90, como encontrada por Luz *et al.* (2009b) na secagem de farelo neste tipo de secador.

4.1.3.2 Consumo de energia na secagem do farelo aquecendo a água da temperatura ambiente a temperatura do vapor de secagem

O consumo energético e a eficiência energética da secagem do farelo de soja do secador rotativo indireto, considerando o aquecimento da água até a temperatura de vapor nos tubos (T_{vt}), foram avaliados aplicando-se a Equação 86 a 88 às condições médias de operação da Tabela 1, variando-se somente as temperaturas do vapor nos tubos, e aos dados de projeto e do farelo das Tabelas 5 e 6. Os resultados são apresentados na Tabela 8 e nas Figuras 38 e 39.

Tabela 8. Consumo energético e eficiência energética do secador de farelo de soja considerando o aquecimento da água até a temperatura de vapor nos tubos

T_{vt} (°C)	X_s (b.s.)	E_{ta} (kW)	E_{tb} (kW)	E_{tc} (kW)	E_t (kW)	FEf
95	0,132	04953,0	4042,0	7018,0	16013,0	0,25
98	0,129	02605,4	4127,6	5248,0	11981,0	0,34
100	0,128	01033,3	4172,7	4457,8	09663,8	0,43
101	0,127	00513,8	4209,2	3766,0	08489,0	0,50
111	0,119	07631,6	4440,4	9904,0	21976,0	0,20
121	0,113	15499,8	4617,2	16900,0	37017,0	0,12

Observa-se, na Tabela 8, que embora os dados de T_{vt} , X_s , E_{ta} e E_{tb} sejam os mesmos já mostrados da Tabela 7, a energia consumida com a elevação da temperatura da água até a temperatura de vapor nos tubos (E_{tc}) se comporta mais uma vez como a E_{ta} , apresentando um ponto mínimo de consumo que ocorre na T_{vt} de 101°C. Este mesmo comportamento também é observado no consumo total de energia E_t , como pode ser observado na Figura 38, sendo resultante da predominância do comportamento de E_{ta} e E_{tc} .

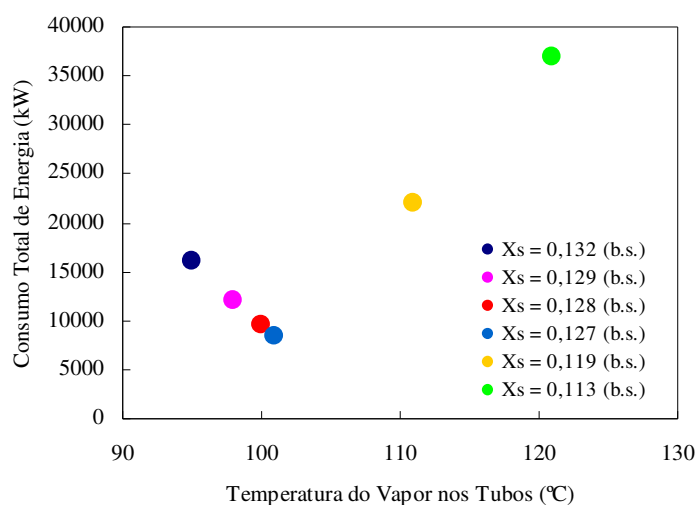


Figura 38. Consumo de energia para diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto, considerando a elevação da temperatura da água à temperatura do vapor

Observa-se, na Figura 38, que o consumo de energia apresentou novamente um ponto mínimo que ocorre na temperatura de vapor nos tubos (T_{vt}) de 101°C, com 8,49 MW, já o máximo consumo pode ser atingido na T_{vt} de 120°C com 37 MW. Além disso, ao comparar os valores dos consumos das Figuras 36 e 38, é possível notar que o aquecimento da água ambiente até a temperatura de secagem nos tubos causou um aumento de até 49% em relação aos consumos observados na Figura 36. Tais fatores ressaltam o quanto é

necessário a otimização do processo, que pode ser realizada utilizando-se as melhores condições de operação e sistemas de controle bem sintonizados.

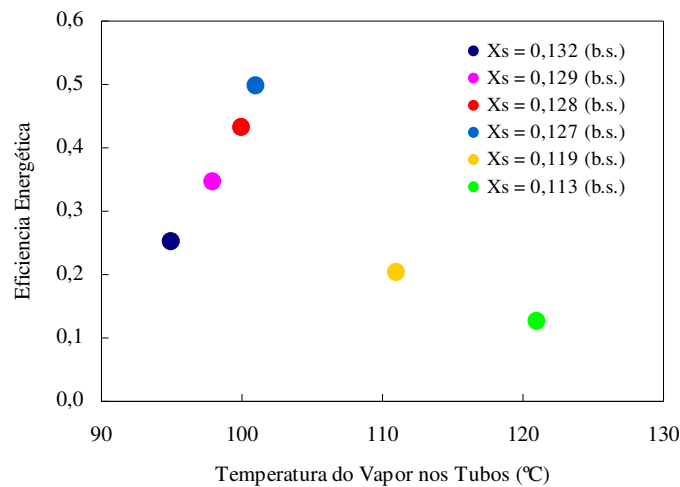


Figura 39. Eficiência do secador a diferentes temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto considerando a elevação da temperatura da água à temperatura do vapor

As eficiências energéticas do secador obtidas para alguns valores da temperatura do vapor nos tubos mostradas na Figura 39 apresentam um comportamento semelhante ao apresentado na Figura 37. No entanto, o ponto máximo de eficiência encontrado é de 0,50 e corresponde a temperatura do vapor nos tubos (T_{vt}) de 101°C, na qual foi menor a quantidade de energia consumida (Figura 38).

4.1.4 Controle *PID* para o Secador Rotativo Indireto

Os resultados das curvas de resposta na avaliação da dinâmica de secagem do farelo para os sistemas sem controle e controlados por *PID SISO* e *MISO* foram analisados em conjunto com o propósito de facilitar suas análises, e são apresentados a seguir.

4.1.4.1 Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle *PID SISO*

As curvas de resposta de variação de umidade de saída do farelo (ΔX_s) em função do tempo sem sistema de controle e com os sistemas de controle *PID SISO* para os casos I, II e III propostos na Tabela 2 (seção 3.2.6.2) estão representados pelas Figuras 41 a 43, mostradas a seguir.

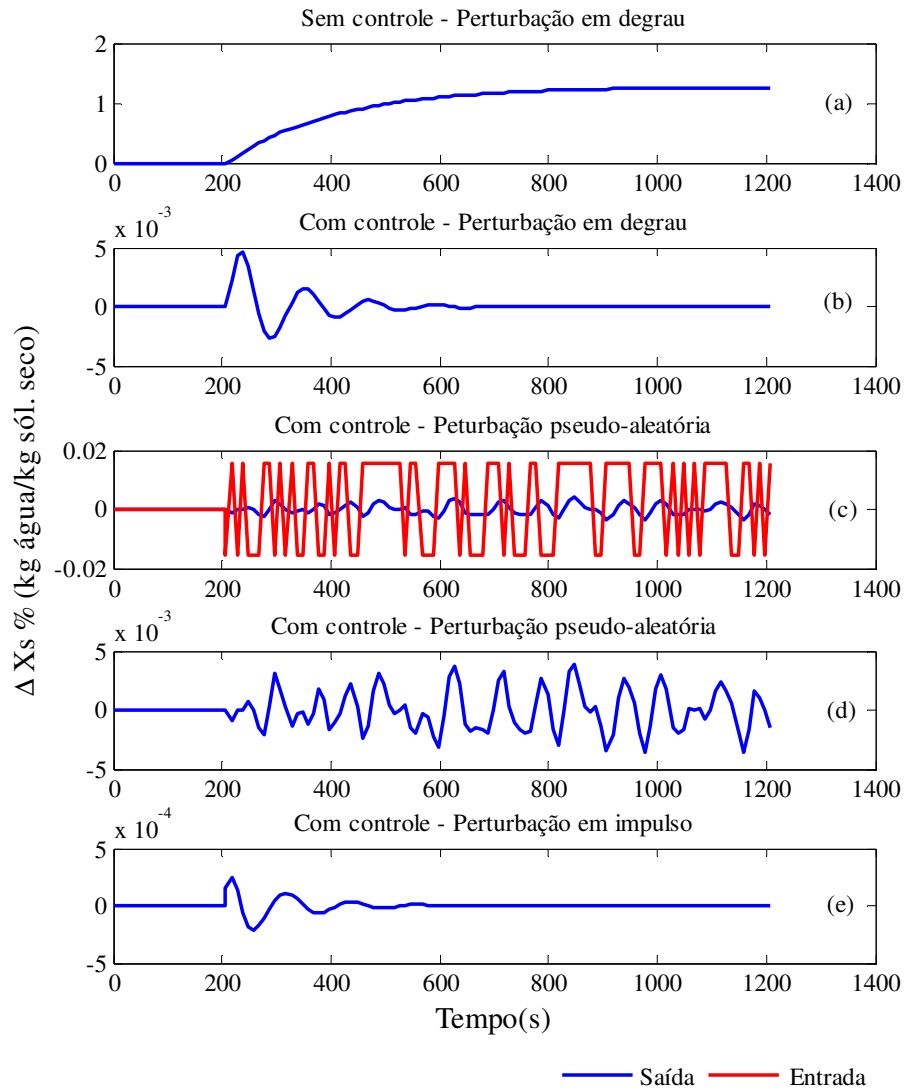


Figura 40. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se v_s

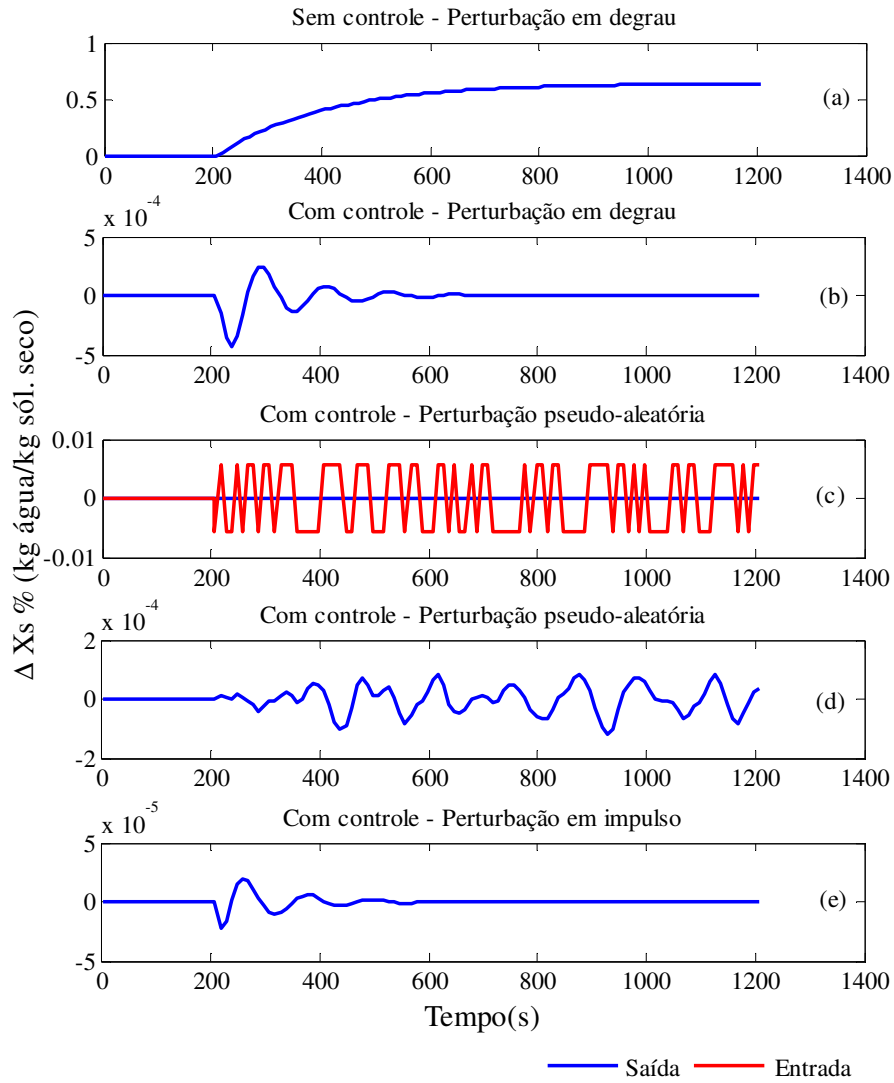


Figura 41. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a v_s e manipular-se T_{vt}

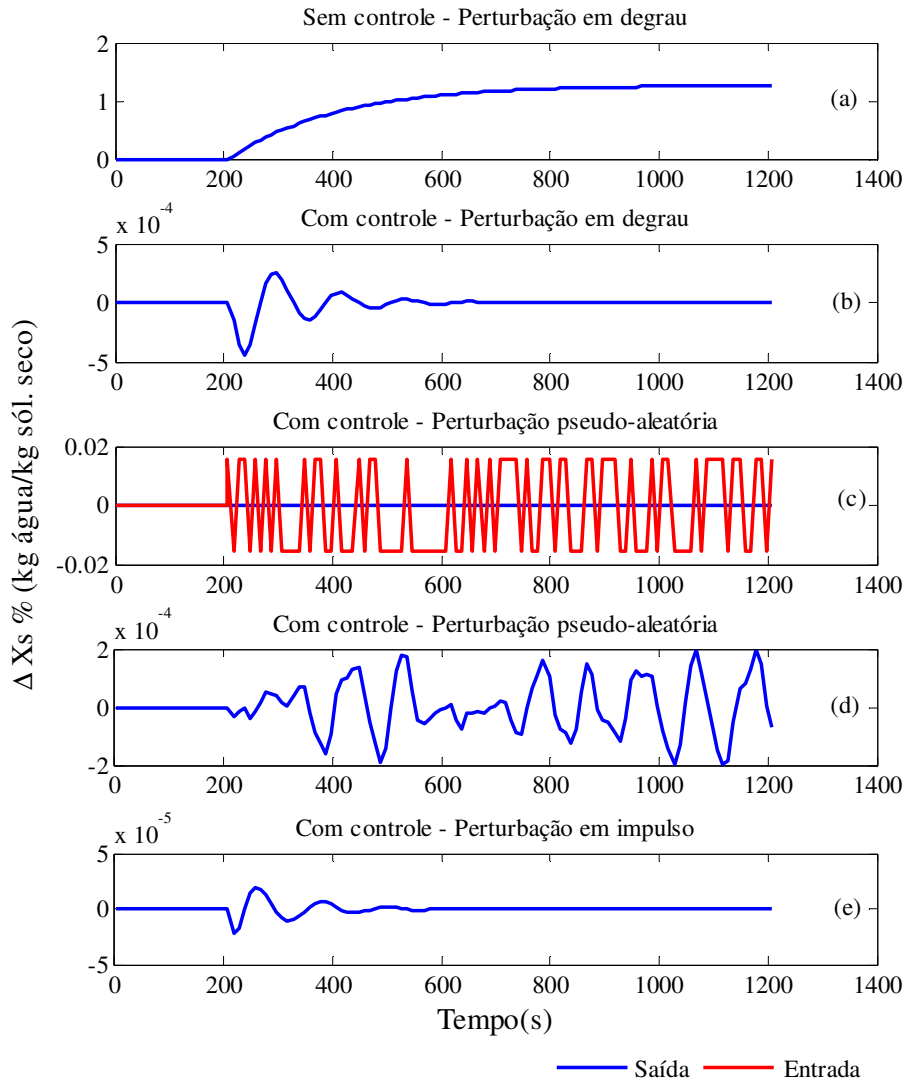


Figura 42. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se T_{vt}

Nas Figuras 40 a 42 pode ser observado que as curvas de resposta da variação da umidade final do farelo na secagem apresentam um tempo de atraso de resposta de 207 s para os sistemas com e sem controle e, a partir daí, são influenciadas por perturbações variáveis. Deste modo, depois deste tempo, para os sistemas sem controle e perturbação em degrau, no gráfico (a), verifica-se um aumento gradual na variação de umidade até atingir o estado estacionário em torno dos 977 s com 1,25% (b.s.) nas Figuras 40 e 42 e, dos 927 s com 0,63% (b.s.) na Figura 41. Considerando estes resultados, verifica-se que a umidade inicial do farelo é a variável que mais influencia a umidade de saída do farelo no secador. Este mesmo comportamento foi observado por Yliniemi (1999) na secagem de calcita em secador rotativo direto. No caso da secagem do farelo estas perturbações de entrada são

possíveis em decorrência de mudanças na umidade do produto na saída na dessolventização/tostagem ao qual o farelo é submetido antes da secagem e a variação na velocidade de deslocamento do farelo por mudanças na velocidade de rotação do secador. Tais propriedades mostram o quanto é necessário a utilização de um sistema de controle, o qual tem a aplicação e o desempenho avaliados nas curvas de resposta seguintes.

As curvas de resposta para o sistema controlado por *PID SISO* e perturbação em degrau, no gráfico (b), mostram que depois do tempo de atraso ocorre uma pequena oscilação na variação de umidade que diminui gradativamente até retornar ao regime estacionário. A oscilação dura até 667 s para a Figura 40, sendo inicialmente de $4,6 \cdot 10^{-3}$, $-2,5 \cdot 10^{-3}$, $1,5 \cdot 10^{-3}$ e $-8,5 \cdot 10^{-4}\%$ (b.s.), até 647 s para a Figura 41, iniciando com $-4,3 \cdot 10^{-4}$, $2,4 \cdot 10^{-4}$, $-1,4 \cdot 10^{-4}$ e $7,7 \cdot 10^{-5}\%$ (b.s.) e até 667 s para a Figura 42, iniciando com $-4,4 \cdot 10^{-4}$, $2,4 \cdot 10^{-4}$, $-1,4 \cdot 10^{-4}$ e $8,4 \cdot 10^{-5}\%$ (b.s.). Além disso, pode-se notar nestas figuras que o período de oscilação, (pu) é de 78 s, o tempo para encontrar o primeiro pico ou depressão é de 237 s e a taxa de amortecimento é de 0,32. Este comportamento de oscilação já era esperado por ser característico de sistemas controlados por *PID* de acordo com Åström e Hägglund (2006) e Jover e Alastruey (2006). As curvas de resposta para o sistema controlado com perturbação pseudo-aleatória nos gráficos (c) e (d), são as mesmas, exceto que em (c) mostra-se ainda o comportamento da variável de entrada e no segundo gráfico, a saída, com aumento de escala, a qual é impossível de ser verificada com detalhes em (c). Nestas curvas observam-se depois do tempo de atraso várias oscilações do controle entre de $\pm 3,5 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 1,5 \cdot 10^{-2}\%$ (b.s.) na Figura 40, de $\pm 1,6 \cdot 10^{-4}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 5,7 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.) na Figura 41 e de $\pm 2 \cdot 10^{-4}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 1,5 \cdot 10^{-2}\%$ (b.s.) na Figura 42. Estas oscilações ocorrem devido ao sistema de controle responder constantemente as freqüentes variações de umidade de entrada do farelo no secador. As curvas de resposta para os sistemas controlados com perturbação em impulso no gráfico (e) mostram depois do tempo de atraso uma pequena oscilação e, a partir daí, diminui gradativamente, retornando ao estado estacionário com a umidade final do farelo desejada. No início a oscilação é de $2,5 \cdot 10^{-4}$, $-2,1 \cdot 10^{-4}$, $1,1 \cdot 10^{-4}$ e $-5,6 \cdot 10^{-5}\%$ (b.s.) para a Figura 40 e perdura até 567 s, de $-2,3 \cdot 10^{-5}$, $2 \cdot 10^{-5}$, $-1 \cdot 10^{-5}\%$ (b.s.) e $0,6 \cdot 10^{-5}$ para a Figura 41 e ocorre até 787 s e de $-2,2 \cdot 10^{-5}$, $2 \cdot 10^{-5}$, $-1 \cdot 10^{-5}$ e $5,8 \cdot 10^{-6}\%$ (b.s.) para a Figura 42 e ocorre até 577 s. O tempo para encontrar o primeiro pico nestes casos foi de 217 s. Adicionalmente, ao comparar os sistemas controlados por *PID* nessas figuras pode ser

notado que o sistema de controle *PID* responde melhor às perturbações pseudo-aleatórias e impulso, obtendo-se nessas as menores variações de umidade final do farelo.

Ao comparar a variação de umidade final do farelo para os sistemas de controle mostrados nas Figuras 40 a 42, é possível observar que os apresentados pelos casos II e III da Tabela 2, representados pelas Figuras 41 e 42, são os que apresentam os melhores resultados em relação ao apresentado pelo caso I da Tabela 2 em função do menor gradiente.

Os parâmetros do controle *PID* calculados conforme o modelo de *Ziegler-Nichols*, para cada caso *SISO* da Tabela 2 são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9. Constantes de sintonia do controle *PID*

	Ganho de Processo (k_p)	Tempo Integral (τ_i)	Tempo Derivativo (τ_d)
Caso I – <i>PID SISO</i>	7,5021	39,7519	9,9380
Caso II – <i>PID SISO</i>	15,0642	38,9294	9,7323
Caso III – <i>PID SISO</i>	7,5021	39,7519	9,9380

Na Tabela 9 verifica-se que as constantes de sintonia do controle *PID* são as mesmas para os casos I e III em que é perturbada a umidade inicial do farelo (X_{sini}) e são manipuladas a velocidade de deslocamento do farelo (v_s) e a temperatura nos tubos de vapor. Já para o caso II, verifica-se que o ganho de processo é 50% maior que os casos I e III e, os tempos integral e derivativo pouca coisa menor que os casos I e III.

4.1.4.2 Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle *PID MISO*

As curvas de resposta de variação de umidade de saída do farelo (ΔX_s) em função do tempo para o sistema de controle *PID MISO* para o caso da seção 3.2.6.3 estão representados pela Figura 43, mostrada a seguir.

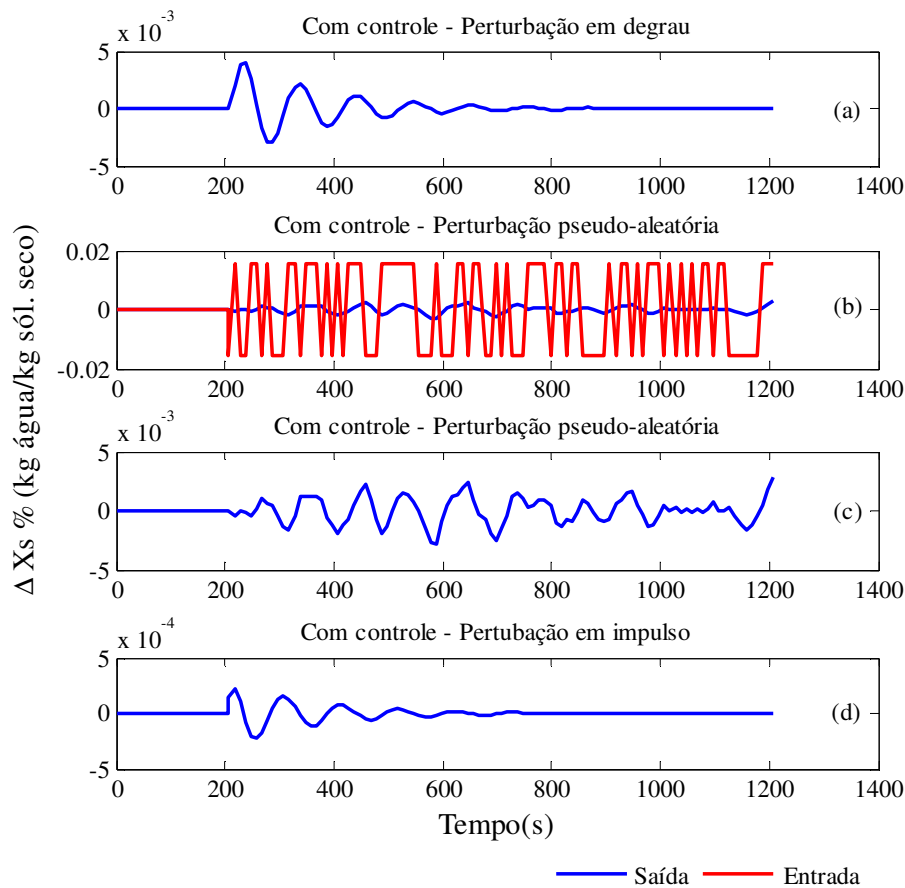


Figura 43. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se v_s e T_{aini}

As curvas de resposta obtidas na secagem do farelo para um controle *PID MISO* apresentadas na Figura 43 também mostram um tempo de atraso de 207 s e a partir daí são influenciadas por perturbações variáveis. Esta oscilação para o sistema controlado por *PID MISO* e perturbação em degrau (gráfico (a)) é inicialmente de 4.10^{-3} , -3.10^{-3} , 2.10^{-3} e $-1,6.10^{-3}\%$ (b.s.) e diminui gradativamente até 827 s aproximadamente, onde retorna ao estado estacionário. O período de oscilação (pu) neste caso é de 78 s, o tempo para encontrar o primeiro pico é de 237 s e a taxa de amortecimento é de 0,5. As curvas de resposta para o sistema controlado com perturbação pseudo-aleatória (gráficos (b) e (c)) mostram após o tempo de atraso na resposta várias oscilações da variação de umidade entre $\pm 2,8.10^{-2}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 1,5.10^{-2}\%$ (b.s.). Estas oscilações ocorrem devido ao sistema de controle responder constantemente as freqüentes variações de umidade de entrada do farelo no secador. A curva de resposta para o sistema controlado com perturbação em impulso (gráfico (d)) mostra depois do tempo de atraso uma pequena oscilação na variação de umidade do farelo de soja na saída do secador

até 737 s, e entra em estado estacionário. No início as oscilações ocorrem entre $2,3 \cdot 10^{-4}$, $-2 \cdot 10^{-4}$, $1,6 \cdot 10^{-4}$ e $-1 \cdot 10^{-4}\%$ (b.s.), diminuindo a oscilação a partir daí gradativamente, até retornar ao estado estacionário e encontrar a umidade final do farelo desejada. O tempo para encontrar o primeiro pico neste caso foi de 217 s. Adicionalmente, ao comparar os sistemas controlados por *PID* na Figura 43 pode ser notado que o sistema de controle *PID* responde melhor às perturbações em impulso, obtendo-se nessas as menores variações de umidade final do farelo.

Ao comparar os resultados entre os controles *MISO* e *SISO* pode ser verificado uma grande semelhança entre as Figuras 40 e 43 devido ao fato de que a ordem de grandeza da Figura 43 ser resultante da soma entre as ordens da Figura 40 e 42, sendo esta última de ordem muito pequena em relação da Figura 40. Também pode ser notado ao comparar as Figuras 40, 42 e 43 que o controle aplicado à Figura 42 continua apresentando a melhor controlabilidade.

4.1.4.3 Desempenho dos controles *PID SISO* e *MISO*

Além da avaliação gráfica dos sistemas de controle *PID SISO* e *MISO* apresentados pelas Figuras 40 a 43, estes foram submetidos a análise de desempenho por meio do cálculo da Integral do Erro Quadrático (*ISE*), dada pela Equação 128. Os resultados das *ISEs* são apresentados na Tabela 10.

Tabela 10. Resultados das *ISEs* para as curvas de resposta dos controles *PID SISO* e *MISO*

	Perturbação em degrau	Perturbação pseudo-aleatória	Perturbação em impulso
Caso I – <i>PID SISO</i>	$9,10 \cdot 10^{-9}$	$1,82 \cdot 10^{-8}$	$2,82 \cdot 10^{-11}$
Caso II – <i>PID SISO</i>	$7,53 \cdot 10^{-11}$	$1,26 \cdot 10^{-11}$	$2,31 \cdot 10^{-13}$
Caso III – <i>PID SISO</i>	$8,00 \cdot 10^{-11}$	$7,83 \cdot 10^{-11}$	$2,36 \cdot 10^{-13}$
Caso IV – <i>PID MISO</i>	$9,30 \cdot 10^{-9}$	$9,09 \cdot 10^{-9}$	$3,51 \cdot 10^{-11}$

Deste modo, observa-se, na Tabela 10, que em todos os casos analisados o controle *PID* apresentou resultados satisfatórios, mostrando valores de *ISE* bastante pequenos. Além disso, os menores valores da *ISE* ocorrem para os casos II e III, como já discutido anteriormente, sendo estes os mais indicados à aplicação do controle *PID*. Além dos bons resultados encontrados para o *PID SISO*, deve-se levar em consideração que ele é um controle mais fácil de ser implementado que o *PID MISO*.

A comparação entre as curvas de resposta para os controles *PID SISO* e *MISO*, dadas pelas Figuras 44 e 45 torna esta avaliação mais clara, como pode ser confirmado a seguir.

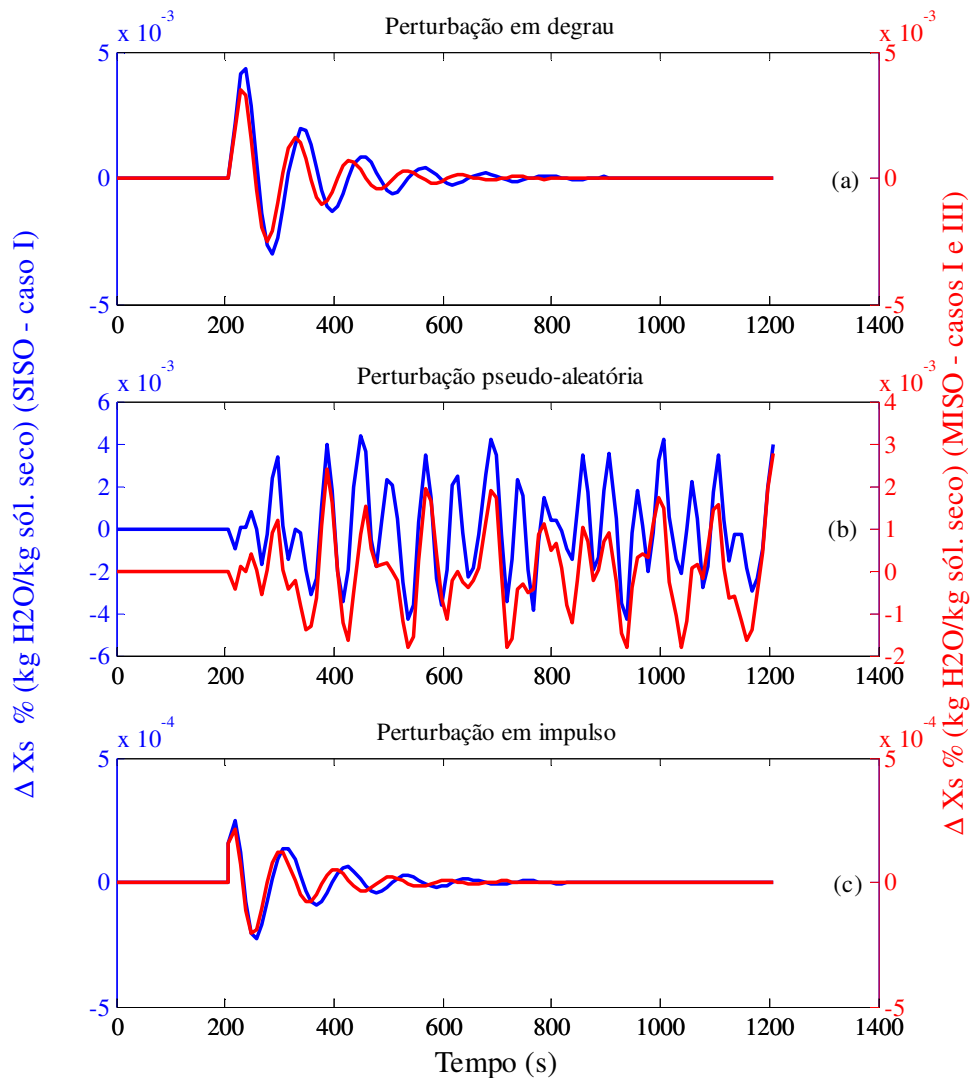


Figura 44. Curvas de resposta da unidade final do farelo de soja para os controles *PID SISO* – caso I e *MISO* – casos I e III

Na Figura 44 pode ser observado que o sistema com controle por realimentação *PID MISO* (em vermelho) tende a oscilar menos com o tempo que o *PID SISO* (em azul), além de estabilizar em menor tempo que o *PID SISO*, como pode ser observado nos gráficos com perturbações em degrau (a) e impulso (c).

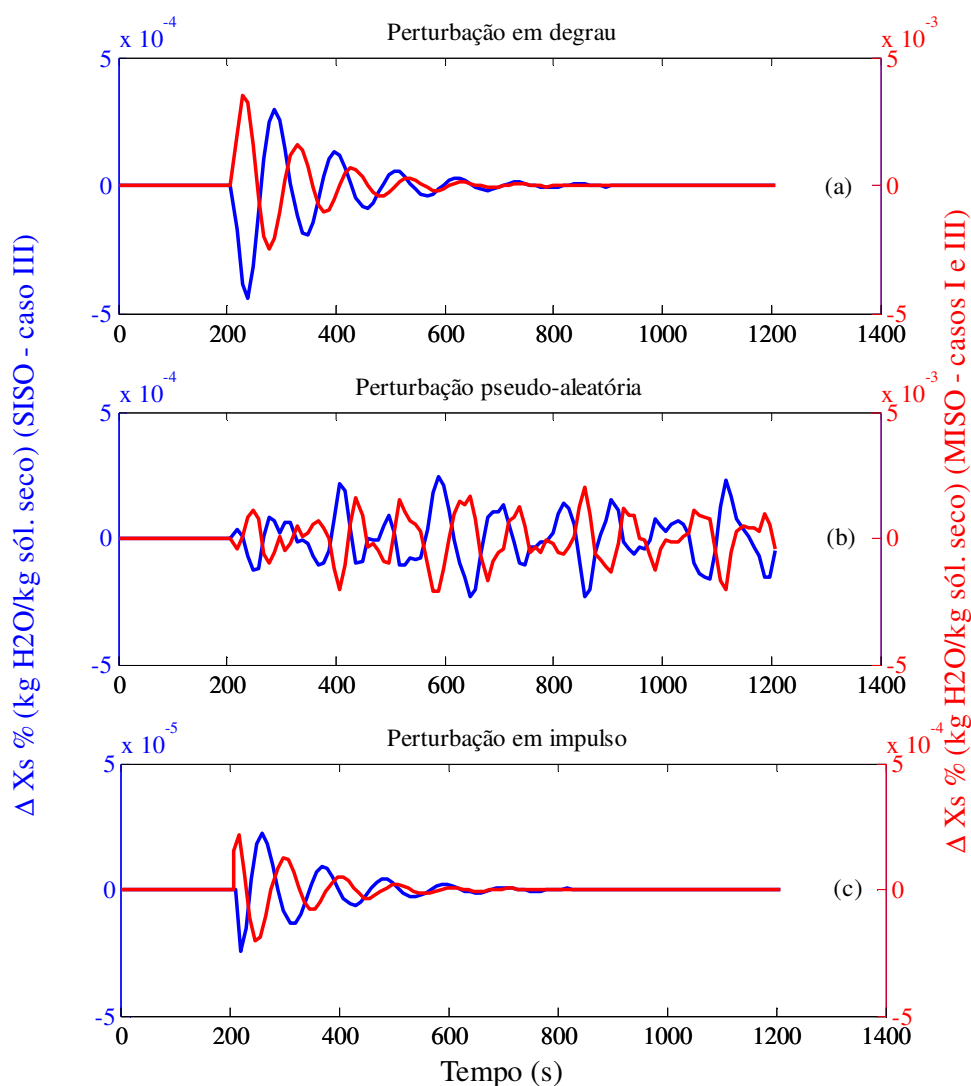


Figura 45. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja para os controles *PID SISO* – caso III e *MISO* – casos I e III

Na Figura 45 pode ser observado que o sistema com controle por realimentação *PID SISO* (em azul) tende a oscilar menos com o tempo que o *PID MISO* (em vermelho) e atinge o estado estacionário em menor tempo, como pode ser observado nos gráficos com perturbações em degrau (b) e em impulso (e).

4.1.4.4 Validação do modelo dinâmico e da ação do controle *PID*

Em função de dificuldades da validação do modelo dinâmico, este foi validado (de forma mais qualitativa do que quantitativa) juntamente com a ação do controle *PID*, analisando-se novamente os resultados do controle *PID SISO* dos casos I e III da Tabela 2 com os resultados experimentais da COCAMAR (Cooperativa Agroindustrial de Maringá). Para tanto, muitos pontos experimentais da umidade final do farelo com o tempo na

secagem foram repetidos para serem comparados com os pontos de umidade simulados pelo controle. Tal fato está relacionado às exigências do programa de simulação do controle no MATLAB[®], pois os pontos experimentais deveriam ser coletados em intervalos de tempo menor, ação impossível de ser realizada. Também foi considerado que os pontos experimentais são de análise instantânea, enquanto que os resultados dados pelo controle apresentam o mesmo tempo de atraso na resposta das análises anteriores. Com isso, os resultados podem ser conferidos nas Figuras 46 e 47.

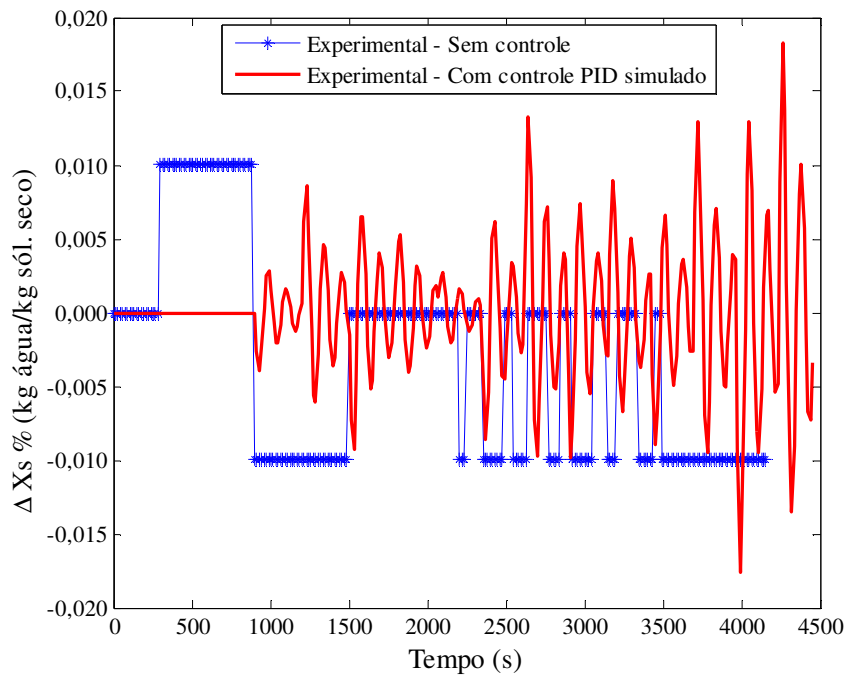


Figura 46. Validação do modelo dinâmico em ação conjunta com a aplicação do controle *PID SISO* – caso I

Observa-se, na Figura 46, que os resultados experimentais da variação da umidade final do farelo na secagem encontram-se na faixa entre $\pm 1.10^{-2}\%$ (b.s.), enquanto que a variação de umidade final do farelo dada pelo controle é encontrada na faixa de $\pm 1,8.10^{-2}\%$ (b.s.). Tais valores mostram que o sistema de controle *PID* oscila muito com as perturbações de umidade do farelo na entrada do equipamento, não sendo eficiente no controle da umidade final do farelo.

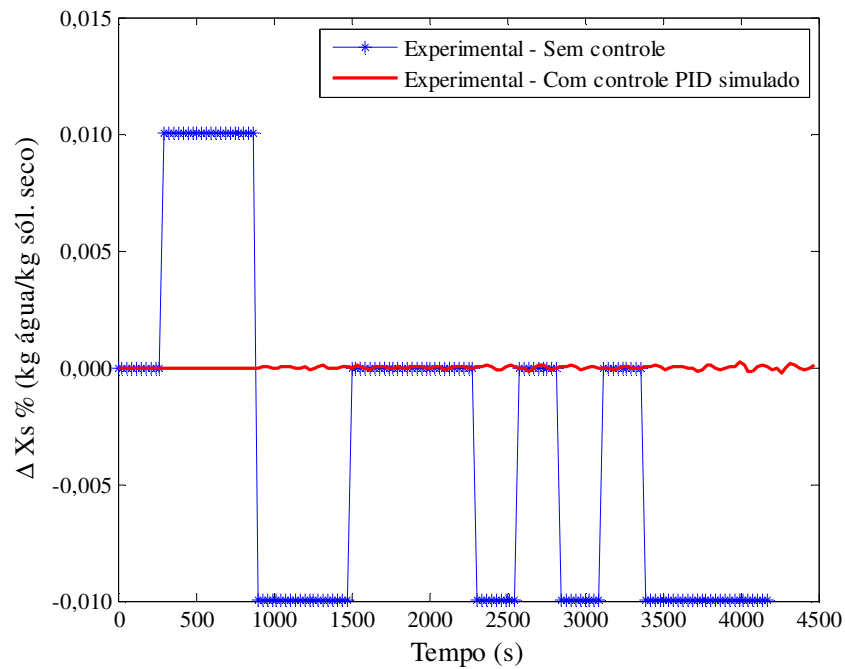


Figura 47. Validação do modelo dinâmico em ação conjunta com a aplicação do controle *PID SISO* – caso III

Observa-se, na Figura 47, que os resultados experimentais da variação da umidade final do farelo na secagem encontram-se na faixa entre $\pm 1.10^{-2}\%$ (b.s.), enquanto que a variação de umidade final do farelo dada pelo controle é encontrada na faixa de $\pm 10^{-5}\%$ (b.s.). Tais valores mostram que o sistema de controle *PID* responde satisfatoriamente as perturbações de umidade do farelo na entrada do equipamento, mantendo a variação de umidade final do farelo menor que a variação dos pontos experimentais. Tais resultados confirmam que a manipulação da temperatura do vapor nos tubos, tendo-se a perturbação na umidade inicial, continua sendo o tipo de controle mais apropriado na secagem do farelo em secado rotativo indireto, como já discutido na seção anterior. Por isso, é comum a manipulação da temperatura do meio secante, mais especificamente a pressão deste, no controle da umidade do produto como é descrito por Lipták (1998) e Mujumdar (1987).

4.1.4.5 Controles *PID SISO* e *MISO* para as melhores condições energéticas

Nas Figuras 48 a 56 são apresentadas as curvas de resposta dos controles *PID SISO* e *MISO* para as três condições de temperaturas de vapor nos tubos do secador rotativo indireto de farelo com menor consumo de energia obtidas na seção 4.1.3.

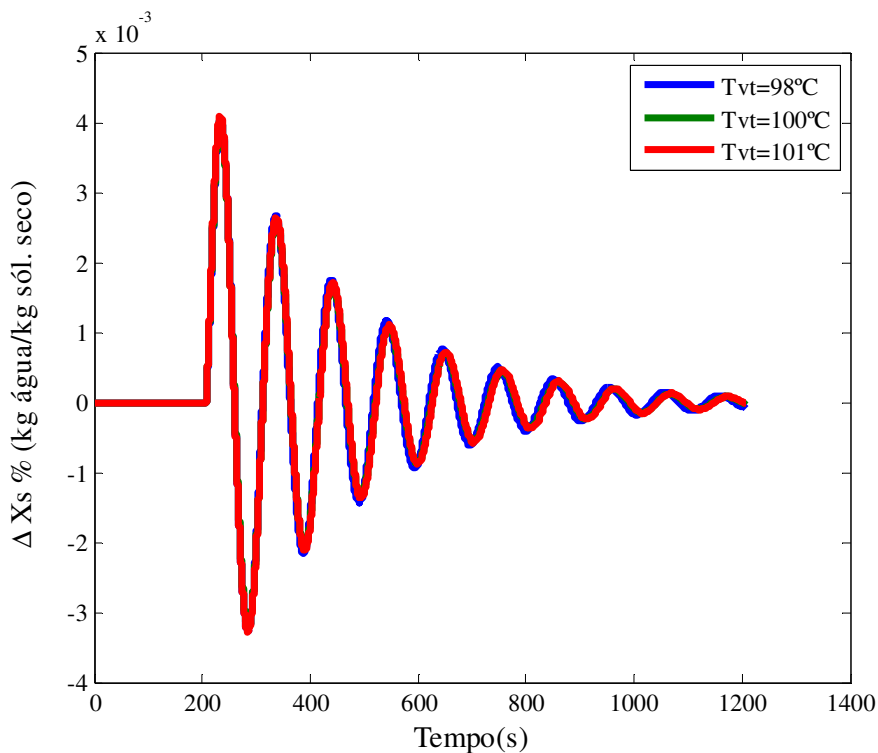


Figura 48. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles *PID SISO* – caso I nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

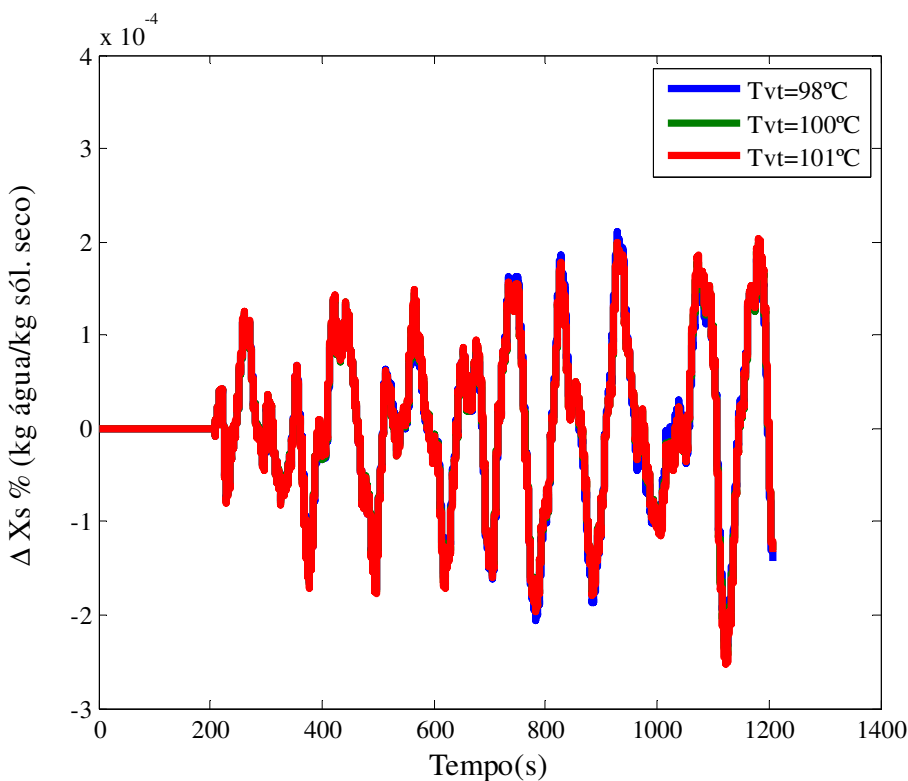


Figura 49. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles *PID SISO* – caso I nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

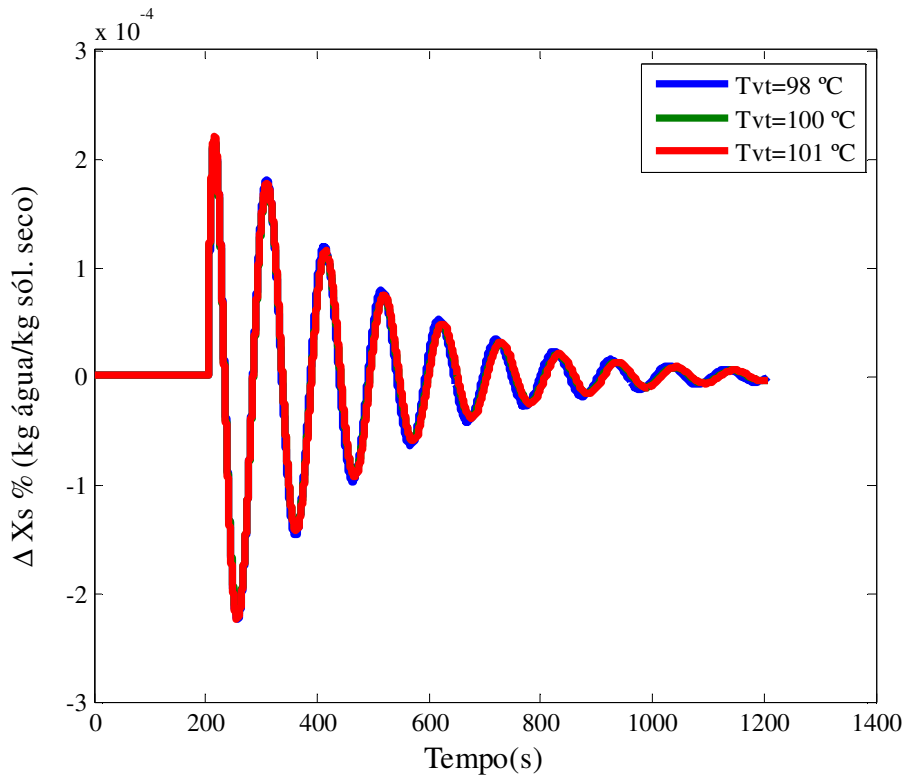


Figura 50. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles *PID SISO* – caso I nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

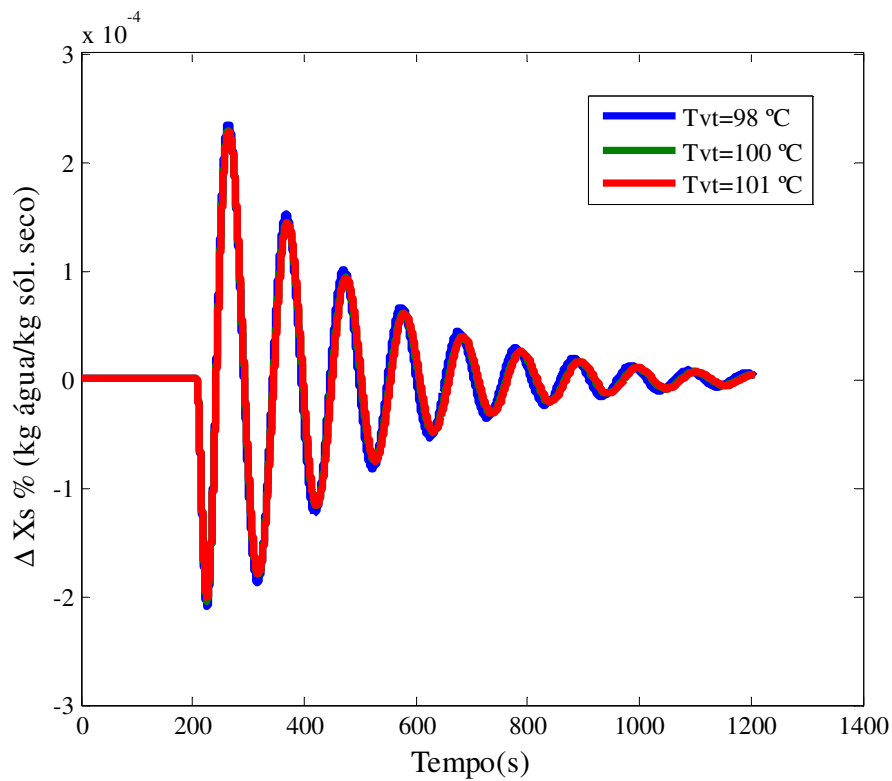


Figura 51. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles *PID SISO* – caso III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

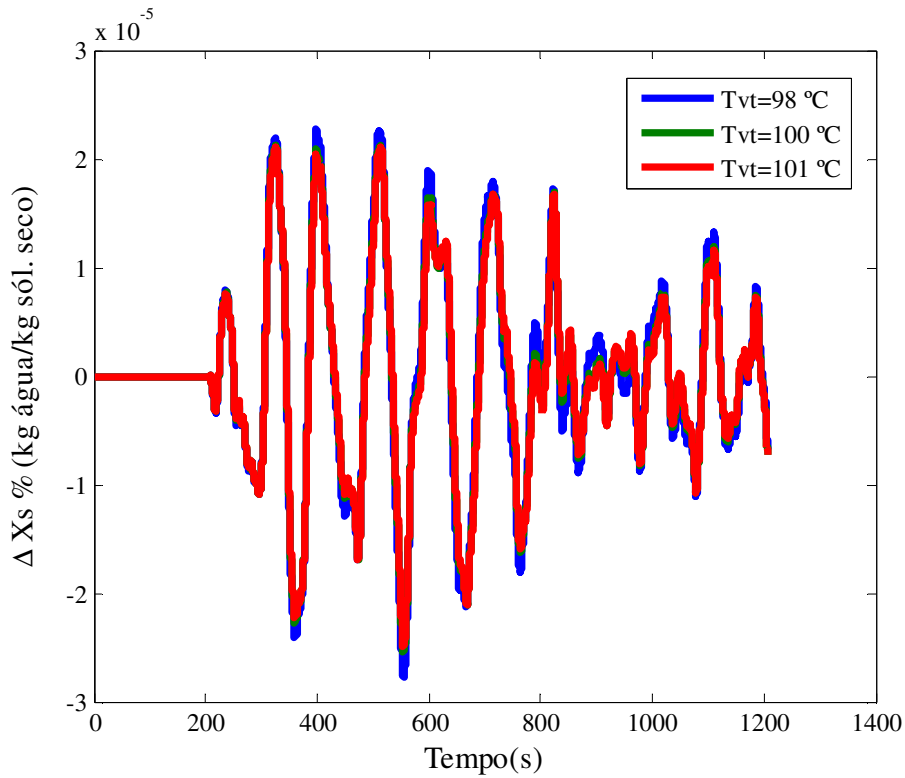


Figura 52. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles *PID SISO* – caso III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

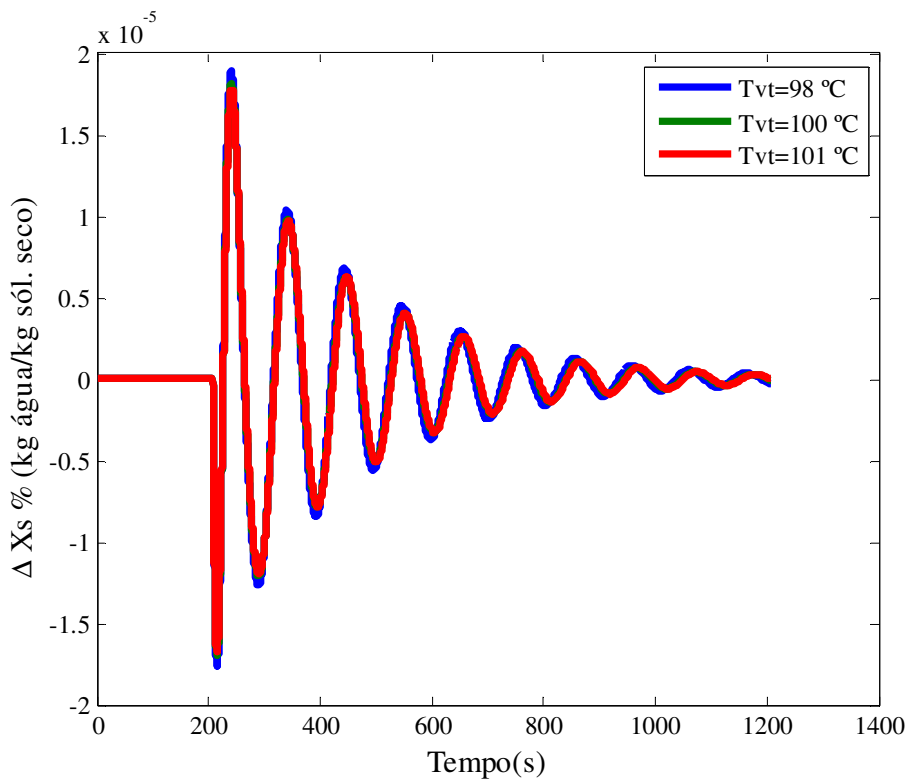


Figura 53. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles *PID SISO* – caso III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

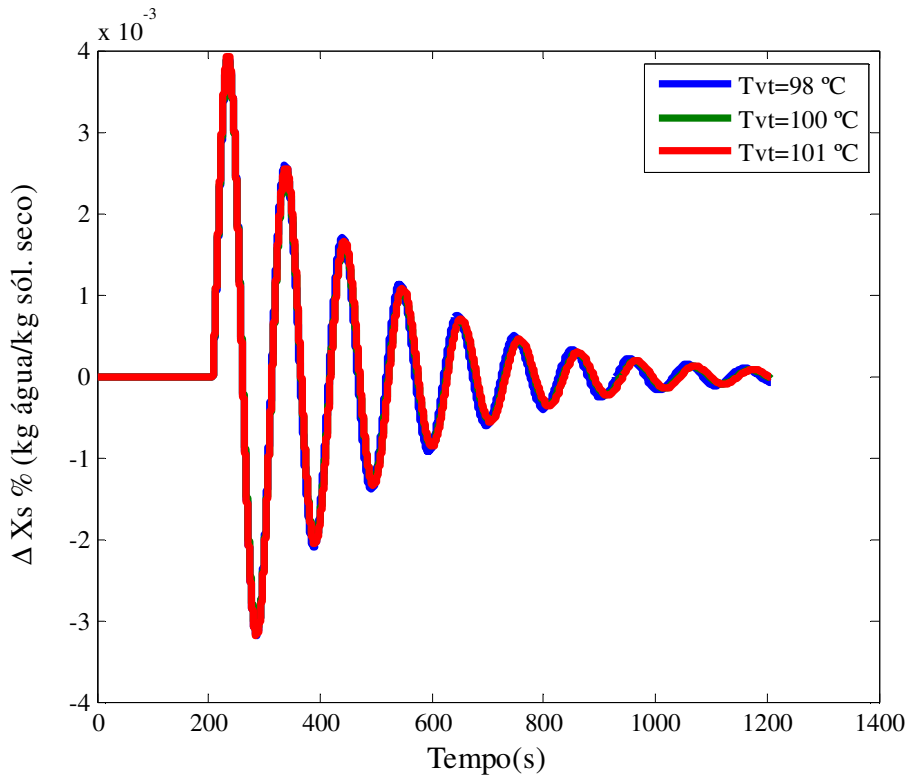


Figura 54. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles *PID MISO* – caso I e III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

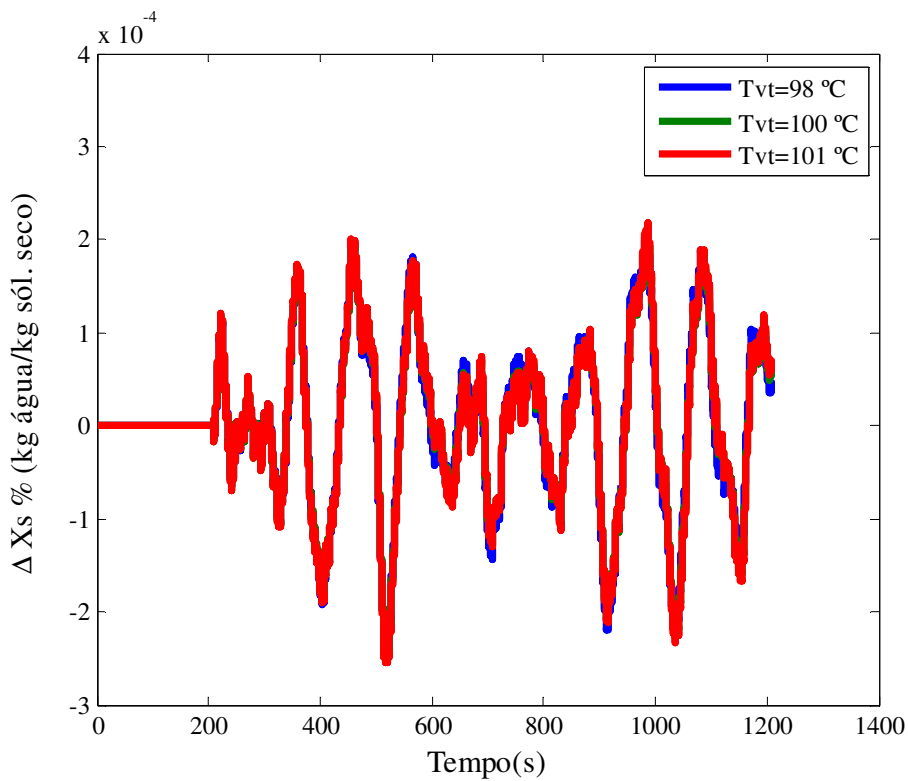


Figura 55. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles *PID MISO* – caso I e III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

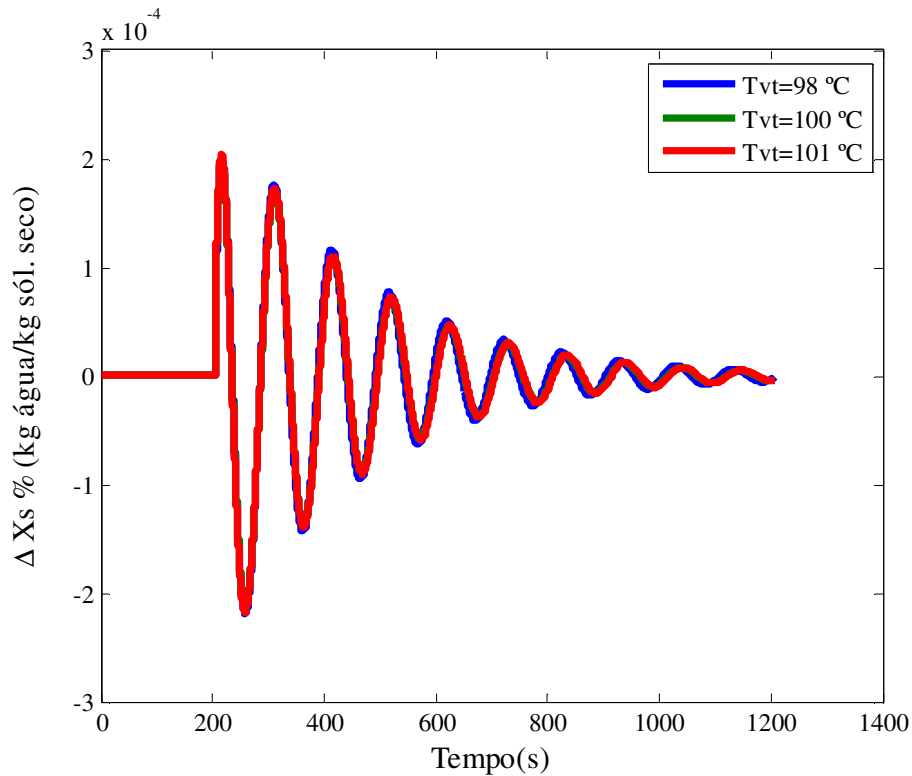


Figura 56. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles *PID MISO* – caso I e III nas T_{vt} de 98, 100 e 101°C

Ao analisar as curvas de resposta, nas Figuras 48 a 56, verifica-se que a variação de umidade final do farelo de soja com o tempo nas temperaturas de vapor nos tubos (T_{vt}) de 98, 100 e 101°C apresentam um tempo de atraso de resposta de 207 s. Adicionalmente, observa-se que as curvas de resposta praticamente se sobrepõem, apresentando desvios muito pequenos em relação a umidade desejada. Assim, uma comparação destes resultados com os das Figuras 40 a 43 foi realizada e verificou-se que a secagem em temperaturas mais altas o controle *PID* apresenta maior controlabilidade. Entretanto, tal fato não descarta a possibilidade de aplicação do controle a T_{vt} de 101°C, já que se tratam de variações da umidade final do farelo extremamente pequenas.

Além da avaliação gráfica, os sistemas de controle *PID SISO* e *MISO* apresentados pelas Figuras 48 a 56 foram submetidos a análise de qualidade por meio do cálculo da Integral do Erro Quadrático (*ISE*), dada pela Equação 135. Os resultados das *ISEs* são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11. Resultados das *ISEs* para diferentes temperaturas de vapor nos tubos

Perturbação		Caso III $T_{vt} = 98^{\circ}\text{C}$	Caso IV $T_{vt} = 100^{\circ}\text{C}$	Caso V $T_{vt} = 101^{\circ}\text{C}$
Caso I - <i>SISO</i>	Degrau	$1,21 \cdot 10^{-6}$	$1,17 \cdot 10^{-6}$	$1,21 \cdot 10^{-6}$
Caso I - <i>SISO</i>	Pseudo-leatório	$9,53 \cdot 10^{-9}$	$9,64 \cdot 10^{-9}$	$1,01 \cdot 10^{-8}$
Caso I - <i>SISO</i>	Impulso	$4,47 \cdot 10^{-9}$	$4,22 \cdot 10^{-9}$	$4,38 \cdot 10^{-9}$
Caso III - <i>SISO</i>	Degrau	$4,73 \cdot 10^{-9}$	$4,37 \cdot 10^{-9}$	$4,34 \cdot 10^{-9}$
Caso III - <i>SISO</i>	Pseudo-leatório	$5,34 \cdot 10^{-11}$	$4,95 \cdot 10^{-11}$	$4,85 \cdot 10^{-11}$
Caso III - <i>SISO</i>	Impulso	$2,18 \cdot 10^{-11}$	$1,98 \cdot 10^{-11}$	$1,94 \cdot 10^{-11}$
Caso I e III- <i>MISO</i>	Degrau	$1,15 \cdot 10^{-6}$	$1,11 \cdot 10^{-6}$	$1,15 \cdot 10^{-6}$
Caso I e III- <i>MISO</i>	Pseudo-leatório	$2,19 \cdot 10^{-8}$	$1,95 \cdot 10^{-8}$	$1,99 \cdot 10^{-8}$
Caso I e III- <i>MISO</i>	Impulso	$4,21 \cdot 10^{-9}$	$3,96 \cdot 10^{-9}$	$4,10 \cdot 10^{-9}$

Observa-se na Tabela 11 que de todos os casos analisados, as *ISE* foram menores para o controle *PID SISO* – caso III, o qual se mostrou novamente ser o mais adequado no controle da secagem do farelo de soja, como já discutido na seção 4.1.4.3.

4.2 CONCLUSÕES SOBRE O SECADOR ROTATIVO INDIRETO

Os resultados apresentados neste capítulo sobre o secador rotativo indireto de farelo de soja permitiram concluir que o modelo dinâmico desenvolvido para o secador é válido e pode ser utilizado na predição de umidade e temperatura de saída de farelo do secador e para a sintonia e análise de sistemas de controle. Já no estudo de análise do consumo energético do secador para várias temperaturas de vapor nos tubos, notou-se que há uma região em que o consumo de energia é mínimo e que a eficiência energética é máxima. Na análise do controle do secador com o *PID SISO* e o *PID MISO*, teve destaque o *PID SISO* com manipulação da temperatura de vapor nos tubos e perturbação da umidade de entrada do farelo de soja no secador. Por fim, verificou-se que a melhor controlabilidade pelos *PID SISO* e *MISO* ocorre nas temperaturas de vapor nos tubos mais elevadas.

Um dos maiores desafios encontrados no estudo do secador rotativo indireto foi a validação do modelo dinâmico proposto devido a problemas operacionais nos secadores. No entanto, este fato não impediu a validação do mesmo, o qual foi feito de forma qualitativa.

4.3 SECADOR ROTATIVO DIRETO

A solução numérica do modelo proposto para o secador rotativo direto, bem como a avaliação energética e a aplicação do controle *PID*, foram obtidas admitindo-se os mesmos dados de projeto e de operação do secador rotativo indireto e os dados do farelo apresentados nas Tabelas 5 e 6 e os dados apresentados na Tabela 12, definidos de acordo com a metodologia descrita na seção 3.3.2. A justificativa para a aplicação dos mesmos dados de projeto e de operação nos secadores visa mostrar se o secador rotativo direto proposto pode ser mais econômico energeticamente e mais fácil de ser controlado por sistemas de controle.

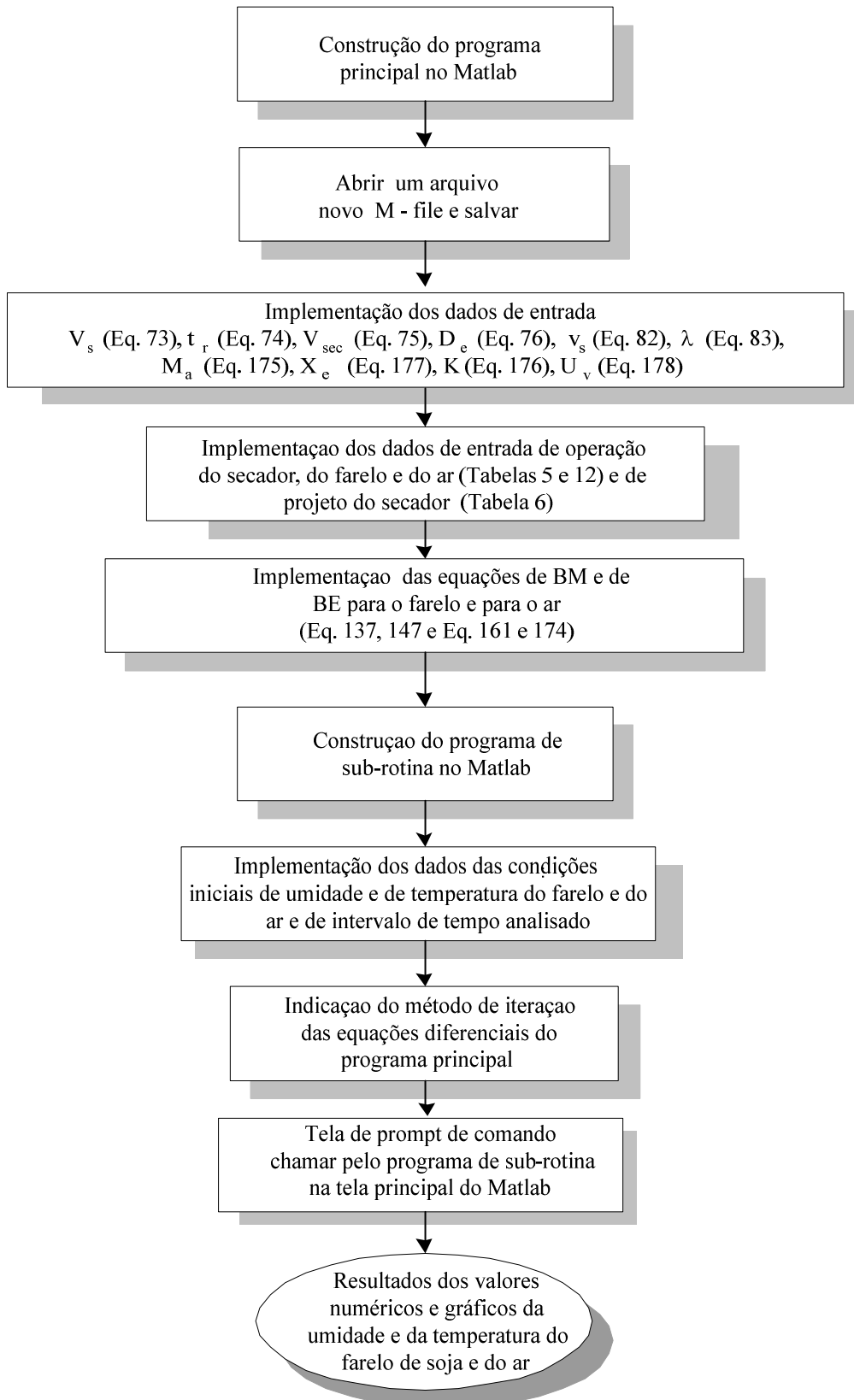
Tabela 12. Dados operacionais e de projeto do secador de farelo de soja

Dados Operacionais do Secador Rotativo		
Propriedades	Símbolos	Dados
Massa de ar seco (kg)	M_a	2000
Umidade inicial do farelo de soja (b.s.)	X_{sini}	0,22
Umidade final do farelo de soja (b.s.)	X_s	0,14
Temperatura inicial do ar (°C)	T_{aini}	90
Temperatura inicial do farelo de soja (°C)	T_{sini}	85
Velocidade do ar de secagem (m/s)	v_a	0,46
Dados do Ar de Secagem		
Propriedades	Símbolos	Dados
Calor específico do ar seco (kJ/kg K)	c_{pa}	1,010
Densidade do ar seco (kg/m ³)	ρ_a	1
Umidade relativa do ar	u_r	0,1
Umidade absoluta do ar inicial (b.s.)	Y_{ini}	0,13

Deste modo, definindo os dados anteriores de operação do secador, foi dada a prosseguimento ao trabalho, como mostrado nas seções a seguir.

4.3.1 Solução Numérica e Validação do Modelo Matemático

Os resultados da simulação do modelo foram obtidos obedecendo as etapas apresentadas no seguinte fluxograma.

Figura 57. Fluxograma do algoritmo para obter X_s e T_s

O desenvolvimento do modelo de secagem do farelo de soja em secador direto em regime transiente com parâmetros discretos foi feito visando sua aplicação em sistemas de controle para este secador. Esta análise foi realizada para observar possíveis alterações no perfil de umidade e temperatura finais do produto em volumes discretos do secador caso este fosse perturbado. As simulações para analisar da influência das condições operacionais realizadas com este modelo mostraram que não houve variações nos volumes de controle além das esperadas, deste modo não achou-se necessário mostrá-las. Além disso, os resultados que interessam nesta análise são as umidades e as temperaturas de entrada e saída do farelo do secador, já que não há como controlar pontos localizados ao longo do secador. Também haveria muitas equações de balanços de massa e energia do modelo de parâmetros discretos a serem implementadas no controle deste sistema, sendo que interessa o tempo para atingir o regime permanente. Neste sentido, as análises propostas para validar o modelo e verificar as influências das condições operacionais e a aplicação do sistema de controle foram feitas utilizando o modelo com parâmetros concentrados descrito anteriormente. Tal fato torna a visualização e análise dos gráficos mais fáceis, compacta e de processamento rápido, os quais podem ser averiguados a seguir.

Os resultados dos perfis de umidade e temperatura do farelo e do ar são mostrados nas Figuras 58 e 59.

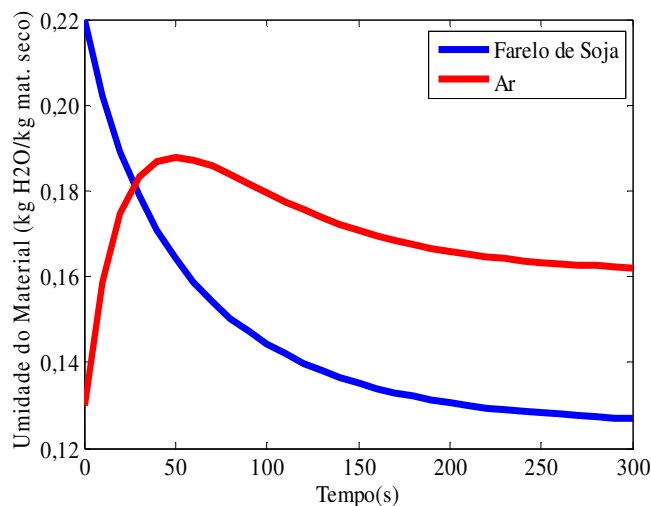


Figura 58. Perfis de umidade do farelo e do ar na saída do secador

Ao analisar-se a Figura 58, observa-se que a umidade do farelo na saída do secador decai expressivamente nos primeiros 75 s e, a partir daí, diminui suavemente ao longo do tempo, atingindo, ao final do tempo avaliado, a umidade de 0,127 (b.s.). Este

comportamento da umidade é semelhante ao de alguns materiais encontrados na literatura. No caso, este perfil é normalmente identificado na secagem de sólidos porosos, sendo semelhante ao obtido por Pelegrina *et al.* (1999) na secagem de produtos vegetais para o mesmo tipo de secador e, por Sun *et al.* (1995), na secagem de grãos em secador convectivo. Adicionalmente, observa-se que a umidade do ar de secagem aumenta até os 50 s, período em que a umidade do farelo está mais fácil de ser removida e, a partir daí, a umidade do ar diminui, indicando pouca remoção de umidade do produto. Este comportamento da variação de umidade do ar com o tempo também foi demonstrado por Sun *et al.* (1995).

Ainda pode ser verificado, na Figura 58, que a umidade final do farelo obtida industrialmente, de 0,14 (b.s.) (Tabela 5), é alcançada aos 120 s e num tempo menor que o tempo médio de residência calculado para este secador. Além disso, pode ser observado que, para um mesmo tempo de avaliação para os modelos dos secadores rotativos indireto e direto, este remove mais umidade.

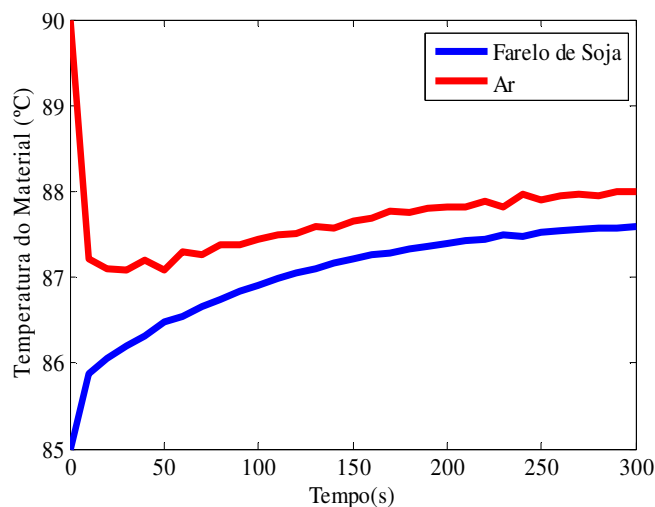


Figura 59. Perfis de temperatura do farelo e do ar na saída do secador

Observa-se, na Figura 59, que a temperatura do farelo na saída do secador aumenta levemente no tempo avaliado, podendo-se notar que esta variação nos primeiros 10 s é linear e, a partir daí, exponencial com pequenas oscilações não fenomenológicas, até atingir 87,6°C. Este comportamento da temperatura do farelo também foi obtido por Sun *et al.* (1995) na secagem de grãos em secador convectivo. Observa-se ainda, que a temperatura do ar de secagem apresenta uma queda da temperatura até 30 s, atingindo 87°C, e a partir daí, elevam-se com pequenas oscilações não fenomenológicas até o final

do tempo avaliado, alcançando 88°C. A diminuição de temperatura do ar no início do processo mostra que parte da energia do ar foi utilizada para evaporar a água. A medida que a taxa de evaporação diminui a perda de energia do ar diminui.

Nas Figuras 58 e 59 ainda pode ser observado que os perfis de umidade e temperatura do farelo apresentam uma resposta com características de primeira ordem.

Considerando que o modelo dinâmico do secador rotativo direto apresentou umidade final do farelo muito próxima a desejada industrialmente (0,14 (b.s.)) e apresentou um perfil semelhante ao obtido para secador indireto, mostrado e validado na seção 4.1.1 e por Pelegrina *et al.* (1999) e Sun *et al.* (1995), como já discutido para as Figuras 58 e 59, conclui-se que o modelo transiente proposto para o secador rotativo direto está qualitativamente validado. Além disso, ao analisar os resultados apresentados nessas figuras, observa-se que o secador rotativo direto obteve um melhor desempenho que o secador rotativo indireto. Neste contexto, outros estudos foram realizados, como apresentado a seguir, motivando a sua aplicação ainda mais.

4.3.2 Influência das Condições Operacionais

Ao analisar a influência das condições operacionais menor, média e maior apresentadas na Tabela 3 (seção 3.3.3), pode ser verificado que os perfis de umidade e de temperatura finais do farelo simulados se comportam de forma semelhante ao discutido na solução numérica mostrado na seção anterior 4.2.1, enquanto que a intensidade desta influência é destacada em cada caso discutido a seguir.

a) Influência da variação de temperatura do ar de secagem

Os resultados dos perfis simulados da umidade e da temperatura do farelo em função do tempo para diferentes valores da temperatura do ar de aquecimento são apresentados nas Figuras 60 e 61.

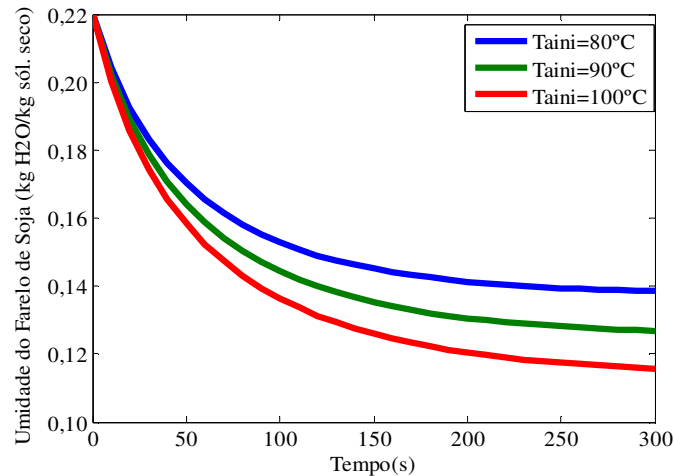


Figura 60. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas iniciais do ar de secagem

Verifica-se na Figura 60 que o aumento da temperatura do ar de secagem eleva taxa de remoção da umidade do farelo, obtendo-se para os casos analisados um produto mais seco na temperatura inicial do ar (T_{aini}) de 100°C.

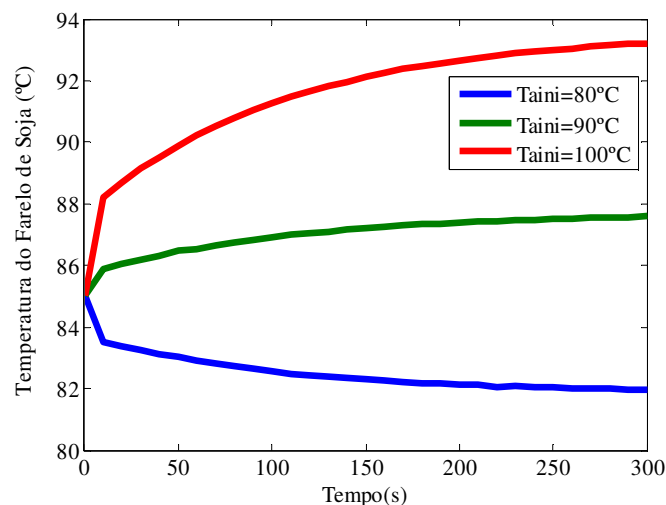


Figura 61. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes temperaturas iniciais do ar de secagem

Observa-se, na Figura 61, que a elevação da temperatura inicial do ar de secagem tende a produzir um farelo com temperaturas de saída do secador que se aproximam das temperaturas do próprio ar. Tal fato ocorre devido ao produto entrar no secador já com umidade relativamente baixa, absorvendo calor mais fácil e rapidamente porque gastou menos energia com a evaporação da umidade.

b) Influência da variação da umidade inicial do farelo de soja

Os resultados dos perfis simulados da umidade e da temperatura do farelo em função do tempo para diferentes valores da umidade inicial do farelo (X_{sini}) são apresentados nas Figuras 62 e 63.

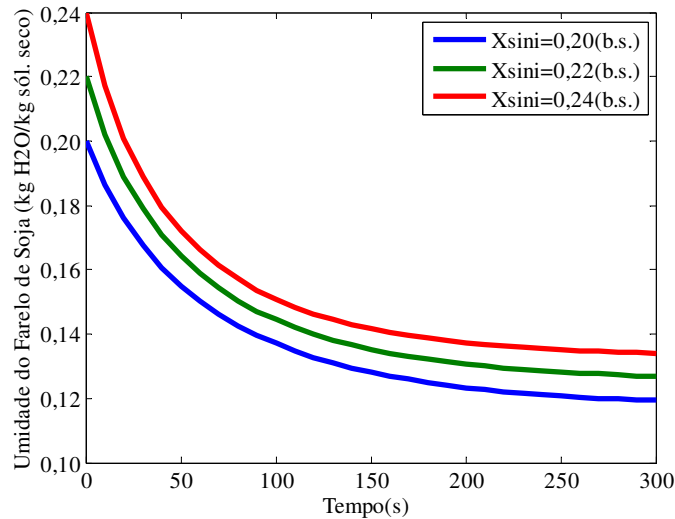


Figura 62. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo

Na Figura 62 observa-se que a elevação da umidade inicial da umidade do farelo produz valores maiores de umidade de saída do mesmo, obtendo-se para os casos analisados um produto mais seco para a umidade inicial de 0,20 (b.s.).

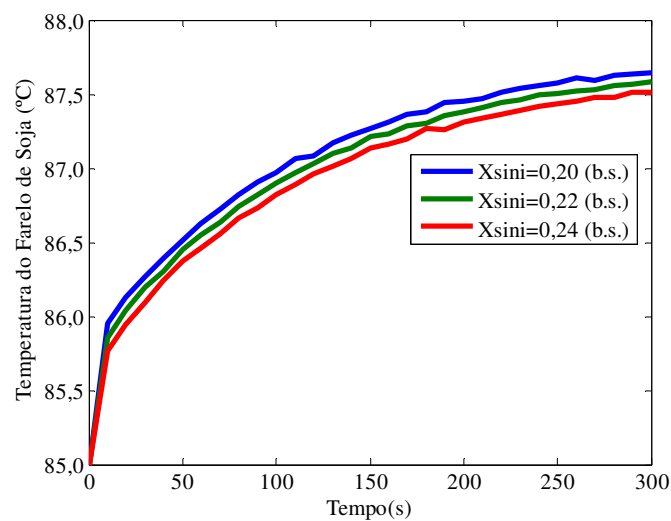


Figura 63. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes umidades iniciais do farelo

Na Figura 63 observa-se que a elevação da umidade inicial do farelo no secador, produz perfis de temperatura final do farelo levemente menores e que tendem a se distanciar da temperatura do ar de aquecimento do produto. Tal fato ocorre devido ao valor de umidade residual no produto que requer uma maior quantidade de energia para a evaporação de água.

c) Influência da variação da velocidade de deslocamento do farelo no secador

Os resultados dos perfis simulados da umidade e da temperatura do farelo em função do tempo, para diferentes valores da velocidade de deslocamento do farelo, são apresentados nas Figuras 64 e 65.

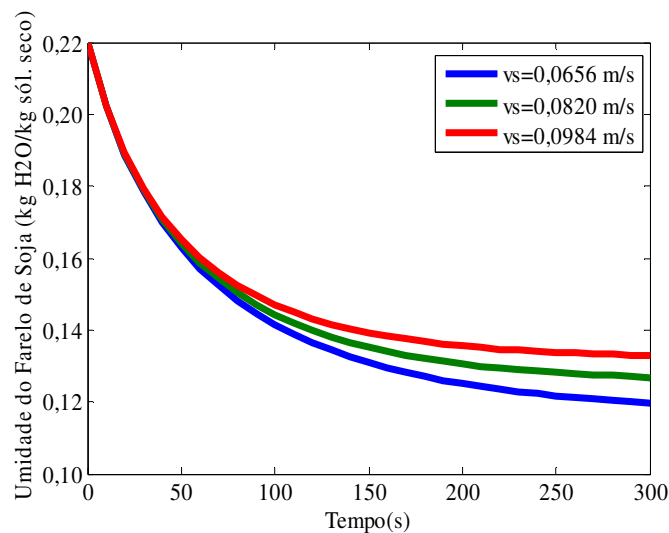


Figura 64. Perfis de umidade do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento

Observa-se, na Figura 64, que a elevação da velocidade de deslocamento do farelo no secador produz umidades finais mais elevadas deste produto. Este fato está relacionado ao menor tempo de exposição do farelo ao calor e à transferência de massa. Com isso, a condição que fornece um produto mais seco foi obtida com a velocidade de 0,0656 m/s.

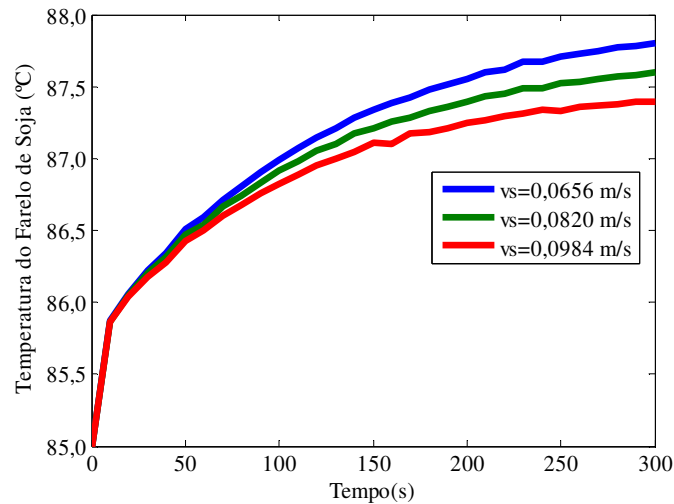


Figura 65. Perfis de temperatura do farelo na saída do secador para diferentes velocidades de deslocamento

Na Figura 65, observa-se que a elevação da velocidade de deslocamento do farelo diminui sua temperatura final, sendo uma consequência da menor exposição ao calor, apesar da pouca diferença entre os perfis simulados.

d) Influência da variação da umidade inicial do ar de secagem

Os resultados dos perfis simulados da umidade e da temperatura final do farelo em função do tempo, para os valores de umidade inicial do ar (Y_{ini}) de 0,12; 0,13 e 0,14, apresentaram os mesmos resultados obtidos na solução numérica do modelo (seção 4.3.1).

e) Influência da variação da velocidade de deslocamento do ar de secagem

Os resultados dos perfis simulados da umidade final do farelo em função do tempo, para diferentes valores da velocidade de deslocamento do ar de secagem no secador (v_a), apresentam os mesmos resultados dos perfis de umidade obtidos para a condição de operação discutida na solução numérica do modelo na seção 4.3.1. Os perfis de temperatura final do farelo simulados não apresentaram variações significativas e tiveram desvio máximo de 0,33% em relação a temperatura obtida na seção 4.3.1. Estes comportamentos são justificados pelo fato da secagem ocorrer a taxa decrescente.

Os comportamentos apresentados para os perfis de umidade e temperatura do farelo de soja nos itens a) a c) já eram esperados pelo fato de que as variáveis observadas já haviam sido avaliadas para o secador indireto. Os comportamentos apurados sobre os perfis de umidade e temperatura do farelo de soja nos itens d) e e) tinham efeitos que não eram bem entendidos sobre a secagem deste produto, mas com a análise do efeito destas

variáveis demonstrou que, dentro das condições investigadas, seus efeitos na umidade e temperatura de saída do farelo foram negligenciáveis.

4.3.3 Avaliação Energética do Secador Rotativo Direto

4.3.3.1 Consumo de energia na secagem do farelo no secador considerando a elevação da temperatura do ar ambiente á temperatura de secagem

O consumo energético do farelo de soja em secador rotativo direto foi avaliado aplicando-se a Equação 175 para as condições de operação e os dados de projeto do equipamento e do farelo (Tabelas 5, 6 e 12), variando-se as condições de temperatura do ar de secagem. A análise do consumo levou em consideração o comprimento do secador em que era atingida a umidade obtida industrialmente (0,14 b.s.). Os resultados são apresentados na Tabela 13 e na Figura 66.

Tabela 13. Consumo energético e eficiência energética do secador de farelo de soja

T_{aini} (°C)	E_{t2} (kW)	L (m)
25	0000,0	17
40	0914,8	10
50	1890,0	10
60	3221,0	10
70	4326,0	8
80	5661,0	8
85	4875,0	7
90	4049,0	6
95	3087,0	6
100	2092,0	6

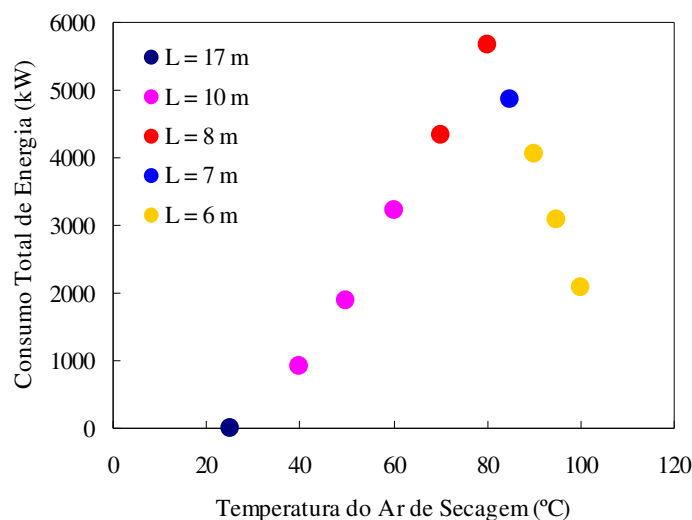


Figura 66. Consumo de energia a diferentes temperaturas do ar de secagem do secador rotativo direto considerando o aquecimento do ar até a temperatura de secagem

Observa-se, na Figura 66, que o consumo de energia apresenta um ponto de máximo e valores que variam entre 0 e 5,66 MW, para os pontos de menor e maior consumo, dados respectivamente pelas temperaturas do ar de secagem (T_{aini}) de 25 e 80°C.

O consumo máximo de energia pelo farelo observado na Figura 66 foi de 5,66 MW ($\approx 1,56$ MJ/kg H₂O evaporada), que se aproxima do apresentado por Pelegrina *et al.* (1999), no estudo da secagem de vegetais em secador rotativo semi-contínuo (1,62 MJ/ kg H₂O evaporada). Este valor de consumo máximo, para este tipo de secador, mostra que é necessário analisar o uso de secadores de forma mais específica, já que o consumo pode variar em função de várias propriedades, pondo em prova valores descritos na literatura, como pode ser verificado em “Best Practice Manual - Drying (2007)”, em que os autores sugerem valores de 3,5 a 12 MJ/ kg H₂O evaporada.

Ao levar em consideração o comprimento do secador no estudo do consumo de energia, averigua-se que este comprimento é inversamente proporcional a elevação da temperatura do ar de secagem. Deste modo, o projeto do secador pode apresentar benefícios como menor custo de operação, em termos energéticos, para maiores comprimentos, ou menor espaço de implantação e custos de projeto, para os de menor comprimento.

Neste estudo, não foi avaliado o consumo energético do secador rotativo indireto com comprimentos menores que o utilizado na COAMO (17 m), porque não se alcançaria a desejada pela não existência de platôs.

4.3.4 Controle *PID* para o Secador Rotativo Indireto

Os resultados das curvas de resposta na avaliação da dinâmica de secagem do farelo para os sistemas sem controle e controlados por *PID SISO* e *MISO* foram analisadas em conjunto com o propósito de facilitar as análises das mesmas e são apresentadas nas seções 4.2.4.1 e 4.2.4.2.

4.3.4.1 Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle *PID SISO*

As curvas de resposta de variação de umidade de saída do farelo (ΔX_s) em função do tempo sem sistema de controle e com os sistemas de controle *PID SISO* para os casos I, II e III propostos na Tabela 4 (seção 3.3.5.2) foram obtidas pela metodologia disposta nesta seção. Para tanto, o comprimento do secador, admitido a princípio de 17 m, foi reduzido para 7 m, visto que pela avaliação energética do secador, este se mostrou o ideal em função das condições analisadas. Os resultados são apresentados pelas Figuras 67 a 70.

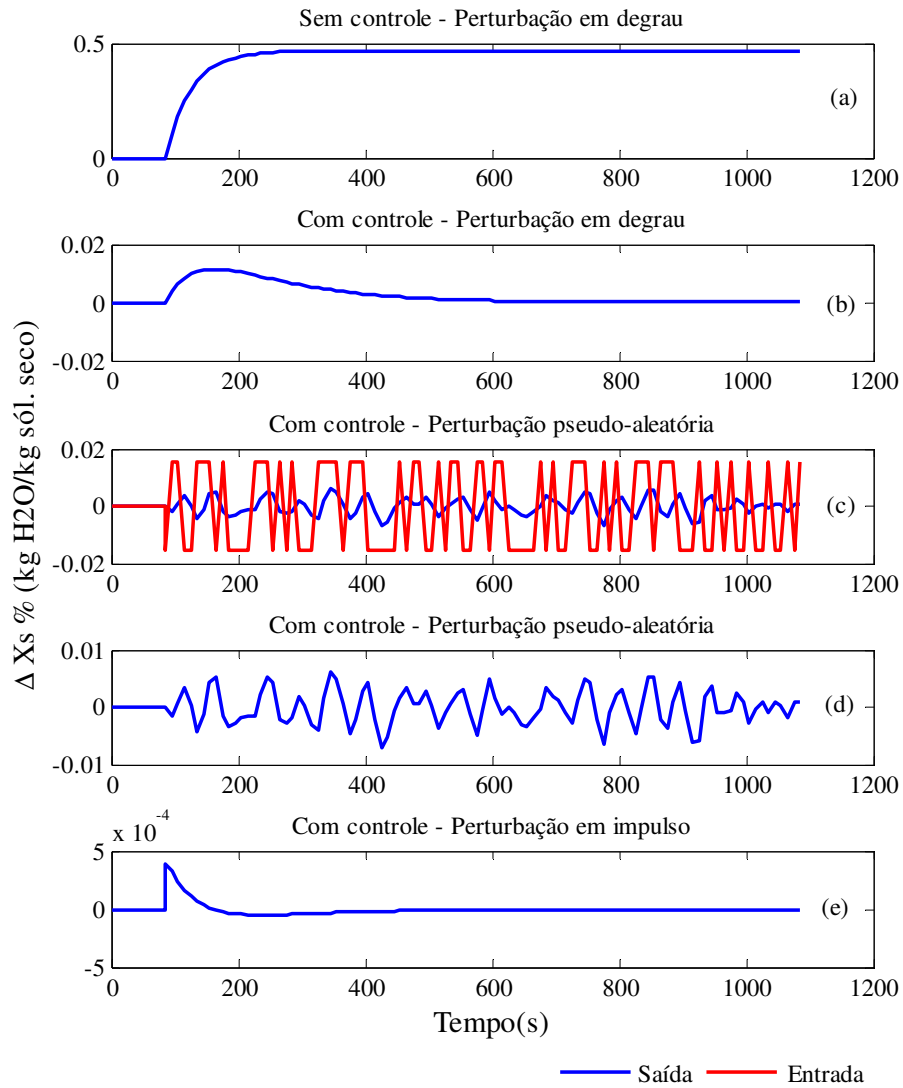


Figura 67. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se v_s

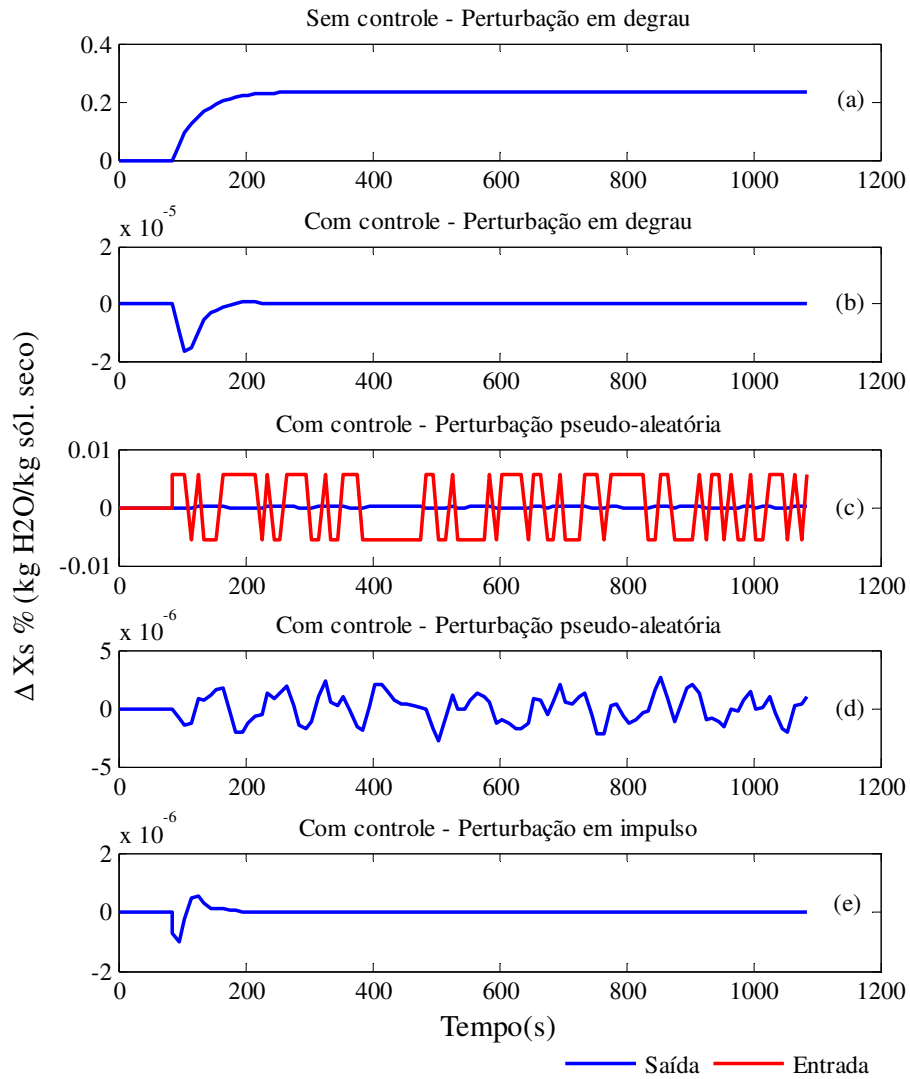


Figura 68. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a v_s e manipular-se T_{aini}

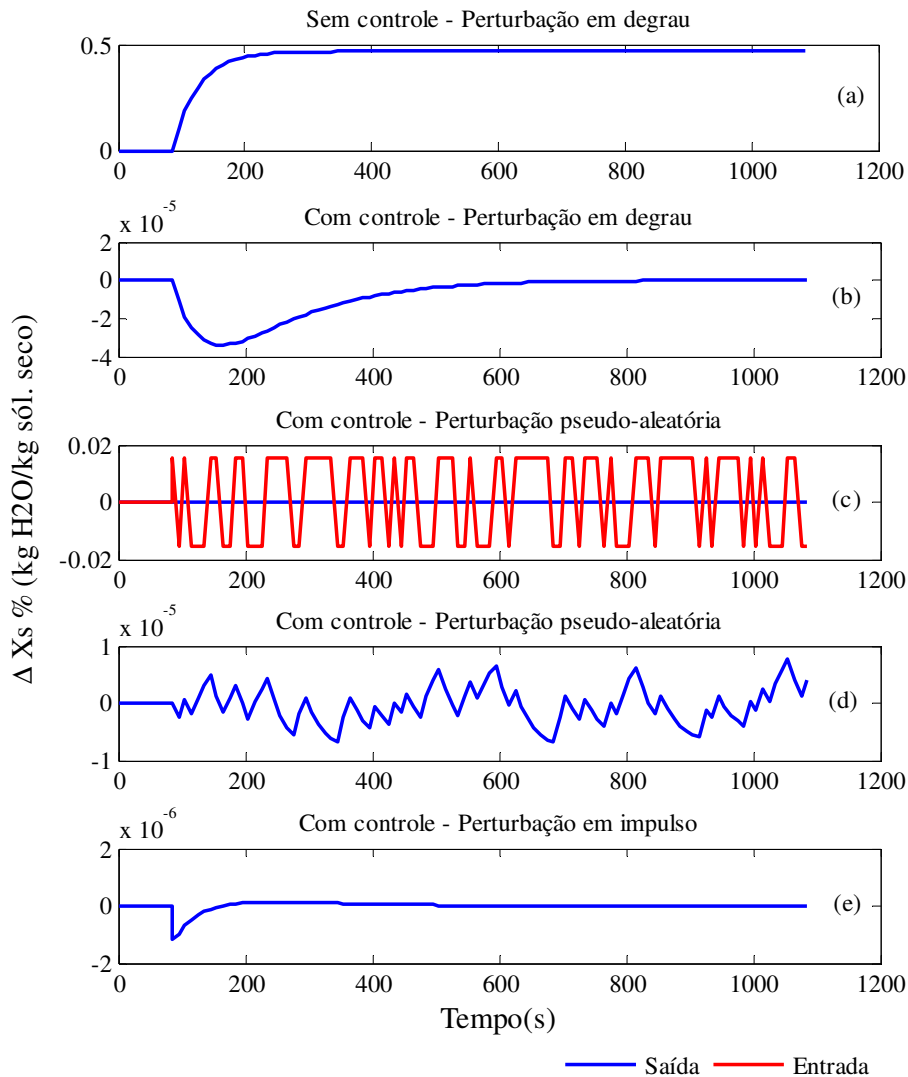


Figura 69. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se T_{aini}

As curvas de resposta obtidas na secagem do farelo para os sistemas sem controle e controlados por *PID SISO* nas Figuras 67, 68 e 69 mostram um tempo de atraso na resposta de 85 s e, a partir daí, são influenciadas por perturbações variáveis. Deste modo, para o sistema sem controle e perturbação em degrau (gráfico (a)), verifica-se depois deste tempo um aumento gradual na variação de umidade para as Figuras 67 e 69 até 235 s, estabilizando com 0,46% (b.s.) e para a Figura 68 até 225 s, onde entra, então, em regime estacionário com 0,23% (b.s.). Estes resultados apontam para uma maior variação da umidade de saída do farelo no secador quando a perturbação ocorre na umidade de entrada do farelo como também mostra Yliniemi (1999) na secagem de calcita em secador rotativo direto. No caso da secagem do farelo esta variação é possível em decorrência a mudanças

na umidade do produto na saída do dessolventização/tostagem ao qual o farelo é submetido antes da secagem ou mistura de produtos de umidades diferentes que entram no secador. Neste sentido, ressalta-se a necessidade da utilização de um sistema de controle na secagem, o qual tem a aplicação e o desempenho avaliados nas curvas de resposta discutidas na sequência.

As curvas de respostas para os sistemas controlados por *PID SISO* e perturbação em degrau, gráfico (b), mostram depois do tempo de atraso uma pequena oscilação na variação de umidade e o sistema retorna ao estado estacionário. Assim, para a Figura 67 esta oscilação atinge um ponto máximo de $1,1 \cdot 10^{-2}\%$ (b.s.) que diminui a $6,2 \cdot 10^{-4}\%$ (b.s.), onde estabiliza aos 585 s, para a Figura 68, é de $-1,7 \cdot 10^{-5}$, $4 \cdot 10^{-7}\%$ (b.s.) e $2,5 \cdot 10^{-7}\%$ (b.s.), onde estabiliza aos 215 s e para a Figura 69, atinge um ponto de mínimo de $-3,4 \cdot 10^{-5}\%$ (b.s.) que aumenta para $-9,0 \cdot 10^{-7}\%$ (b.s.), onde estabiliza aos 685 s. O período de oscilação, nesses casos foi de 68 s, o tempo para encontrar o primeiro pico na Figura 67 foi de 155 s e a primeira depressão nas Figuras 68 e 69 foi de 105, não havendo taxa de amortecimento em nenhuma delas. Este comportamento de oscilação já era esperado por ser característico de sistemas controlados por *PID* de acordo com Åström e Hägglund (2006) e Alastruey e Jover (2006). As curvas de resposta para os sistemas controlados com perturbação pseudo-aleatória nos gráficos (c) e (d) são as mesmas, tendo-se no primeiro os dados de entrada e saída do sistema e no segundo, os resultados da saída com aumento de escala, os quais são impossíveis de serem vistos no gráfico (d). Nestas curvas observam-se depois do tempo de atraso na resposta várias oscilações da variação de umidade, sendo estas para a Figura 67 entre $6,2 \cdot 10^{-3}$ e $-7 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 1,5 \cdot 10^{-2}\%$ (b.s.), para a Figura 68, entre $2,7 \cdot 10^{-3}$ e $-2,8 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 5,7 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.) e, para a Figura 69, entre de $7,7 \cdot 10^{-6}$ e $-6,8 \cdot 10^{-6}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 3,5 \cdot 10^{-4}\%$ (b.s.). Estas oscilações ocorrem devido ao sistema de controle responder constantemente as freqüentes variações de umidade de entrada do farelo no secador. As curvas de resposta para os sistemas controlados com perturbação em impulso, gráfico (e) mostram depois do tempo de atraso uma pequena oscilação na variação de umidade do farelo de soja na saída do secador e entra em estado estacionário. No início, para a Figura 67, a oscilação é de $3,9 \cdot 10^{-4}$, $-3,8 \cdot 10^{-5}$ e $-1,5 \cdot 10^{-5}\%$ (b.s.), onde encontra o estado estacionário aos 455 s, para a Figura 68, é de $-1,0 \cdot 10^{-6}$, $5,5 \cdot 10^{-7}$ e $3,8 \cdot 10^{-9}\%$ (b.s.), onde estabiliza aos 185 s e para a Figura 69, é de $-1,2 \cdot 10^{-6}$, $1,5 \cdot 10^{-7}$ e $6,2 \cdot 10^{-8}\%$ (b.s.), onde estabiliza aos 405 s. O tempo para encontrar o primeiro pico nestes casos foi de 85 s para as Figuras 67 e 69 e, de 95 s para a Figura 68.

Adicionalmente, ao comparar os sistemas controlados por *PID* na Figura 67 a 69, pode ser notado que o sistema de controle *PID* responde melhor às perturbações em impulso, obtendo-se nessas as menores variações de umidade final do farelo.

Ao comparar a variação de umidade final do farelo para os sistemas de controle mostrados nas Figuras 67 a 69, é possível observar que os apresentados pelos casos II e III da Tabela 4, representados pelas Figuras 68 e 69, são os que apresentam os melhores resultados em relação ao apresentado pelo caso I da Tabela 4 em função do menor gradiente desta variação de umidade final do farelo.

Os parâmetros de ajuste do controle *PID* calculados conforme o modelo de *Ziegler-Nichols*, para cada *SISO* da Tabela 4, são apresentados na Tabela 14.

Tabela 14. Constantes do controle *PID*

	Ganho de Processo (k_p)	Tempo Integral (τ_i)	Tempo Derivativo (τ_d)
Caso I – <i>PID SISO</i>	4,9301	33,8037	8,4509
Caso II – <i>PID SISO</i>	9,8596	33,8067	8,4517
Caso III – <i>PID SISO</i>	4,9301	33,8037	8,4509

Na Tabela 14 verifica-se que as constantes de sintonia do controle *PID* são as mesmas para os casos I e III em que é perturbada a umidade inicial do farelo (X_{sini}) e são manipuladas a velocidade de deslocamento do farelo (v_s) e a temperatura de entrada do ar no secador (T_{aini}). Já para o caso II, verifica-se que o ganho de processo é 50% maior que os casos I e III e, os tempos integral e derivativo são praticamente iguais aos casos I e III.

4.3.4.2 Dinâmica de secagem do farelo e aplicação do controle *PID MISO*

As curvas de resposta de variação de umidade de saída do farelo (ΔX_s) em função do tempo para o sistema de controle *PID MISO* para o caso da seção 3.3.5.3 foram obtidas a princípio pela metodologia disposta nesta seção. Os resultados estão representados pela Figuras 74, mostradas a seguir.

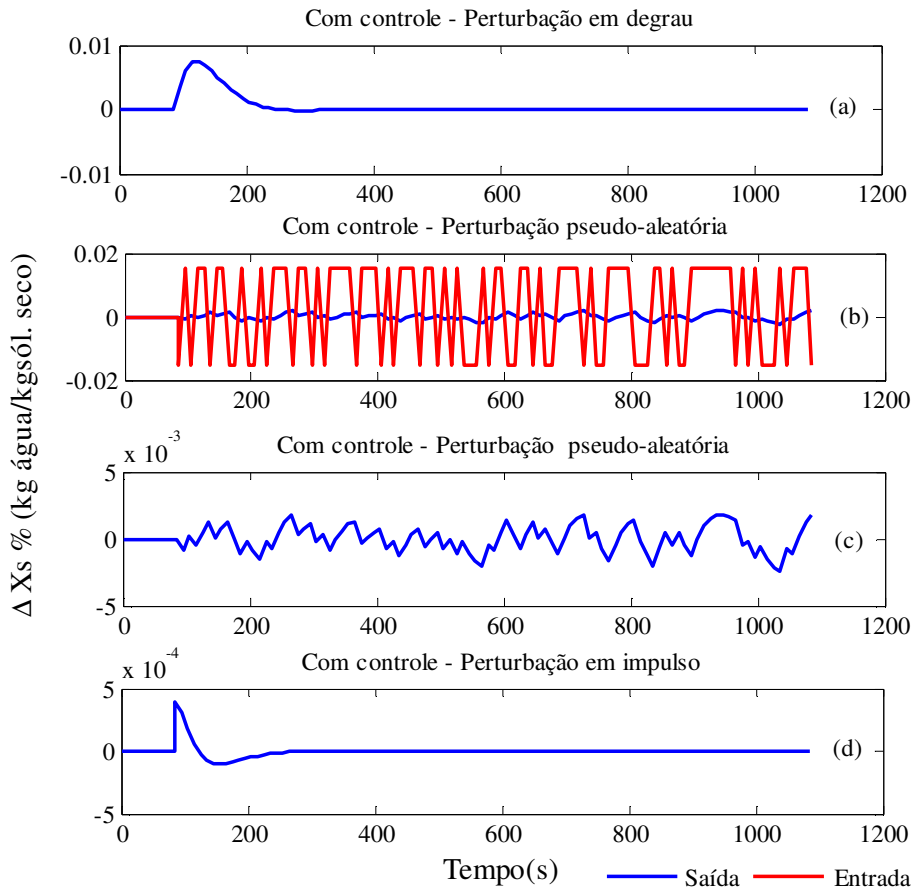


Figura 70. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja ao perturbar-se a X_{sini} e manipular-se v_s e T_{aini}

As curvas de resposta obtidas na secagem do farelo para um controle *PID MISO* apresentadas na Figura 70 também mostram um tempo de atraso na resposta de 85 s e a partir daí são influenciadas por perturbações variáveis. Esta oscilação para o sistema controlado por *PID MISO* e perturbação em degrau (gráfico (a)) mostra um aumento inicial de $7,4 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.), seguido de um decréscimo de $-1,5 \cdot 10^{-4}\%$ (b.s.), outro aumento até $-1,4 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.), onde retorna ao estado estacionário. O período de oscilação (pu) neste caso foi de 68 s, o tempo para encontrar o primeiro pico foi de 125 s e a taxa de amortecimento é de 0,19. As curvas de resposta para o sistema controlado com perturbação pseudo-aleatória mostrados nos gráficos (b) e (c)) são as mesmos, tendo-se no primeiro os dados de entrada e saída do sistema e, no segundo, a saída mostrada com aumento de escala. Nestas curvas observa-se depois do tempo de atraso várias oscilações da variação de umidade entre de $1,8$ e $2,4 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.) para perturbações na entrada de $\pm 1,5 \cdot 10^{-3}\%$ (b.s.). Neste caso, as oscilações ocorrem devido ao sistema de controle

responder constantemente as freqüentes variações de umidade de entrada do farelo no secador. A curva de resposta para o sistema controlado com perturbação em impulso no gráfico (d) mostra depois do tempo de atraso pequena oscilação na variação de umidade do farelo de soja na saída do secador até 255 s, e entra em estado estacionário. No início a oscilação é de $3,9 \cdot 10^{-4}$, $1 \cdot 10^{-4}$ e $-7,4 \cdot 10^{-6}\%$ (b.s.), entrando neste ponto em estado estacionário e encontrando a umidade final do farelo desejada. O tempo para encontrar o primeiro pico neste caso foi de 85 s. Adicionalmente, ao comparar os sistemas controlados por *PID* na Figura 70 pode se notado que o sistema de controle *PID* responde melhor às perturbações em impulso, obtendo-se nessas as menores variações de umidade final do farelo.

Ao comparar os resultados entre os controles *MISO* e *SISO* pode ser verificado uma grande semelhança entre as Figuras 67 e 70 devido ao fato de que a ordem de grandeza da Figura 70 ser resultante da soma entre as ordens das Figuras 67 e 69, sendo esta última de ordem muito pequena em relação da Figura 67. Também pode ser notado ao comparar as Figuras 67, 69 e 70 que o controle aplicado a Figura 69 contínua apresentando a melhor controlabilidade.

4.3.4.3 Desempenho dos controles *PID SISO* e *MISO*

Além da avaliação gráfica dos sistemas de controle *PID SISO* e *MISO* apresentados pelas Figuras 67 a 70, estes foram submetidos a análise de desempenho por meio do cálculo da Integral do Erro Quadrático (*ISE*), dada pela Equação 128. Os resultados das *ISE* são apresentados na Tabela 15.

Tabela 15. Resultados das *ISEs* para as curvas de resposta dos controles *PID SISO* e *MISO*

	Resposta em degrau	Resposta pseudo-aleatória	Resposta em impulso
Caso I – <i>PID SISO</i>	$2,01 \cdot 10^{-7}$	$8,92 \cdot 10^{-8}$	$3,97 \cdot 10^{-11}$
Caso II – <i>PID SISO</i>	$7,64 \cdot 10^{-14}$	$1,07 \cdot 10^{-14}$	$2,31 \cdot 10^{-16}$
Caso III– <i>PID SISO</i>	$1,76 \cdot 10^{-12}$	$1,49 \cdot 10^{-13}$	$3,48 \cdot 10^{-16}$
Caso IV – <i>PID MISO</i>	$3,05 \cdot 10^{-8}$	$1,10 \cdot 10^{-8}$	$3,44 \cdot 10^{-11}$

Observa-se, na Tabela 15 que em todos os casos analisados o controle *PID* apresentou resultados satisfatórios, mostrando valores de *ISE* bastante pequenos. Além disso, os menores valores da *ISE* ocorrem para os casos II e III, como já discutido

anteriormente, sendo estes os mais indicados à aplicação do controle *PID*. Além dos bons resultados encontrados para o *PID SISO*, deve-se levar em consideração que ele é um controle mais fácil de ser implementado que o *PID MISO*.

A comparação entre as curvas de resposta para os controles *PID SISO* e *MISO*, dadas pelas Figuras 67, 69 e 70 torna esta avaliação mais clara, como pode ser confirmado a seguir.

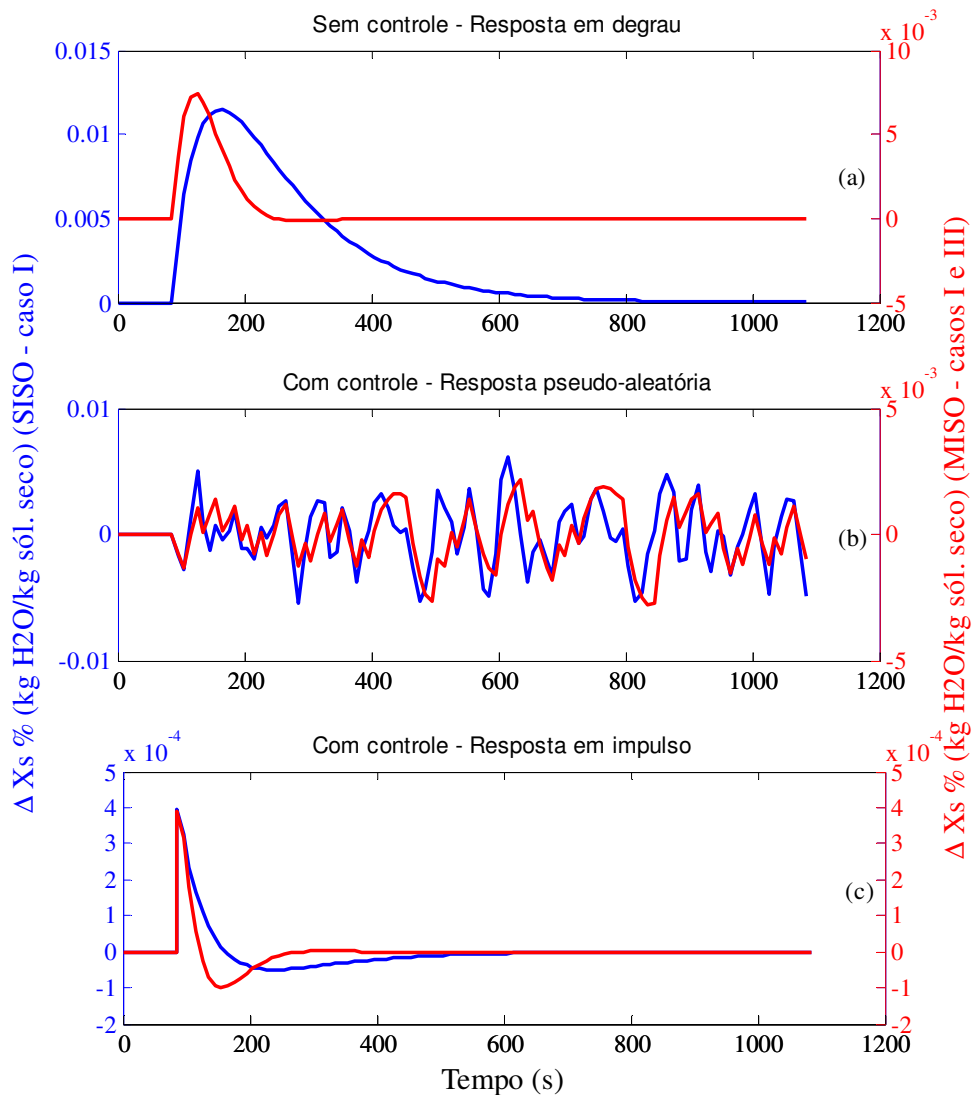


Figura 71. Curvas de resposta da umidade final do farelo de soja para os controles *PID SISO* - caso I e *MISO* - casos I e III

Na Figura 71 pode ser observado que o sistema com controle por realimentação *PID MISO* (em vermelho) apresenta menor amplitude de oscilação com o tempo que o *PID SISO* (em azul) para as perturbações em degrau e pseudo-aleatórias (gráficos (a) e (b)),

além de estabilizar em menor tempo que o *PID SISO* para as perturbações em degrau e impulso (gráficos (a) e (c)).

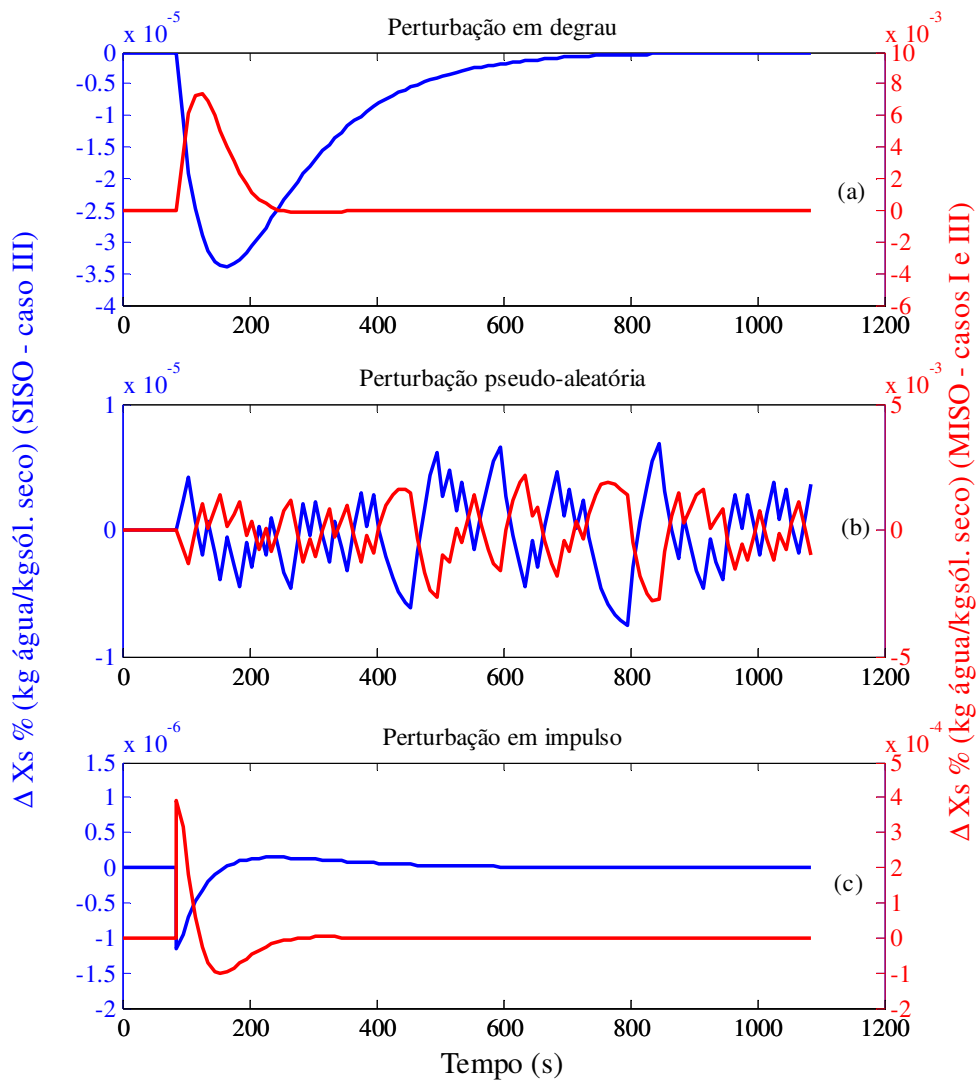


Figura 72. Curvas de resposta da unidade final do farelo de soja para os controles *PID SISO* – caso III e *PID MISO* – casos I e III

Na Figura 72 pode ser observado que o sistema com controle por realimentação *PID SISO* (em azul) apresenta menor amplitude de oscilação com o tempo que o *PID MISO* (em vermelho), além de atingir o estado estacionário em menor tempo, como pode ser observado nas perturbações em degrau e impulso (gráficos (a) e (c)).

4.3.4.4 Controles *PID SISO* e *MISO* para as melhores condições energéticas

Nas Figuras 73 a 81 são apresentadas as curvas de resposta dos controles *PID SISO* e *MISO* para as três condições de temperaturas do ar de secagem do secador rotativo direto de farelo com menor consumo de energia e os comprimentos ideais de secagem destacados na seção 4.2.3.

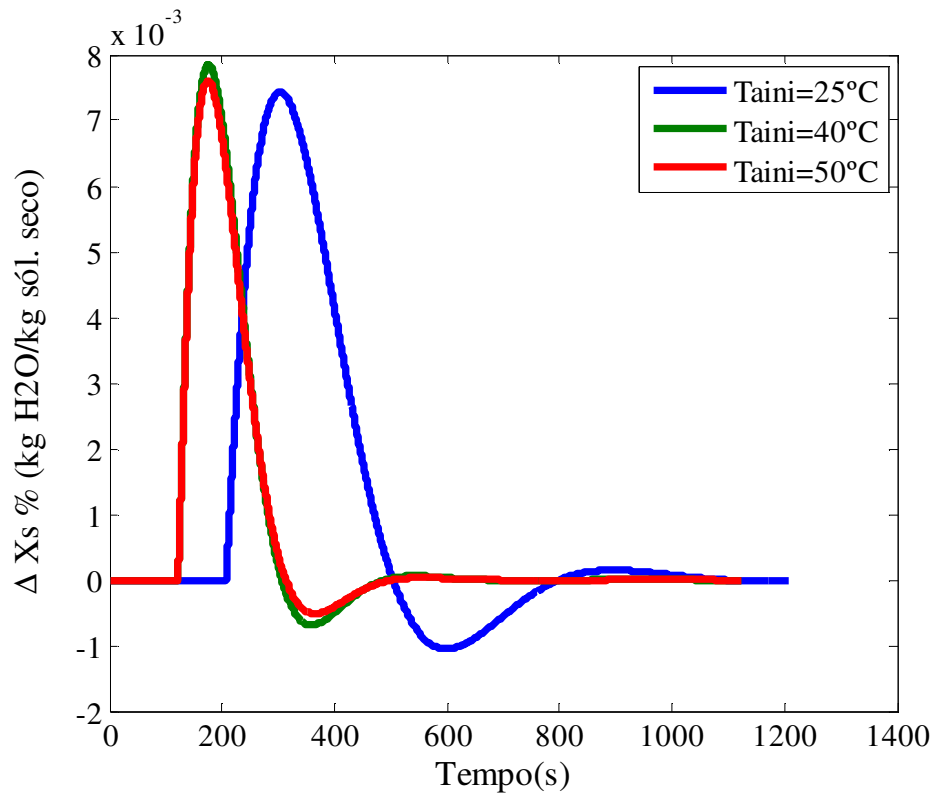


Figura 73. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles *PID SISO* – caso I nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

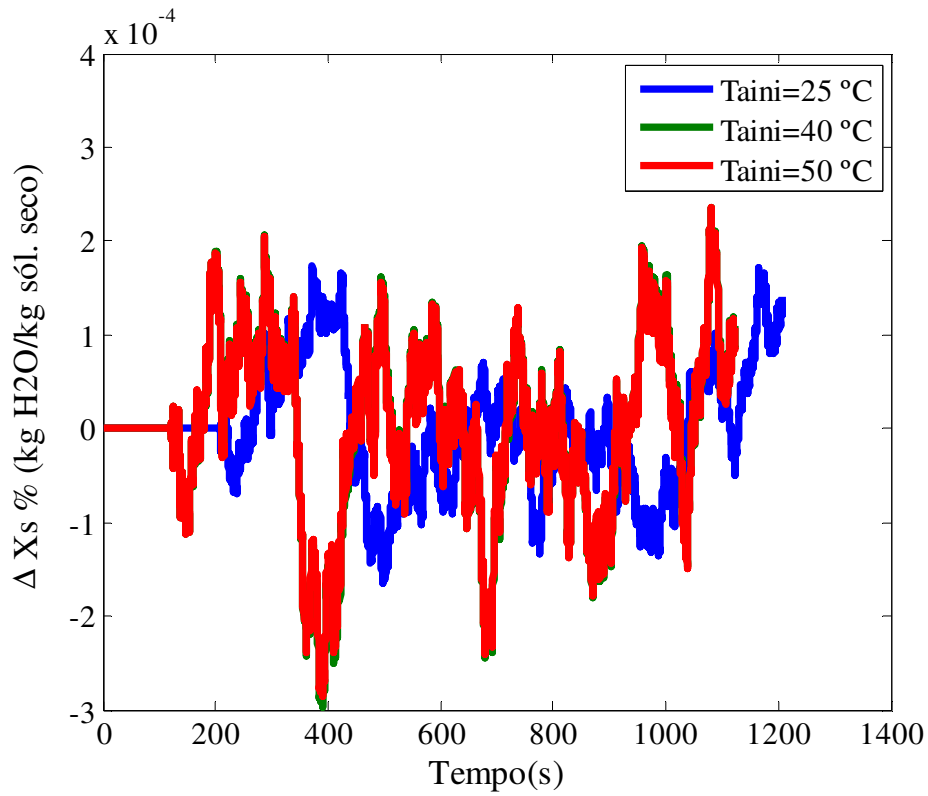


Figura 74. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles *PID SISO* – caso I nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

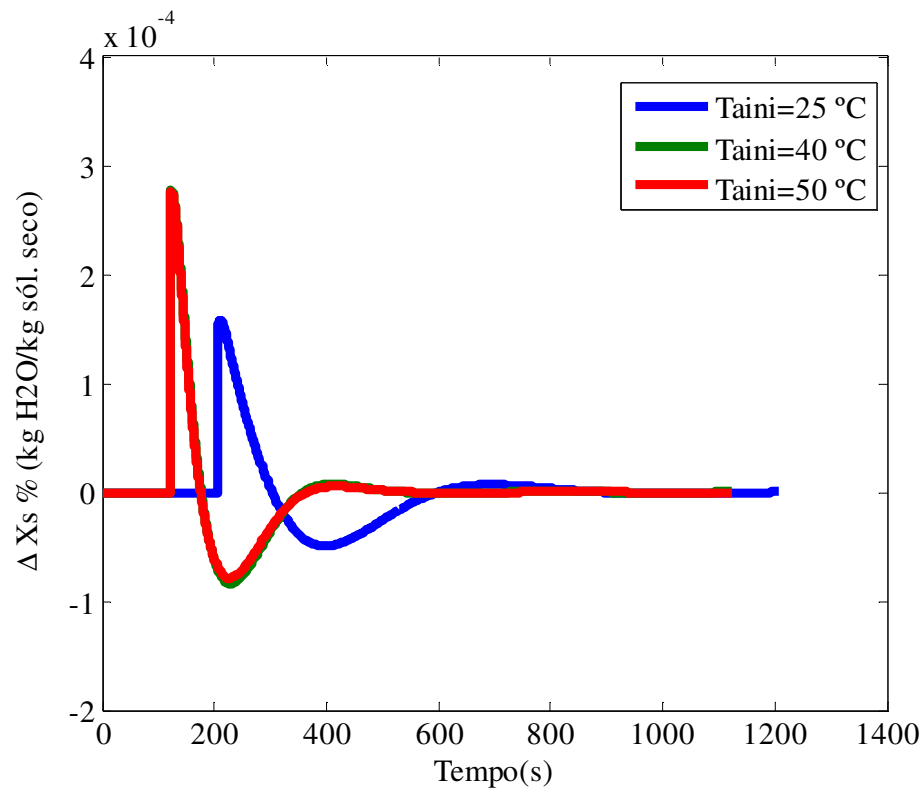


Figura 75. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles *PID SISO* – caso I nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

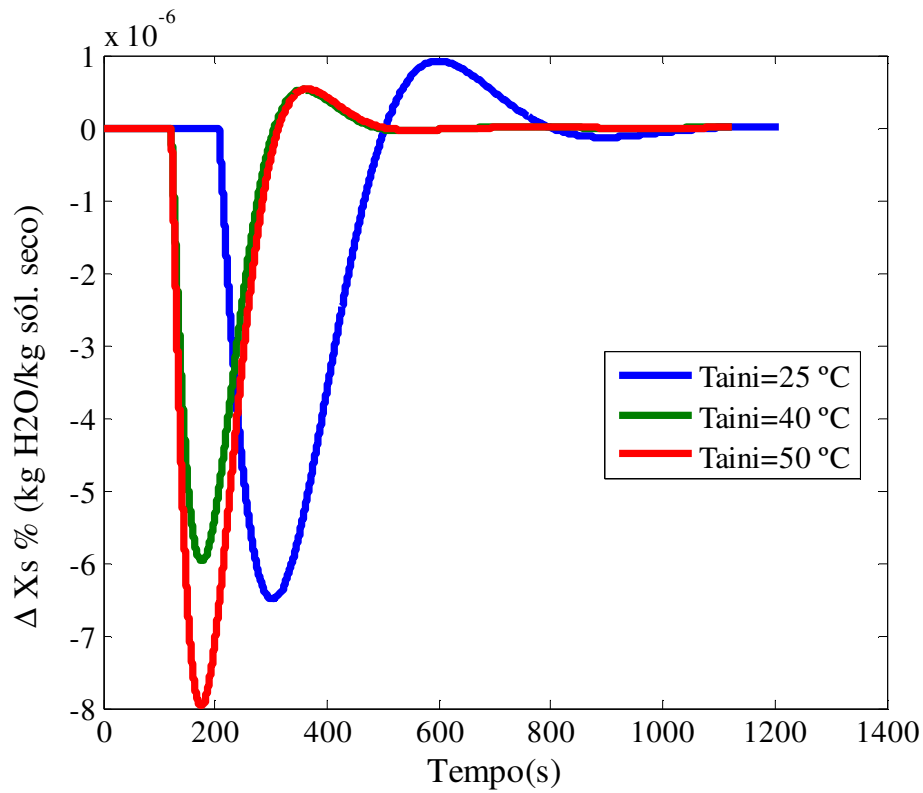


Figura 76. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles *PID SISO* – caso III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

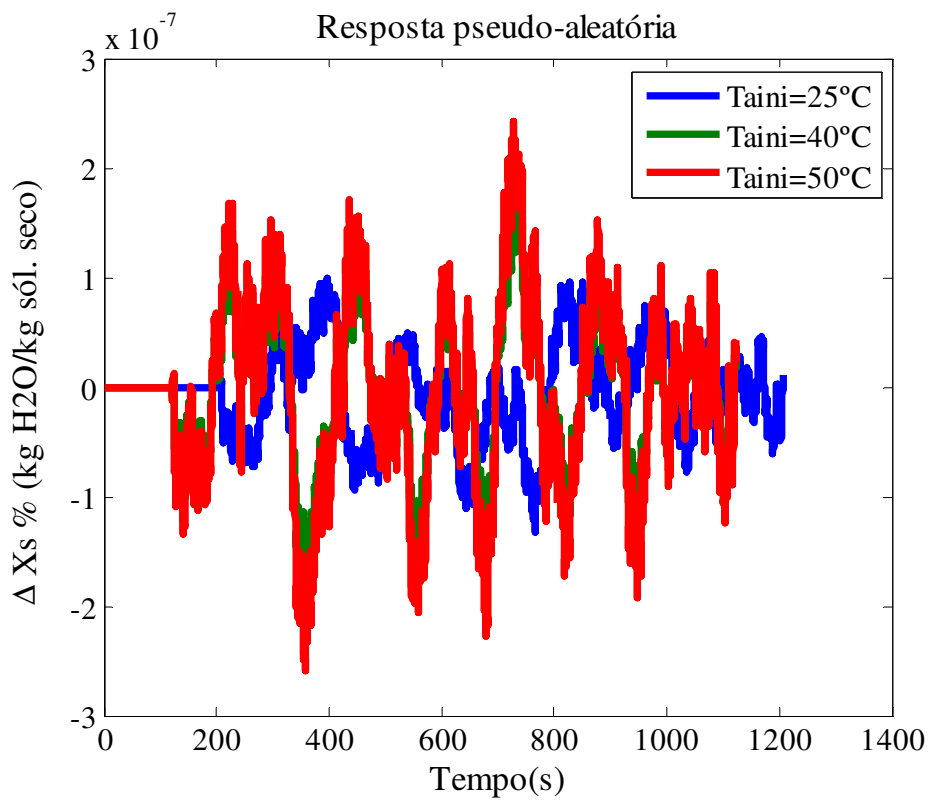


Figura 77. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles *PID SISO* – caso III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

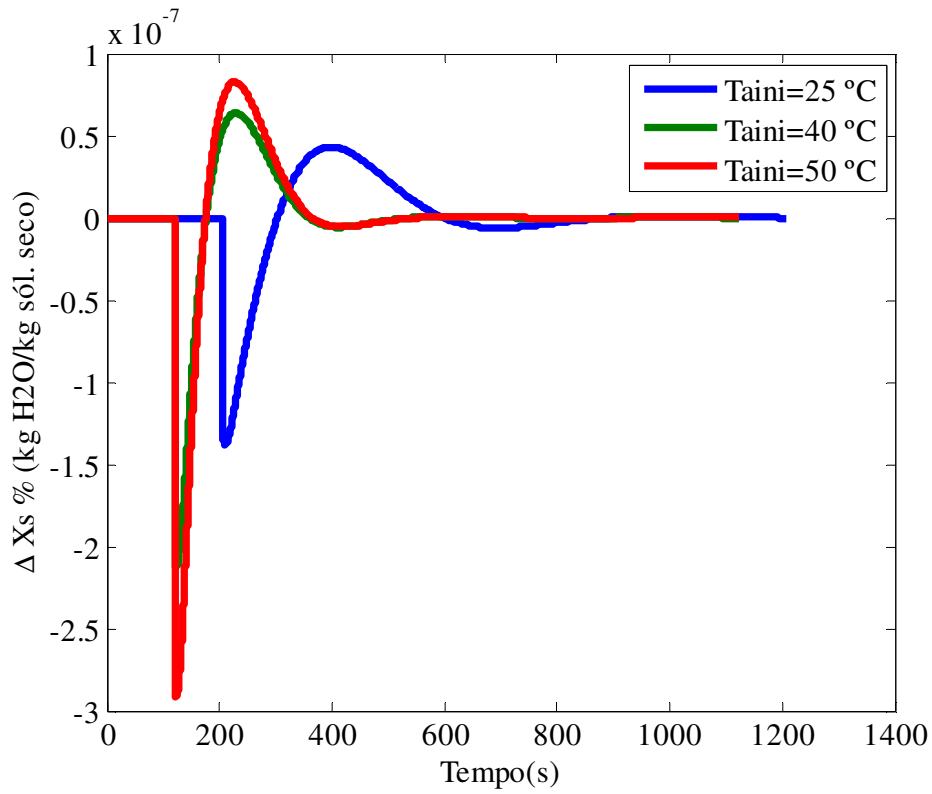


Figura 78. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles *PID SISO* – caso III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

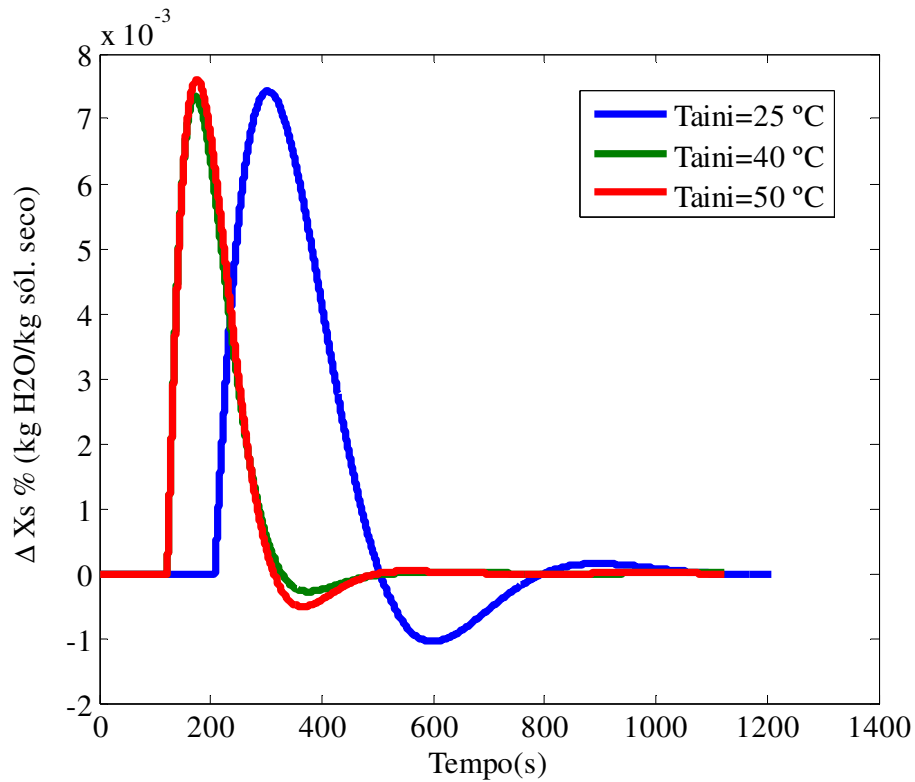


Figura 79. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em degrau para os controles *PID MISO* – casos I e III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

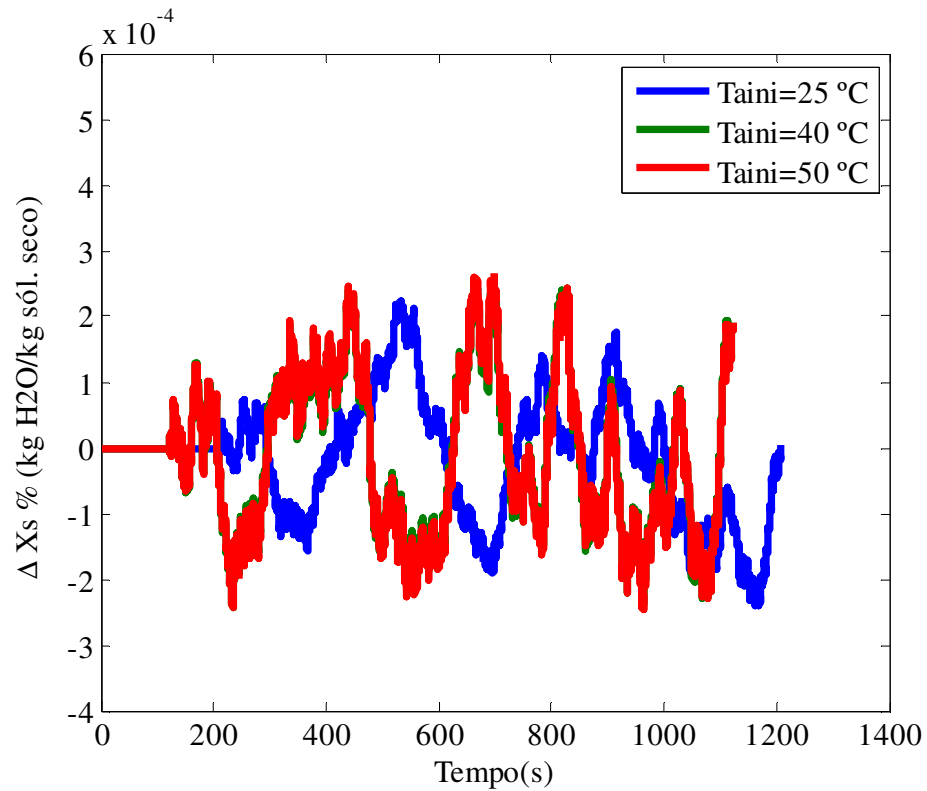


Figura 80. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo pseudo-aleatória para os controles *PID MISO* – casos I e III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

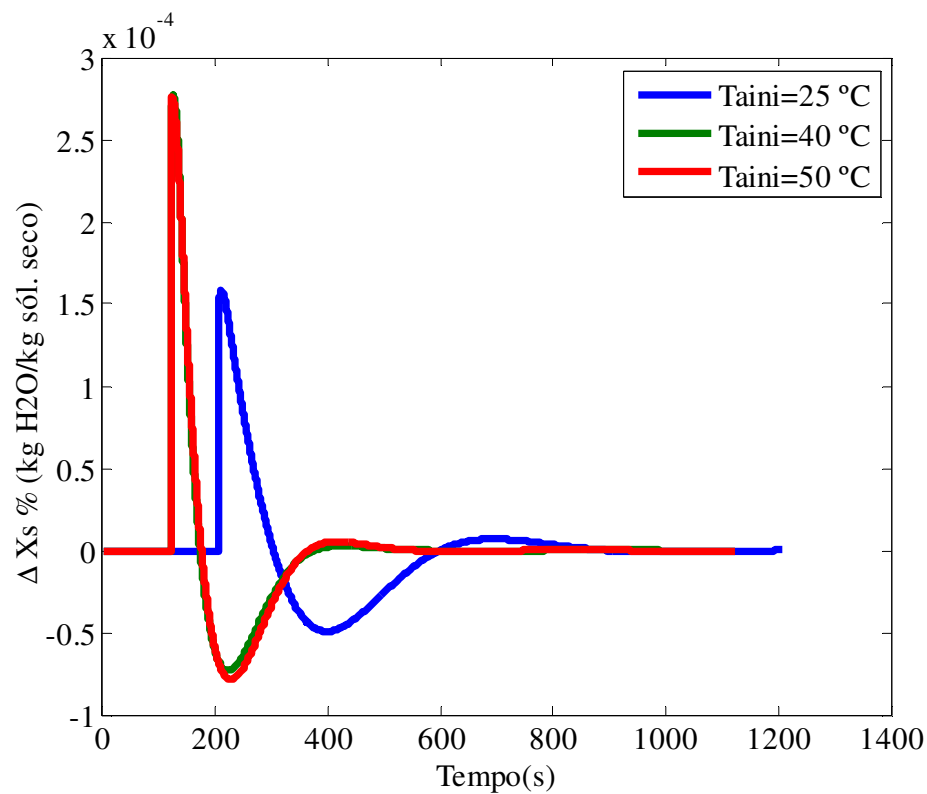


Figura 81. Curvas de resposta para perturbação na umidade de entrada do farelo em impulso para os controles *PID MISO* – casos I e III nas T_{aini} de 25, 40 e 50°C

Ao analisar as Figuras 77 a 85, verifica-se que as curvas de resposta de variação de umidade final do farelo de soja com o tempo nas temperaturas iniciais do ar (T_{aini}) de 25, 40 e 50°C apresentam os respectivos tempos de atraso de 207, 122 e 122 s. Essas diferenças de tempo de atraso na resposta estão relacionadas à utilização do comprimento ideal indicado para cada temperatura de secagem nas análises de avaliação energética (seção 4.2.3), tendo-se, então, 17 m na T_{aini} de 25°C, e 10 m nas T_{aini} de 40 e de 50°C. Simultaneamente, pode ser observado que as curvas de resposta nas T_{aini} de 40 e 50°C apresentam valores muito semelhantes entre si e menos oscilações com o tempo em relação a T_{aini} de 25°C, atingindo mais rapidamente o regime estacionário, de acordo com as Figuras 77, 79, 80, 82, 83 e 85 e, portanto, tem maior controlabilidade. Entretanto, tal fato não diminui a probabilidade de aplicação do controle a T_{aini} de 25°C, já que tratam-se de variações da umidade final do farelo extremamente pequenas, sendo esta condição favorável quando o fator preponderante na escolhas das condições de trabalho envolverem o consumo de energia.

Ainda pode ser observado nas Figuras 77 a 85, que apesar da grande semelhança entre os dados das curvas de resposta entre as T_{aini} de 40 e 50°C, provavelmente ocasionado pela grande proximidade entre os dados de entrada e de saída na aplicação do controle, a melhor controlabilidade é apresentada para temperaturas mais elevadas do ar de secagem.

Além da avaliação gráfica, os sistemas de controle *PID SISO* e *MISO* apresentados pelas Figuras 77 a 85 foram submetidos a análise de qualidade por meio do cálculo da Integral do Erro Quadrático (*ISE*), dada pela Equação 135. Os resultados das *ISEs* são apresentados na Tabela 11.

Tabela 16. Resultados das *ISEs* para diferentes temperaturas de vapor nos tubos

	Perturbação	Caso III	Caso IV	Caso V
		$T_{aini} = 25^{\circ}\text{C}$	$T_{aini} = 40^{\circ}\text{C}$	$T_{aini} = 50^{\circ}\text{C}$
Caso I - <i>SISO</i>	Degrau	$7,40 \cdot 10^{-6}$	$4,76 \cdot 10^{-6}$	$4,49 \cdot 10^{-6}$
Caso I - <i>SISO</i>	Pseudo-aleatória	$3,02 \cdot 10^{-9}$	$6,45 \cdot 10^{-9}$	$6,18 \cdot 10^{-9}$
Caso I - <i>SISO</i>	Impulso	$1,14 \cdot 10^{-9}$	$2,13 \cdot 10^{-9}$	$2,01 \cdot 10^{-9}$
Caso III - <i>SISO</i>	Degrau	$5,67 \cdot 10^{-12}$	$2,77 \cdot 10^{-12}$	$4,93 \cdot 10^{-12}$
Caso III - <i>SISO</i>	Pseudo-aleatória	$5,66 \cdot 10^{-15}$	$5,93 \cdot 10^{-15}$	$1,05 \cdot 10^{-14}$
Caso III - <i>SISO</i>	Impulso	$8,74 \cdot 10^{-16}$	$1,25 \cdot 10^{-15}$	$2,24 \cdot 10^{-15}$
Caso I e III - <i>MISO</i>	Degrau	$7,39 \cdot 10^{-6}$	$4,14 \cdot 10^{-6}$	$4,48 \cdot 10^{-6}$
Caso I e III - <i>MISO</i>	Pseudo-aleatória	$5,10 \cdot 10^{-9}$	$8,59 \cdot 10^{-9}$	$8,96 \cdot 10^{-9}$
Caso I e III - <i>MISO</i>	Impulso	$1,14 \cdot 10^{-9}$	$1,92 \cdot 10^{-9}$	$2,01 \cdot 10^{-9}$

Observa-se na Tabela 11 que de todos os casos analisados, as *ISEs* foram menores para o controle *PID SISO* – caso III, o qual se mostrou novamente ser o mais adequado no controle da secagem do farelo de soja, como já discutido na seção 4.2.4.3. Todavia, ao comparar as *ISEs* dentro dos mesmos casos, observa-se que estas são menores para a T_{aini} de 25°C na maioria destes, não correspondendo aos melhores casos com melhor controlabilidade discutidos nas Figuras 77 a 85. Tal fato ocorre em função do critério de controlabilidade estar definido em função do menor tempo de estabilização do sistema, e não da somatória dos desvios quadráticos do erro, como é definido a *ISE*. Esta consideração é possível já que tratam-se de variações de umidade final com grandezas muito pequenas, e acredita-se que certas alteração nas condições de operação de controle da secagem não afetariam as características do farelo significativamente.

4.4 CONCLUSÕES SOBRE O SECADOR ROTATIVO DIRETO

Os resultados apresentados neste capítulo sobre o secador rotativo direto de farelo de soja permitiram concluir que o modelo dinâmico proposto para o secador foi validado qualitativamente e pode ser utilizado na predição de umidade e temperatura de saída de farelo do secador e para a sintonia e análise de sistemas de controle. Já, na análise do consumo energético do secador para várias temperaturas de entrada do ar no secador, verificou-se que há uma região em que o consumo de energia é máximo, e o consumo mínimo encontra-se com a temperatura do ar de secagem. Na análise do controle do secador com o *PID SISO* e o *PID MISO*, teve destaque o *PID SISO* com manipulação da temperatura inicial do ar de secagem e perturbação da umidade inicial do farelo de soja no secador. Por fim, verificou-se que a melhor controlabilidade pelos *PID SISO* e *PID MISO* ocorre com temperatura inicial do ar de secagem mais elevadas.

CAPÍTULO V

5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

As principais conclusões obtidas neste trabalho para os secadores rotativos indireto e direto em termos de modelagem, simulação e controle e sugestões para trabalhos futuros são apresentadas a seguir.

5.1 SECADOR ROTATIVO INDIRETO

5.1.1 Solução Numérica e Validação do Modelo

- O modelo matemático regime transiente de parâmetros distribuídos, proposto para aplicação no sistema de controle do secador rotativo indireto de farelo de soja, foi modificado para parâmetros concentrados e esta simplificação foi compensada pela introdução de um retardo por transporte, isto é, o tempo que o volume de controle leva para percorrer o secador.
- Os perfis de umidade e temperatura finais simulados para a secagem do farelo apresentaram comportamento semelhante ao de outros materiais apresentados em literatura.
- O modelo matemático em regime transiente de parâmetros concentrados, com a introdução do retardo por transporte do volume de controle, proposto para a secagem do farelo de soja em secador indireto foi validado qualitativamente e pode ser utilizado na predição da umidade final do farelo de soja, bem como na sintonia e análise de controladores de processo.

5.1.2 Influência das Condições Operacionais

- As simulações realizadas para verificar a influência das condições operacionais sobre os perfis de umidade e temperaturas finais do farelo de soja mostraram que as variáveis que alteraram significativamente estes perfis foram a temperatura do vapor de aquecimento, a velocidade de deslocamento do farelo no secador e a umidade inicial do farelo. Portanto, essas são as variáveis que devem ser priorizadas no projeto e aplicação de sistemas de controle.

5.1.3 Avaliação Energética do Secador

- Na análise do consumo energético na secagem do farelo no secador rotativo indireto apresentou, na faixa de condições exploradas, a existência de uma condição operacional bem definida para o mínimo consumo de energia.
- Na análise do consumo energético somente da secagem, foram obtidos valores que variaram entre 4,7 e 20,1 MW, para os pontos de menor e maior consumo, dados pelas respectivas temperaturas do vapor nos tubos (T_{vt}) de 101 e 121°C.
- Na análise do consumo energético da secagem, considerando a elevação da temperatura da água até a temperatura de secagem nos tubos, foram obtidos valores que variaram entre 8,49 e 37 MW, para os pontos de menor e maior consumo, dados pelas respectivas temperaturas do vapor nos tubos de 101 e 121°C.
- A comparação entre as formas de análise dos consumos energéticos mostra uma elevação de até 49% dos resultados obtidos, quando a temperatura da água é elevada até a temperatura de secagem nos tubos em relação a consumida na secagem. Tais fatores ressaltam o quão é necessária a otimização do processo, a qual pode ser realizada utilizando-se as melhores condições de operação e sistemas de controle bem sintonizados.

5.1.4 Controle *PID* para o Secador

- Tanto o controle *PID SISO* quanto o *PID MISO* atuaram satisfatoriamente frente as perturbações na umidade inicial do farelo ou na velocidade de deslocamento do farelo no secador, o que comprova que esta estratégia pode ser aplicada no controle da umidade final do farelo neste secador.
- Entre os tipos de estrutura analisadas no controle *PID*, o *SISO* com perturbação na umidade inicial do farelo e manipulação da temperatura do vapor nos tubos e o *SISO* com perturbação na velocidade de deslocamento do farelo e manipulação da temperatura do vapor nos tubos, foram os que apresentaram as menores amplitudes de oscilação nas curvas de resposta. Tal fato é confirmado graficamente e pelo menor valor das *ISEs*.
- O modelo dinâmico proposto para a secagem do farelo de soja em secador indireto foi validado juntamente com a ação do controle *PID SISO*, com perturbação na umidade inicial do farelo e manipulação da temperatura do vapor nos tubos, e pode ser utilizado no controle da umidade final do farelo no secador rotativo indireto.

- A avaliação dos controles *PID SISO* e *MISO* para as melhores condições energéticas mostra que ocorre a melhor controlabilidade nas temperaturas de vapor nos tubos mais elevadas.

5.2 SECADOR ROTATIVO DIRETO

5.2.1 Solução Numérica do Modelo

- O modelo matemático regime transiente de parâmetros distribuídos, proposto para aplicação no sistema de controle do secador rotativo direto de farelo de soja, também foi modificado para parâmetros concentrados e esta simplificação também foi compensada pela introdução de um retardo por transporte, isto é, o tempo que o volume de controle leva para percorrer os secadores.
- Os perfis de umidade e temperatura finais simulados para a secagem do farelo apresentaram comportamento semelhante ao de outros materiais apresentados na literatura.
- O modelo matemático em regime transiente de parâmetros concentrados, com a introdução do retardo por transporte do volume de controle, proposto para o secador direto está validado qualitativamente e pode ser utilizado na predição da umidade final do farelo de soja, bem como na sintonia e análise de controladores de processo. Além disso, de acordo com os estudos realizados neste trabalho, sua utilização apresenta muitas vantagens.

5.2.2 Influência das Condições Operacionais

- As simulações realizadas para verificar a influência das condições operacionais sobre os perfis de umidade e temperaturas finais do farelo de soja mostraram que as variáveis que alteraram significativamente estes perfis foram a temperatura do ar de aquecimento do produto, a velocidade de deslocamento do farelo no secador e a umidade inicial do farelo no equipamento. Portanto, essas são as variáveis que merecem maior atenção no projeto e aplicação de sistemas de controle.

5.2.3 Avaliação Energética do Secador

- O consumo energético na secagem do farelo no secador rotativo direto apresentou, na faixa de condições exploradas, uma região em que o consumo é máximo.

- Na análise do consumo energético na secagem foram obtidos valores que variaram entre 0 e 5,66 MW, para os pontos de menor e maior consumo, dados pelas respectivas temperaturas do ar de secagem de 25 e 80°C.
- Os valores de consumo foram obtidos, para cada temperatura do ar de secagem, com comprimentos diferentes do secador, sendo necessários menores comprimentos a medida que a temperatura do ar de secagem aumenta.

5.2.4 Controle *PID* para o Secador

- Tanto o controle *PID SISO* quanto o *PID MISO* atuaram satisfatoriamente frente as perturbações na umidade inicial do farelo ou na velocidade de deslocamento no secador, o que comprova que esta estratégia pode ser aplicada no controle da umidade final do farelo neste secador.
- Entre os tipos de estrutura de controle *PID* analisados, o *SISO* com perturbação na umidade inicial do farelo e manipulação da temperatura do ar de secagem e o *SISO* com perturbação na velocidade de deslocamento do farelo e manipulação da temperatura do ar de secagem, foram os que apresentaram as menores amplitudes de oscilação nas curvas de resposta. Tal fato é confirmado graficamente e pelo menor valor das *ISEs*.
- A avaliação dos controles *PID SISO* e *MISO* para as melhores condições energéticas revela que ocorre a melhor controlabilidade para as temperaturas do ar de secagem mais elevadas.

5.3 SECADOR ROTATIVO INDIRETO X SECADOR ROTATIVO DIRETO

Os estudos realizados anteriormente sobre o desempenho energético e a aplicação de estratégias de controle aos secadores rotativos indireto e direto na secagem do farelo de soja tinham, como principal finalidade, mostrar que este processo pode ser bem sucedido com a utilização do secador rotativo direto. Assim, ao comparar os resultados dos dois secadores foi possível observar que:

5.3.1 Avaliação Energética do Secador

- O secador rotativo direto apresenta maior economia de energia, mesmo quando a temperatura do ar ambiente precisa ser elevada até a temperatura de secagem, sendo esta economia de energia de até 74% em relação ao secador indireto para as condições de operação mostradas nas Tabelas 5, 6 e 12, cujos resultados são mostrados nas Figuras 38 e 66. A economia no consumo energético pode ser maiores ainda se a temperatura do ar de secagem for ambiente ou próximas a este valor, desde que as umidades relativas do ar sejam baixas.
- O secador rotativo direto pode ser projetado para comprimentos menores que 17 m se as temperaturas do ar de secagem forem acima de 40°C, o que implica em menores custos de produção, projeto e manutenção, além de ocupar uma menor área industrial.

5.3.2 Controle *PID* para o Secador

- A aplicação de estratégias de controle *PID* no secador rotativo apresenta menor amplitude de oscilações menos oscilações com o tempo para as variáveis analisadas e menor tempo de estabilização do processo.

5.4 CONCLUSÕES GERAIS

- A secagem do farelo de soja pela forma direta apresenta melhor desempenho energético e melhor controlabilidade.

5.5 SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para o aperfeiçoamento do trabalho desenvolvido sobre a secagem do farelo de soja em secadores rotativos direto e indireto, em termos de consumo de energia e aplicação do controle *PID*, sugere-se:

- Obter valores do coeficiente de transferência de massa entre o farelo e o ar (K) para temperaturas do ar de 25 a 50°C, como os apresentados na secção 2.1.2.2;
- Analisar o consumo de energia do secador rotativo indireto aplicando o comprimento do secador em que se atinge a umidade final do farelo de soja de 0,14 (b.s.).
- Analisar a secagem de farelo de soja com secador rotativo direto com fluxo contracorrente;
- Avaliar a aplicação do controle *PID SISO* e *MISO* com o SCILAB[®] e XCOS.

CAPÍTULO VI

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABIOVE – Associação Brasileira das Indústrias de Óleos Vegetais. Complexo Soja - Balanço Oferta / Demanda. Disponível em <http://www.abiove.com.br/balanco_br.html>. Acesso em 20 de novembro de 2009.
- BROOKER, D.B., BAKKER-ARKEMA, F.W., HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport: The AVI Publishing Company, 1992.
- ACASIO, U. A. Handling and storage of soybeans and soybean meal. Disponível em <<http://www.asa-europe.org/pdf/handlingsb.pdf>>. Acesso em 10 nov. 2004.
- ARJONA, R., OLLERO, P., VIDAL, B. F. Automation of an olive waste industrial rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, v. 68, p. 239–247, 2005.
- ARRUDA, E. B. *Comparação do desempenho do secador roto-fluidizado com o secador rotatório convencional: secagem de fertilizantes*. 2008. Tese (Doutorado), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-PR.
- ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. The future of *PID* control. *Control Engineering Practice*, v. 9, p. 1163–1175, 2001.
- BALCHEN, J. G., MUMMÉ, K. I. Process control. Structures and Applications. New York: Van Nostrand Reinhold Book Company, 1988.
- BANDYOPADHYAY, R., CHAKRABORTY, U. K., PATRANABIS, D. Autotuning a *PID* controller: a fuzzy-genetic approach. *Journal of Systems Architecture*, v. 47, p. 663-673, 2001.
- BARROZO, M. A. S., SARTORI, D. J. M., FREIRE, J. T. Transferência de calor e de massa em leito deslizante e escoamentos cruzados. Secagem de sementes de soja. In: FREIRE, J. T. e SILVEIRA, A. M. Tópicos especiais em sistemas particulados. São Carlos: UFSCar, cap. 4, p. 119-159, 1998.
- BARROZO, M. A. S., OLIVEIRA, D. T., SANCINETI, G. P., RODRIGUES, M. V. A study of the desorption isotherms of lentils. *Brazilian Journal of Chemical Engineering*, v. 17, p. 105–109, 2000.
- BARR-ROSIN. Rotary Dryer. Disponível em <<http://www.barr-rosin.com/products/rotary-dryer.asp>>. Acesso em 11 de março de 2006.

- BERTO, M. I., SÁ, F. R., SILVEIRA JR., V. Avaliação de controles *PID* adaptativos para um sistema de aquecimento resistivo de água. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, v. 24, n. 3, p. 478-485, 2004.
- BEQUETTE, B.W. Process Control. Modeling, Design and Simulation. New Jersey: Prentice-Hall, 2003.
- BEST PRACTICE MANUAL – DRYERS. Disponível em <<http://www.energymanagertraining.com/CodesandManualsCD-5Dec%2006/BEST%20PRACTICE%20MANUAL%20-%20DRYERS.pdf>>. Acesso em 27 de agosto de 2007.
- BROOKER, D. B., BAKKER-ARKEMA, F. W., HALL, C.W. Drying and storage of grains and oilseeds. Westport, CN, USA, The AVI Publishing Company, 1992.
- COELHO, A. A. R. Identificação e Controle Adaptativo. DAS/UFSC. Disponível em <http://www.das.ufsc.br/~aarc/ensino/especializacao/ICA_WEG/Iden_Cap_1.pdf>. Acesso em 12 de junho de 2007.
- CORRIOU, J. P. Process control, theory and application. London: Springer, 2004.
- COUGHANOWR, D.R., LOWELL, B.K. Análise e Controle de Processos. Rio de Janeiro: Guanabara, 1986.
- COULSON, J. M., RICHARDSON, J. F. Tecnologia Química: Operações Unitárias. 2. ed. Vol. 2. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkian, 1968.
- COURTOIS, F., TRYSTAM, G. Study and control of the dynamics of drying processes. In: J.J. BIMBENET, E. DUMOULIN, G. TRYSTAM (Eds.), *ACoFoP*, 289-296, 1994.
- CUTLIP, M. B., SHACHAN, M. Problem solving in chemical engineering with numerical methods. New Jersey: Prentice Hall PTR, 1999.
- DIDRIKSEN, H. Model based predictive control of a rotary dryer. *Chemical Engineering Journal*, v. 86, p. 53-60, 2002.
- DOUGLAS, P. L., KWADE, A., LEE, P. L., MALLICK, S. K. Simulation of a Rotary Dryer for Sugar Crystalline. *Drying Technology*, n. 11, v. 1, p. 129 – 155, 1993.
- FERNANDES JR., F. G., LOPES, J. S. B., MAITELLI, A. L., ARAÚJO, F. M. U., OLIVEIRA, L. A. H. G. Implementação de controladores *PID* utilizando lógica fuzzy e instrumentação industrial. In *Anais do VII Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente*, São Luís, setembro de 2005. Disponível em ftp://users.dca.ufrn.br/artigos/2005/sbai2005_03.pdf. Acesso em 10 de junho de 2008.

- FOUST, A., WENZLE, L. A., CLUMP, C. W., MAUS, L., BRYCE, A. L. Transferência simultânea de calor e de massa. In *Princípio das operações unitárias*. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S.A., 1982. Cap. 18, p. 403-432.
- FRIEDMAN, S.J., MARSHALL, W.R. Studies in Rotary Drying. *Chemical Engineering Progress*, v. 45, p. 482-573, 1949.
- GEANKOPLIS, C.J. Drying of Process Materials. Transport processes and unit operations. 3. ed. New Jersey: Prentice-Hall, 1993. Cap. 9, p. 520-583.
- GONG, Z. X., MUJUMDAR, A. S. Software for Design and Analysis of Drying Systems. *Drying Technology*, v. 26, p. 884-894, 2008.
- HENDERSON, S.M., PERRY, M.E. Size Reduction. In *Agricultural Process Engineering*. 3. ed. Westport: The AVI Publishing, 1976.
- HIMMELBLAU, D.M. Engenharia Química: Princípios e Cálculos. Rio de Janeiro: Prentice-Hall do Brasil Ltda, 1998.
- IGUAZ, A., ESNOZ, A., MARTÍNEZ, G., LÓPEZ, A., VÍRSEDA, P. Mathematical modeling and simulation for the drying of vegetable wholesale by-products in a rotary dryer. *Journal of Food Engineering*, v. 59, p. 151 – 160, 2003.
- Industrial Steam System Process-Control Schemes. Disponível em <<http://www1.eere.energy.gov/industry/bestpractices/pdfs/processcontrol.pdf>>. Acesso em 13 de março de 2007.
- JONGENELEN, H. P. J. Energy conservation in solvent extraction plants. *Journal of the American Oil Chemists Society*, v.53, June, p. 291, 1976.
- JOVER, C., ALASTRUEY, C. F. Multivariable control for an industrial rotary dryer. *Food Control*, v.17, p. 653-659, 2006.
- JUMAH, R.Y., MUJUMDAR, A. S., RAGHAVAN, V.G.S. Control of industrial dryers. In: MUJUMDAR A.S., *Handbook of industrial drying*. New York, Marcel Dekker, Inc., 1995. Cap. 49, p. 1161-1179.
- KEMPER, G.T. Minimização da perda de solvente. *Grãos e Óleos*, p. 22, setembro/outubro, 1998.
- LIPTÁK, B. G. Optimization Industrial: Unit Processes. Flórida: URC Press, 1998.
- LIPTÁK, B. G. Instrument Engineers' Handbook: Process Control and Optimization. 4. ed. Vol.2. Connecticut: Liptak Associates, 2005.
- LUZ, G. R. *Modelagem Matemática e Análise do Secador Rotativo de Farelo de Soja*. 2006. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Maringá, Maringá-PR.

- LUZ, G. R., SOUZA, L. H. C. D., JORGE, L. M. M., PARAÍSO, P. R. Estudo das Isotermas de Equilíbrio do Farelo de Soja. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, SP, v. 26, n. 2, p. 408-413, 2006a.
- LUZ, G. R., ANDRADE, C. M. G., JORGE, L. M. M., PARAÍSO, P. R. Análise energética da secagem de farelo de soja em secador rotativo indireto. *Acta Scientiarum. Technology*, Maringá, PR, v. 28, n. 2, p. 173-180, July/Dec, 2006b.
- LUZ, G. R., PARAÍSO, P. R., JORGE, L. M. M., ANDRADE, C. M. G. Modeling and Energetic Analysis of Soybean Meal Drying in the Indirect Rotary Dryer. *Chemical Product and Process Modeling*, v. 4, n. 1, Article 8, 2009a.
- LUZ, G. R., PEREIRA, N. C. JORGE, L. M. M.; ANDRADE, C.M.G.; PARAÍSO, P.R., 2009b. Mass Transfer Coefficient in Soybean Meal Drying. *Brazilian Journal of Food Technology* vol. 12. n. 2, p. 92-96, 2009b.
- LUZ, G.R., LUCARELLO, V.R., JORGE, L.M.M., PARAÍSO, P.R. Investigação do coeficiente de transferência de calor em um secador rotativo de farelo de soja. *In Anais X do VIII Congresso Brasileiro de Engenharia Química em Iniciação Científica*, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 27-30 de julho de 2009. (CD-Rom).
- LUYBEN, W. L. Simple method for tuning *SISO* controllers in multivariable systems. *Industrial Engineering Chemical Process Design and Development*, v.25, p.654 - 660, 1986.
- LUYBEN, W. L., LUYBEN, M.L. *Essentials of Process Control*. New York: McGraw-Hill, 1997.
- MAEDA, M., MURAKAMI, S. A self-tuning fuzzy controller. *Fuzzy Sets and Systems*, v. 51, p. 29-40, 1992.
- MARIN, F.B., ANGELOCCI, L.B., COELHO FILHO, M.A., VILLA NOVA, N.A. Construção e avaliação de psicrômetro aspirado de termopar. *Scientia Agricola*, v. 58, n. 4, p. 839–844. 496, 2001.
- MIGUEL, H. Aumenta a produção de soja no Paraná. Disponível em: <<http://www.parana-online.com.br/editoria/economia/news/407883/?noticia=AUMENTA+A+PRODUCAO+D+E+SOJA+NO+PARANA>>. Acesso em 20 de novembro de 2009.
- MINISTÉRIO DA AGRICULTURA PARA VEGETAIS. Norma de Identidade, Qualidade, Embalagem, Marcação e Apresentação do Farelo de Soja, 2005. Disponível em <http://www.engetcno.com.br/pic_farelo_soja.htm> . Acesso em 15 de novembro de 2005.
- MUJUMDAR, A. S. *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1987. Cap. 1, 2 e 3, p. 1-129,

- MUJUMDAR, A. S. Principles, Classification and Selection of Dryers. In: MUJUMDAR, A.S., Handbook of industrial drying. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. Cap. 1, p. 30-58.
- NONHEBEL, G., MOSS, A. A .H. Drying of solids in the chemical industry. London: Butterworths, 1971.
- OGATA, K. Engenharia de controle moderno. 3. ed. Rio de Janeiro: Prentice-Hall, 1998.
- OLIVEIRA, A. L. L., FIGUEIREDO NETO, E., CARDOSO, R. S., TRAZZI, R. M., DIAS, F. T. R., OLIVEIRA, W. Instrumentação, Fundamentos de Controle de Processos. Apostila SENAI (Espírito Santo) - CST, 1999. Disponível em <<http://www.scribd.com/doc/3970272/control-pdf>>. Acesso em 15 de dezembro de 2009.
- ORTEGA, M. G., CASTAÑO, F., VARGAS, M., RUBIO, F. R. Multivariable robust control of a rotary dryer: Analysis and design. *Control Engineering Practice*, v. 15, p. 487-500, 2007.
- PANAGOPOULOS, H., ÅSTRÖM, K. J., HÄGGLUND, T. Design of PI controllers based on Non-Convex Optimization. *Automática*, v. 34, n. 5, p. 585–601, 1998.
- PARAÍSO, P. R., ANDRADE, C.M.G., ZEMP, R. J. Análise energética do processo de obtenção do óleo de soja. *Revista Tecnológica*, n. 11, p. 25–36, 2002.
- PARAÍSO, P. R., ANDRADE, C. M. G., PEREIRA, N. C. Modelagem e Simulação de um secador industrial de farelo de soja. In *Anais do XVI – Congresso Brasileiro de Engenharia Química*, Curitiba, 2004a. (CD-Rom).
- PARAÍSO, P. R., ANDRADE, C. M. G., CURVELO, N. P. Análise energética preliminar da secagem industrial de farelo de soja. *Acta Scientiarum. Technology*, v.26, n. 2, p. 91–95, 2004b.
- PARAÍSO, P. R., ANDRADE, C. M. G., ZEMP, R. J. Destilação da Miscela II: modelagem e simulação do *stripping* do hexano¹. *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, Campinas, 25(1), p. 37–44, jan.–mar, 2005.
- PELEGRINA, A. H., ELUSTONDO, M. P., URBICAIN, M. J. Rotary Semi-continuous Drier for Vegetables - Effect of Air Recycling. *Journal of food engineering*, v.41, n.3-4, p.215 – 219, 1999.
- PÉREZ-CORREA J. R., CUBILLOS F., ZAVALA E., SHENE C., ÁLVAREZ P.I. Dynamic simulation and control of direct rotary dryers. *Food Control*, v. 9, n. 4, p. 195-203, 1998.

- PERRY, R. H., CHILTON, C. H. Manual de engenharia química. 5. ed. Traduzido por Horácio Macedo, Luiza M. Barbosa e Paulo E. F. Barbosa. Rio de Janeiro: Guanabara Dois S. A., 1980. Cap. 20, p. 3-62.
- PERRY, R. H., CHILTON, C. H. Chemical Engineers' Handbook. 5th ed. New York: McGraw-Hill, 1973.
- PERRY, R. H., GREEN, D. W., MALONEY, J. O. Perry's Chemical engineers handbook. 7. ed. Maidenhead: McGraw-Hill, 1997. Cap. 12.
- PIXTON, S.W., Warburton, S. The moisture content/equilibrium relative humidity relationship of soya meal. *Journal of Stored Products Research*, v. 11, n. 3-4, p. 249-251, 1975.
- RAMIREZ, W.F. Computational Methods for Process Simulation. 2nd Ed. Oxford: Linacre House, 1997.
- RASTIKIAN, K., CAPART, R., BENCHIMOL, J. Modeling of sugar drying in a countercurrent cascading rotary dryer from stationary profiles of temperature and moisture. *Journal of Food Engineering*, v. 41, p. 193-201, 1999.
- ROOT, W.L. Indirect drying of solids. *Chemical Engineering*, v. 3, p. 52-64, May, 1983.
- SARTORI, A. E. R. *Modelagem, simulação e controle de um secador rotativo industrial*. 2001. Dissertação (Mestrado), Universidade Estadual de Maringá, Maringá - PR.
- SAVARESI, S., BITMEAD, R., PEIRCE, R. On modelling and control of a rotary dryer. *Control Engineering Practice*, n. 9, p. 249 – 266, 2001.
- SCHUMACHER, H. Ultimate energy possibilities in conventional solvent extraction. *Journal of the American Oil Chemists Society*, v. 62, n. 2, p. 369, February, 1983.
- SEBORG, D. E., EDGAR, T. F., MELLICHAMP, D. A. Process Dynamics and Control. New York: John Wiley and Sons, 1989.
- SEBORG, D. E., EDGAR, T. F., MELLICHAMP, D. A. Process Dynamics and Control. 2nd ed. New York: John Wiley and Sons, 2004.
- SHAW, I. S., SIMÕES, M. G. Controle e modelagem fuzzy. 1. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1999.
- SHENE, C., BRAVO, S. Mathematical Modeling of Indirect Contact Rotary Dryers. *Drying Technology*, v.16, n.8, p. 1567 – 1583, 1998.
- SILVA, G. F., PARAÍSO, P. R., PEREIRA, N. C., ANDRADE, C. M. G. Ajuste das isotermas de equilíbrio do farelo de soja. In Anais do XXXI Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados (ENEMP), Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia – MG, 2004.

- SILVA, F. T. *Simulated annealing aplicado ao problema de sintonia de parâmetros de controladores PID*. 2005. Monografia de graduação em Eng. de Controle e Automação, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto – MG.
- SMITH, R. *Chemical Process: Design and Integration*. England: John Wiley and Sons, 2005.
- STRUMILLO, C., JONES, P. L., ZILLA, R. Energy Aspects in Drying. In: Mujumdar A.S., *Handbook of industrial drying*. New York: Marcel Dekker, Inc., 1995. Cap. 46, p. 1079-1080.
- STRUMILLO, C., KUDRA, T. *Drying: principles, applications and design*. Topics in chemical engineering. Vol.3. Switzerland: Gordon and breach science publishers, 1986.
- SUN, Y. PANTELIDES, C. C., CHALABI, Z. C. Mathematical modelling and simulation of near-ambient grain drying. *Computers and Electronics in Agriculture*, v.13, n. 3, p. 243-271, 1995.
- TSOURVELOUDIS, N. C, KIRALAKIS, L. Modeling and Optimization of Olive Stone Drying process. *WSEAS International MultiConference*, Novembro, p. 2-4, 2005.
- TREYBAL, R. E. *Mass Transfer Operations*. 3rd ed. Tokyo, Japan, McGraw-Hill, 1980. Cap. 12, p. 655-716.
- VAN BOXTEL, A., KNOL, L. A preliminary study on strategies for optimal fluid-bed drying. *Drying Technology*, v. 14, n. 3-4, p. 481-501, 1996.
- VELOSO, G. O. *Modelagem Física e Matemática dos Processos de Extração do Óleo de Soja em Fluxos Contracorrentes Cruzados*. 2003. Tese (Doutorado), Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre-RS.
- VOGEL, E. F. Plantwide Process Control Simulation. In: Luyben, W. L. (Ed.), *Practical Distillation Control*. New York: Van Nostrand Reinold, 1992. Cap. 6, p. 86-95.
- ZAVALA, E., MOYA, A. *Simulación Dinámica y Control de un Secador Rotatorio Piloto de Contacto Directo*. Memoria de Título (in spanish), Dpto. Ing. Química USACH, Santiago, Chile, 1994.
- ZHUANG, M., ATHERTON, D. P. Automatic tuning of optimum *PID* controllers. *IEE Proceedings D*, v. 140, n. 3, 1993.
- YLINIEMI, L. *Advanced control of a rotary dryer*. 1999. Tese (Doutorado), Universidade de Oulu, Oulu, Finlândia. Disponível em <<http://herkules.oulu.fi/isbn9514252810>>. Acesso em 11 de outubro de 2005.
- YOANNOU, P., SUN, J. *Robust Adaptive Control*. 1996. Disponível em <http://www-rcf.usc.edu/~ioannou/Robust_Adaptive_Control.htm>. Acesso em 25 de junho de 2007.

WELTY, J. M., WICKS, C. E., WILSON, R. E., RORRER, G. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer. 4th ed. USA: John Wiley & Sons. Inc., 2001.

WILLIS, M. J. Proportional – Integral – Derivative Control.1999. Disponível em <http://lorien.ncl.ac.uk/ming/PID/PID.pdf>. Acesso em 31 de jun de 2006.

WITTE, N. H. Soybean meal processing and utilization. In *Practical Handbook of Soybean Processing and Utilization*, D. R. Erickson (Ed.). Champaign: AOCS Press, 1995. Ch. 7, p. 93-116.

WHITAKER, S. Forced convection head transfer correlations for flow in pipes, tast flat plates, single cylinders, single spheres, and flow in packed pees and tube bundles. *AIChE Journal*, v.18, pp.361 –371, 1972.