

ANDRÉ LUÍS ABITANTE

**MODELAGEM DINÂMICA E ANÁLISE DE UM SISTEMA DE CONTROLE
DE UMIDADE DE FOLHAS DE ERVA-MATE EM SECADORES CONTÍNUOS
DE ESTEIRA**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do grau de Mestre. Área de Concentração Processos Térmicos e Químicos, Programa de Pós-Graduação em Engenharia – PIPE – Setor de Tecnologia, Universidade Federal do Paraná.

Orientador: Prof. Dr. Everton Fernando Zanoelo

Co-orientador: Prof. Dr. Luiz Augusto C. Meleiro

CURITIBA

2007

Agradecimentos

A Deus, pelas oportunidades e bênçãos oferecidas durante toda minha vida.

A toda minha família. Pais Antonio e Maria, pelo incentivo e pelo amor de sempre – tudo que sou hoje devo a vocês. A Maisa, minha fonte de inspiração, pela amizade, compreensão, carinho e amor.

Ao Professor Dr. Everton Fernando Zanoelo, não somente pela orientação, incentivo, apoio e dedicação dispensadas em todas as etapas do desenvolvimento deste projeto, mas também pela amizade, tão importante neste período.

Aos Professores Mestre Tiago Buriol e, especialmente, Dr. Luiz Augusto da Cruz Meleiro, por toda ajuda, apoio, sugestões e pela amizade engrandecedora.

A Universidade Federal do Paraná, que me acolheu durante a pós-graduação, especialmente ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia (PIPE), pelo suporte administrativo e a oportunidade de realizar tal trabalho, e ao Programa de Pós-Graduação em Tecnologia de Alimentos, pela infra-estrutura de pesquisa.

Gostaria de manifestar também um agradecimento especial as indústrias ervateiras Vier (Santa Rosa - RS), Cristalina (Erechim - RS), Barão (Barão de Cotegipe - RS), Selecta (Canoinhas - SC), Timbó (Canoinhas - SC), Bonetes (Canoinhas - SC), Schier (Guarapuava - PR), Rei Verde (São Mateus do Sul - PR), Vier (São Mateus do Sul - PR), São Mateus (São Mateus do Sul - PR), Capimar (União da Vitória - PR), Nutrivale (União da Vitória - PR) e principalmente a Baldo S/A (São Mateus do Sul - PR).

À todos aqueles que, talvez por lapso de memória não tenham sido mencionados, contribuíram direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

RESUMO

A secagem de folhas de erva-mate (*Ilex paraguariensis*) é uma importante atividade industrial que envolve um grande número de pequenas e médias empresas da América do Sul. Apesar de sua relevância econômica, inúmeras inovações tecnológicas são requeridas para reduzir os custos de processamento e melhorar a qualidade das folhas desidratadas. Embora ambos aspectos estejam fortemente vinculados à umidade do produto na descarga de secadores contínuos, resultados experimentais apresentados neste trabalho demonstram que esta variável é raramente controlada em unidades que operam em escala comercial. Nesta investigação, um modelo fenomenológico foi desenvolvido e aplicado para reproduzir a cinética de secagem em um secador contínuo de camada delgada operando como um leito fixo em regime transiente. A expressão matemática representando o modelo dinâmico, a qual foi obtida do balanço de massa para a água na fase sólida da câmara de secagem, foi validada em diferentes condições estacionárias em um secador industrial contínuo. O modelo transiente foi resolvido com o método numérico das linhas utilizando uma fórmula implícita de diferenças finitas para trás (BDF) para aproximar a primeira derivada na direção espacial e no tempo. Dada a consistência do modelo, uma estratégia de controle foi sugerida para manter a umidade das folhas de erva-mate na descarga do secador no intervalo de 2,4 a 3,4 % (base seca) através do ajuste da velocidade da esteira para compensar perturbações nas condições de operação. Em particular, variações temporais da umidade na alimentação, da temperatura e velocidade do gás de secagem foram consideradas responsáveis pela alteração de regime. O desempenho de um controlador proporcional-integral-derivativo (PID) foi verificado por comparação entre respostas dinâmicas da umidade na descarga de secadores de esteira em malha aberta e fechada após variações aleatórias nas três variáveis de perturbação em termos de frequência e magnitude. O método simplex foi aplicado durante o procedimento de sintonia dos parâmetros do controlador PID para minimizar a integral dos desvios ao quadrado (ISE) das respostas quando foi imposta uma mudança no set-point do processo.

ABSTRACT

Drying of mate (*Ilex paraguariensis*) leaves is an important industrial activity that involves a large number of small and medium companies in South America. Despite of economic relevance, several technological innovations are required to reduce manufacturing costs and to improve the quality of dry leaves. Although both of these aspects are strongly dependent on the moisture content of this material in the discharge of continuous dryers, experimental results have shown that this variable is rarely controlled on commercial scale plants. In this investigation, a phenomenological model was applied to describe the kinetics of drying in a continuous shallow packed bed dryer of mate leaves at transient conditions. The mathematical expression representing the dynamic model, which was obtained from the mass balance for water in the solid phase of the drying chamber, was validated at different steady-state conditions in an industrial continuous dryer. The transient model was solved with the numerical method of lines by involving a backward differentiation formula (BDF) to approximate the first order spatial and time derivative. Based on this reliable model, a control strategy was suggested to maintain the discharge moisture content in the acceptable range of 2.4 to 3.4% (dry basis) by adjusting the velocity of the conveyor-belt to compensate disturbances in the operating conditions. In particular, time variations in the feed moisture content, drying temperature and air velocity were considered responsible for departures from the steady-state condition. The performance of a proportional-integral-derivative (PID) controller was verified by a comparison between open- and closed-loop responses of discharge moisture content to random changes in the three perturbation variables in terms of magnitude and time frequency. The simplex method was applied during the tuning procedure of the PID parameters by minimizing the integral squared error (ISE) of the process output when a set-point change was imposed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Fluxograma do processo industrial de beneficiamento de erva-mate ...	16
Figura 2.2 – Comparação entre valores de umidade de equilíbrio para erva-mate.....	21
Figura 2.3 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (curvas) para a densidade, condutividade térmica e calor específico de erva-mate....	23
Figura 2.4 – Comparação entre coeficientes efetivos de transferência de massa durante a secagem em leito fixo em leito fluidizado de <i>Ilex paraguariensis</i> e de <i>Camellia sinensis</i>	26
Figura 3.1 – Distribuição das medidas realizadas da velocidade do gás (ar) de secagem, em laboratório, à temperatura ambiente, dentro de uma estufa elétrica e média da velocidade obtida	31
Figura 3.2 – Diagrama esquemático do secador contínuo de esteira industrial visitado, utilizado na validação do modelo matemático proposto.....	33
Figura 3.3 – Distribuição das medidas da temperatura de secagem (símbolos), e a média obtida para esta variável (linha) efetuadas internamente em secador comercial.....	33
Figura 3.4 – Distribuição das medidas da velocidade do ar de secagem (símbolos), efetuadas internamente em secador comercial, e a média obtida para esta variável (linha).	34
Figura 3.5 – Diagrama esquemático assumido para obtenção do modelo proposto...	36
Figura 3.6 – Intervalos assumidos para se obter a solução numérica do modelo através do <i>método das linhas</i>	48

Figura 3.7 – Algoritmo utilizado para desenvolvimento de uma rotina em linguagem FORTRAN para solução e simulação do modelo proposto.....	52
Figura 4.1. Umidade média, durante um dia de operação, na descarga de treze secadores industriais contínuos rotatórios ou de esteira para folhas de mate.....	55
Figura 4.2. Coeficiente de correlação (R^2) e erro ao quadrado médio (MSE) para a Equação (2.9) (barra branca); Equação (2.7) (barra transversal), Equação (2.5) (barra inversa) e Equação (2.6) (barra escura).....	56
Figura 4.3. Comparação entre curvas de secagem experimentais (símbolos) e calculadas (linha), a 90°C (a), 75°C (b) e 60°C (c), em um secador da bandeja de laboratório.	60
Figura 4.4 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de temperatura do sólido em secador de laboratório a três temperaturas diferentes do ar de secagem: (a) 90°C, (b) 75°C e (c) 60°C.....	64
Figura 4.5- Comparação entre perfis axiais experimentais (símbolos) e calculados (linhas) de umidade ao longo de um secador industrial de esteira com dois estágios para folhas de mate.....	67
Figura 4.6. Perturbações aleatórias nas condições operacionais.....	69
Figura 4.7. Controle feedback da umidade na descarga de um secador de esteira para folhas de mate, afetadas por variações aleatórias em circunstâncias operacionais, conforme relatado na Figura 4.6. (a) respostas em malha aberta da umidade na descarga; (b) variável manipulada do sistema em malha fechada; (c) respostas em malha fechada da umidade na descarga.....	70
Figura 4.8. Perfil axial de umidade ao longo do secador de esteira após 3600 segundos de operação de secagem.....	71

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1. Condições de operação utilizadas no procedimento de ajuste das equações empíricas para a constante da secagem do modelo de Lewis.....	43
---	----

LISTA DE SÍMBOLOS – NOTAÇÃO

a_p	Área superficial das partículas, m^2 ;
A_{ss}	Área da seção transversal (na direção de escoamento) ocupada pelo sólido, m^2 ;
C_p	Calor específico da erva-mate (para diferentes umidades), $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
C_{p_g}	Calor específico do gás de secagem, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
C_{p_l}	Calor específico da água líquida, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
$C_{p_{ss}}$	Calor específico sólido seco, $J\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
C_s	Coefficiente efetivo de transferência de massa, s^{-1} ;
d_s	Diâmetro equivalente das partículas de mate, m ;
ΔH_v	Entalpia de vaporização, $Kcal\ kg_{\text{água}}^{-1}$, à pressão atmosférica;
G	Velocidade mássica, $kg\ m^{-2}\ s^{-1}$;
h	Coefficiente de transferência de calor, $W\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
h_m	Coefficiente modificado de transferência de calor, $W\ kg^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
K	Coefficiente de transporte de massa, s^{-1} ;
k	Condutividade térmica da erva-mate, $W\ m^{-1}\ ^\circ C^{-1}$;
L	Comprimento da esteira, m ;
M	Umidade do sólido (erva mate), $kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$;
M_0	Umidade inicial do sólido (erva mate), $kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$;
M_E	Umidade de equilíbrio da erva-mate, % (base úmida);
M_e	Umidade de equilíbrio (ótima) da erva-mate, $kg_{\text{água}} / kg_{\text{sólido seco}}$;
m_{ss}	Vazão mássica de sólido seco, kg_{ss} / s ;
Q_s	Vazão volumétrica de sólido; m^3 / s ;
R_h	Umidade relativa do ar, decimal;
t	Tempo, s ;
T	Temperatura do sólido, $^\circ C$;
T_g	Temperatura do gás de secagem, $^\circ C$;
T_r	Temperatura de referência, $^\circ C$;
u_c	Velocidade da correia, $m\ s^{-1}$;
u_g	Velocidade do gás de secagem, $m\ s^{-1}$;
V_{leito}	Volume do leito, m^3 ;
V_s	Volume de sólido, m^3 ;
V_v	Volume de vazios, m^3 ;
x	Posição ao longo do percurso da esteira, m ;

SÍMBOLOS GREGOS

ε	Porosidade;
ρ	Densidade da erva-mate, kg m^{-3} ;
ρ_g	Densidade do gás de secagem, kg m^{-3} ;
ρ_{ss}	Densidade sólido seco, kg m^{-3} .

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS

RESUMO

ABSTRACT

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SÍMBOLOS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	12
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	14
2.1 - ERVA-MATE	14
2.2 - PROCESSAMENTO ATUAL DA ERVA-MATE.....	15
2.3 - LEGISLAÇÃO NACIONAL SOBRE UMIDADE PARA A COMERCIALIZAÇÃO DA ERVA-MATE	18
2.4 - PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E DE TRANSPORTE DA ERVA MATE	20
2.4.1 - Umidade de equilíbrio da erva-mate	20
2.4.2 - Calor específico, condutividade e densidade da erva-mate.....	21
2.4.3 - Coeficiente de transporte de calor e massa	24
2.5 - MEDIDORES ON-LINE DE UMIDADE EM SÓLIDOS	26
CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS	29
3.1 - DADOS EXPERIMENTAIS	29
3.1.1 - Obtenção dos dados utilizados para comprovação ou rejeição da necessidade de um sistema de controle	29
3.1.2 - Dados obtidos em laboratório para validação do coeficiente de transferência de massa.....	30
3.1.3 - Dados obtidos na indústria para validação do modelo matemático proposto	32
3.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA.....	35
3.2.1 - Balanço de massa para a água contida nas folhas	37
3.2.2 - Balanço de energia na fase sólida do secador	40
3.2.3 - Modelo matemático para secadores de esteira de leito raso em regime transiente.....	42

3.2.4 - Modelo matemático para secadores de esteira de leito raso em regime permanente.....	44
3.2.5 - Solução analítica do modelo proposto para umidade.....	44
3.2.6 - Solução numérica do modelo proposto	44
3.3 - PROJETO DO CONTROLADOR.....	50
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	53
4.1 - NECESSIDADE DE CONTROLE DA UMIDADE NA DESCARGA DE SECADORES INDUSTRIAIS	53
4.2 - VALIDAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DO MODELO MATEMÁTICO	55
4.3 - DESEMPENHO DO CONTROLADOR	68
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO.....	73
CAPÍTULO 6 - SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS.....	74
REFERÊNCIAS	75

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO

Apesar da importância econômica da erva-mate para a região sul do Brasil, onde atualmente concentra-se o plantio e beneficiamento desta matéria-prima, historicamente o mercado nacional encontra-se estagnado e limitado a regiões onde o consumo deste produto é motivado por razões culturais. Neste contexto, a expansão desta atividade está em grande parte condicionada ao surgimento de novos produtos e/ou a busca de novos mercados. Uma alternativa interessante para implementar a expansão do setor ervateiro é a conquista de consumidores no exterior, principalmente na Europa e Ásia. Nestes dois continentes uma parcela considerável da população tem por hábito o consumo de chás obtidos por infusão de brotos de folhas de *Camellia sinensis* desidratadas, os quais são mundialmente conhecidos como chá preto inglês e chá verde japonês. Além destas bebidas não alcoólicas apresentarem características sensoriais muito similares aos extratos aquosos de erva-mate, a fatia de mercado atualmente ocupada pela *Camellia sinensis* passível de ser conquistada pela erva-mate é representativa, visto que a produção nacional de erva-mate no ano de 2000 (Lourenço *et al.*, 2000) correspondia somente a 11 % da produção mundial destes chás alcançada em 1996 (*International Tea Council*, 1997). Ainda assim, a produção anual de erva-mate é estimada em 300 milhões de toneladas ao ano (Kawakami e Kobayashi, 1991; Goldenberg, 2002).

Mesmo com um cenário que aponta a exportação como uma solução efetiva para a expansão do setor ervateiro, a possibilidade de incremento do comércio externo somente se tornará viável caso a indústria nacional desenvolva a capacidade de disponibilizar ao mercado externo um produto competitivo sob o ponto de vista de qualidade e custo, sendo este o objetivo geral do presente trabalho. A secagem de qualquer produto alimentício requer inúmeros cuidados devido a possibilidade de alteração da sua qualidade durante o processo. Neste sentido, a umidade final de folhas de erva-mate apresenta-se como o parâmetro mais importante do processo industrial de secagem, dado que as propriedades do produto e o consumo de energia estão fortemente vinculados a esta variável. Sabe-se, por exemplo, que o armazenamento e empacotamento de folhas de erva-mate com umidades elevadas podem ocasionar alterações não controladas nas características sensoriais de bebidas produzidas a partir da infusão deste produto. Em contrapartida, a obtenção de um produto com valores de

umidade, abaixo dos níveis recomendados pressupõe um consumo desnecessário de energia e, conseqüentemente, incrementa o custo de operação.

Embora a indústria nacional tenha feito razoáveis esforços no sentido de implantar um programa de certificação de qualidade para a erva-mate beneficiada, a forma atual de beneficiamento não permite um controle efetivo da umidade. A falta de padronização da erva-mate destinada ao mercado interno, no que se refere ao quesito umidade, é agravada pela indefinição de valores limites, os quais deveriam ser estabelecidos pela legislação vigente.

Neste sentido o presente estudo tem como primeiro objetivo específico propor um modelo fenomenológico para descrição do comportamento dinâmico do processo de secagem de erva-mate em secadores industriais de camada delgada. Medidas experimentais de umidade e temperatura das folhas em secadores comerciais foram realizadas com o intuito de verificar a consistência do modelo nas condições de operação tipicamente encontradas na secagem em larga-escala de erva-mate. O segundo objetivo específico deste trabalho é propor uma estratégia de controle automático do processo capaz de manter a umidade de descarga de folhas de erva-mate em valores pré-estabelecidos, frente a perturbações nas condições de operação, através da manipulação da velocidade da esteira. Em particular, o desempenho do sistema de controle foi avaliado por comparação entre as respostas transientes da variável controlada em malha fechada e aberta, após variações aleatórias em termos de amplitude e frequência das variáveis de operação.

CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Embora inicialmente o presente capítulo apresente informações resumidas sobre as características da planta (erva-mate) e sua importância sócio-econômica para a região sul do Brasil, os temas abordados nesta seção focam aspectos tecnológicos do processamento atual e sua relação com a investigação proposta. Além disso, são apresentados dados relevantes reportados na literatura sobre propriedades termofísicas da erva-mate, bem como sobre as resistências e a transferência de calor e massa durante a secagem deste produto. Ressalta-se que estes parâmetros são indispensáveis para a simulação dinâmica do processo de secagem através do modelo matemático proposto. Por fim, visto que toda a estratégia de controle sugerida neste estudo é baseada em medidas “on-line” de umidade, apresentam-se de forma sintética técnicas de medidas rápidas de umidades de sólido citadas na literatura.

2.1 - ERVA-MATE

A erva-mate (*Ilex paraguariensis* Saint Hilaire) é uma planta pertencente à família Aquifoliácea, a qual envolve unicamente o gênero *Ilex* onde estão classificadas aproximadamente 600 espécies. Plantas pertencentes a esta família apresentam-se normalmente na forma de arbustos ou árvores cuja altura varia de 2 a 25 m e são encontradas em todos os continentes (Powell *et al.*, 2000; Cuénoud *et al.*, 2000).

A área de dispersão natural de *Ilex paraguariensis* St. Hil. (erva-mate), abrange aproximadamente 540.000 km² de regiões subtropicais e temperadas da América do Sul, compreendendo territórios do Brasil, Argentina e Paraguai. Só no Brasil estão situados 450.000 km² do total, incluindo a região centro-norte do Rio Grande do Sul, quase todo o Estado de Santa Catarina, centro-sul e sudoeste do Paraná, sul do Mato Grosso do Sul e manchas em São Paulo, Rio de Janeiro e Minas Gerais (Valduga, 1994).

A importância sócio-econômica da erva-mate para a região sul do Brasil é relevante, pois é estimado que somente o cultivo envolva aproximadamente 180 mil propriedades agrícolas, enquanto que a etapa de beneficiamento desta matéria-prima é realizada em cerca de 600 a 700 pequenas e médias indústrias (SEAB Paraná, 1993; Vilcahuaman, 1999). Somente no Brasil, este agro-negócio tem gerado em torno de 700 mil empregos com receita equivalente a R\$ 150-180 milhões (SEAB Paraná, 1993;

Vilcahuaman, 1999, Lourenço *et al.*, 2000). Apesar das estatísticas evidenciarem um grande volume de produção, existem algumas divergências na literatura em relação à quantidade produzida no Brasil, a qual acredita-se esteja entre 210 (Lourenço *et al.*, 2000) e aproximadamente 270 mil (SEAB, Paraná, 1997) toneladas de produto desidratado. De acordo com Goldenberg (2002), este número se elevaria ao patamar de 300 mil toneladas por ano se considerada toda a produção da América do Sul.

As folhas desidratadas em escala comercial são destinadas à preparação, por infusão, de um tipo de chá que é consumido principalmente na Argentina, Uruguai, Paraguai, sul do Brasil e em menor grau em outras áreas do mundo como Alemanha, Síria, Líbano e norte de Israel (Goldenberg, 2002). O consumo per capita de erva-mate no Brasil, estimado em 1,2 kg por ano (Görge *et al.*, 2005), é pequeno se comparado com os números encontrados na Argentina e Uruguai, onde as pessoas utilizam cerca de 5 a 7 kg de erva-mate seca por ano para a preparação de chás (Goldenberg, 2002), respectivamente.

2.2 - PROCESSAMENTO ATUAL DA ERVA-MATE

Embora o beneficiamento de erva-mate, cuja descrição esquematizada é apresentada na Figura 2.1, envolva uma fase final de desintegração das folhas e classificação granulométrica, somente as etapas de desativação enzimática e secagem convectiva são descritas de forma detalhada neste trabalho. Somadas, estas operações são responsáveis pela obtenção dos valores de umidade requeridos comercialmente e, por consequência, onde ocorre o maior consumo de energia do processo de industrialização (Da Rocha Jr., 2001).

Na etapa de desativação enzimática, a erva-mate *in natura* é alimentada na cavidade de um cilindro metálico com diâmetro de aproximadamente 3 m e comprimento entre 15 e 20 m. Devido a um movimento rotatório a velocidades moderadas e auxílio de pás internas, as folhas são conduzidas até a extremidade oposta. O tempo de residência total do material no equipamento é de aproximadamente 8 minutos (Esmelindro *et al.*, 2002). Durante a passagem das folhas no cilindro ocorre simultaneamente a desativação enzimática e a pré-secagem do material. Inicialmente por contato instantâneo e direto do produto com chama de combustão de lenha a uma temperatura de aproximadamente 300-350°C (Schmalko *et al.*, 1997) e, em seguida,

devido a transferência de calor e massa entre as folhas e gases quentes de combustão a temperaturas inferiores. De acordo com Esmelindro *et al.* (2002), a temperatura média na saída do cilindro é de aproximadamente 65°C. A alta temperatura da chama, localizada na entrada do cilindro, em contato direto com o material provoca a desativação de enzimas presentes na erva-mate, como as peroxidases ou polifenoloxidasas as quais, caso não fossem desativadas, atuariam no sentido de provocar alterações organolépticas e de cor ao produto. Neste equipamento também ocorre uma pré-secagem das folhas de erva-mate com redução acentuada da umidade, inicialmente com valores de $60 \pm 5 \%$ para em torno de $20 \pm 15 \%$ em base úmida (Zanoelo *et al.*, 2003).

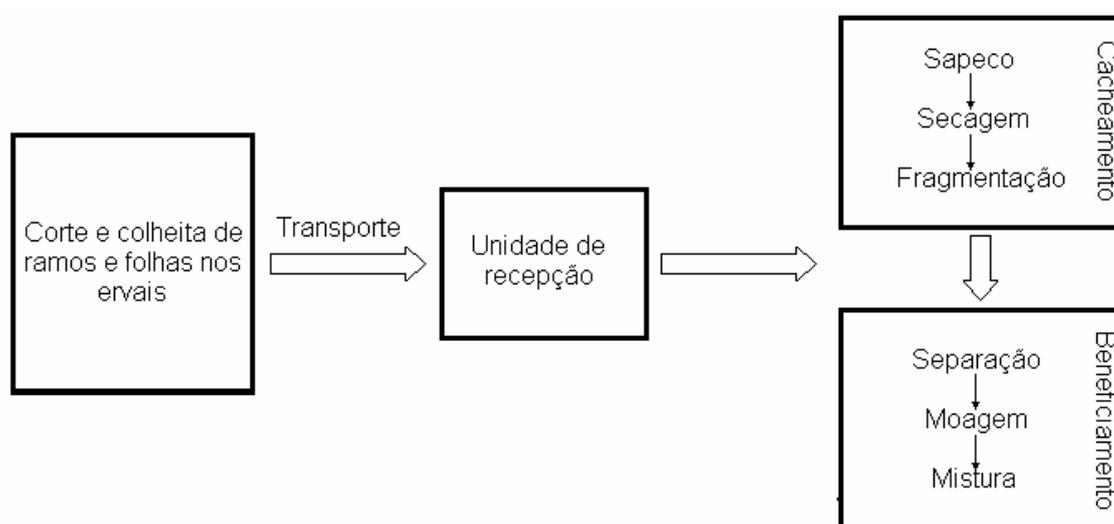


Figura 2.1 - Fluxograma do processo industrial de beneficiamento da erva-mate.

Todavia o interesse principal do presente trabalho seja o controle de umidade na etapa de secagem convectiva, onde de fato ocorre a redução de umidade a valores inferiores a 10% (base úmida), é importante destacar alguns inconvenientes do processo atual de desativação enzimática acima descrito. O principal problema deste tipo de tratamento primário reside na possível degradação de fenóis simples (ácidos clorogênicos) contidos na erva-mate (Zanoelo *et al.*, 2006), os quais são considerados como agentes de prevenção na formação de radicais livres no organismo humano. Além desta questão, deve-se ressaltar a dificuldade de padronização da erva-mate processada, visto que o contato direto de gases de combustão de lenha com o produto confere ao mesmo, características sensoriais distintas, em função do tipo específico de matéria combustível utilizada. Destaca-se ainda a dificuldade de controle de temperatura na

câmara, o que também dificulta a obtenção de produtos de alta qualidade. Esta variável influencia fortemente o complexo sistema de reações bioquímicas de oxidação, responsáveis pela formação de uma série de compostos, que embora individualmente estejam presentes em baixa concentração, quando somados conferem características sensoriais específicas no produto.

O produto retirado do equipamento responsável pela desativação enzimática e pré-secagem, o qual apresenta umidade de aproximadamente 20 ± 15 %, é alimentado em um secador que reduz o teor de umidade das folhas a valores inferiores a 10%. Na execução desta operação, utilizam-se frequentemente secadores contínuos rotativos ou de esteira, com temperaturas da ordem de 90 a 140°C (Zanoelo, 2005; Zanoelo *et al.*, 2007). Ambos os secadores operam tipicamente com eficiências de aproximadamente 11%, o que equivale a um consumo médio de lenha de 2,2 toneladas por tonelada de erva-mate desidratada (Zanoelo *et al.*, 2007).

Visto que o modelo matemático proposto neste trabalho envolve a simulação da secagem em secadores de esteira, a operação de secagem industrial neste equipamento será descrita de modo detalhado. No que se refere aos secadores rotativos, no presente contexto, basta defini-los como cilindros inclinados que giram a baixas velocidades e que são alimentados internamente com o produto em um fluxo concorrente ao do gás secagem.

Nos secadores de esteira, ventiladores ou sopradores impelem o gás de secagem contracorrente, concorrente ou perpendicularmente (fluxo cruzado) ao sentido de deslocamento do material, que é transportado por uma esteira de tela metálica inserida em um túnel de secagem. Os secadores de esteira multiestágios consistem em duas ou mais bandejas de metal perfuradas e unidas por rolamentos em série, de forma que a alimentação de sólido é feita na bandeja superior e a descarga na inferior. Neste equipamento o gás de secagem é invariavelmente alimentado através da base das pilhas de esteiras, de forma que o material mais seco encontra o gás mais quente e seco, enquanto que o material transportado nas bandejas superiores é submetido a uma secagem com gás a temperatura menor. Os secadores de esteira multiestágios são preferidos em relação aos que envolvem uma única esteira devido ao aumento da eficiência térmica e ao menor espaço requerido. Embora a fluidização seja uma técnica de contato fluido-partícula que otimiza a operação de secagem devido ao aumento da área de transferência de calor e massa (Zanoelo, 2007), os secadores de esteira utilizados na secagem de erva-mate na América do Sul normalmente operam como

leitos fixos com alturas superiores a 0,5 m. Esta característica de operação requer tempos de residência do material no túnel de secagem que variam de 4 a 5 horas (Esmelindro *et al.*, 2002).

Embora os secadores de leito fluidizado apresentem taxas de secagem muito maiores do que as encontradas em secadores de leito fixo de camada espessa, há de se considerar na escolha do regime de operação que as altas velocidades requeridas para fluidização ($0,6$ a $1,0 \text{ m s}^{-1}$) reduzem a eficiência térmica, visto que uma maior massa de fluido de secagem deve ser aquecida e alimentada no equipamento (Zanoelo *et al.*, 2007, Zanoelo, 2007). Embora na investigação do processo de secagem de *Camellia sinensis* tenha sido observado uma redução de aproximadamente 60% do coeficiente de secagem quando o secador de leito fluidizado é preterido ao de camada delgada (Temple e Van Boxtel, 1999a), um regime alternativo que concilia moderadas taxas de secagem e alta eficiência é encontrado na secagem em leitos de camada delgada (Zanoelo *et al.*, 2007).

Normalmente, independente do tipo de equipamento utilizado, o método de secagem envolve a injeção de gases quentes de combustão no secador alimentado com folhas úmidas de erva-mate. Um dos maiores problemas desta técnica é que o contato direto entre a fumaça obtida pela queima da madeira e as partículas de erva-mate podem comprometer a qualidade do processo de secagem das folhas. Alguns parâmetros comerciais importantes para a erva-mate como cor, sabor, aroma e principalmente umidade residual não são controlados ao aplicar-se este procedimento de secagem. Além disso, a possibilidade de formação de centelhas devido à combustão incompleta da madeira é a principal causa de incêndios e explosões na indústria ervateira. A erva-mate também pode ser desidratada em escala comercial por secagem convectiva empregando ar aquecido em trocadores de calor envolvendo vapor ou gases de combustão como fluido quente. Embora alguns dos muitos problemas mencionados acima possam ser evitados por aplicação deste sistema de secagem, devido à presença do trocador a eficiência energética do processo é reduzida (Zanoelo *et al.*, 2006).

2.3 - LEGISLAÇÃO NACIONAL SOBRE UMIDADE PARA A COMERCIALIZAÇÃO DA ERVA-MATE

A resolução da ANVISA mais recente em relação a este assunto (RDC nº 277, de 22 de setembro de 2005), a qual aprova o "Regulamento Técnico para Café, Cevada, Chá, Erva-Mate e Produtos Solúveis", não apresenta especificamente a umidade para erva-mate. A mesma resolução revoga a RDC nº 303 de 07 de novembro de 2002, a qual aprovara o "Regulamento Técnico para Fixação de Identidade e Qualidade do Composto de Erva-Mate", onde era fixado de forma clara o valor máximo de 10% para a umidade de erva-mate comercial.

Segundo a Equipe Técnica GPESP / GGALI / ANVISA / MS, atualmente é de responsabilidade da indústria fabricar seu produto (erva-mate) segundo as boas práticas de fabricação e de forma a atender as preferências do consumidor, visto que a resolução vigente (RDC nº 277, de 22 de setembro de 2005) não definiu um limite de umidade para a erva-mate e revogou o limite estabelecido em norma anterior.

Na Argentina, a título de exemplo, a Resolução 49/02 de 25 de novembro de 2002 do Instituto Nacional de Erva-Mate, publicado no Diário Oficial da República Argentina, determina um limite superior de 9,5% de umidade para a erva-mate comercial.

O valor máximo de umidade determinado pela legislação Argentina, embora esteja acima dos valores aceitáveis para permitir uma competição da erva-mate com a *Camellia sinensis* no mercado internacional, representa uma vitória interna visto que assegura ao consumidor Argentino um produto com um padrão de qualidade e indica ao produtor daquele país a importância do controle da umidade do produto a ser comercializado.

O quadro atual, do ponto de vista tecnológico e também no que se refere à legislação vigente no Brasil, evidencia as dificuldades de controle de umidade e de forma indireta, a comercialização externa deste produto como concorrente dos chás verde e preto, visto que um intervalo aceitável de umidade de descarga de *Camellia sinensis* seria de aproximadamente 2,5 a 3,5% (b.u.) (Temple e van Boxtel, 2000). Estes limites estão bem abaixo do valor permitido de umidade medida em chás empacotados, o qual seria de aproximadamente 7%, porém um ganho de umidade de três a quatro pontos percentuais é esperado nas etapas de empacotamento e armazenamento, o que requer um teor de umidade do produto no final da etapa de secagem da ordem de 3% (base úmida).

2.4 - PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS E DE TRANSPORTE DA ERVA MATE

O equacionamento matemático para descrição teórica do processo de secagem em secadores de camada delgada, o qual é apresentada no Capítulo 3, evidência a necessidade de uma série de propriedades físico-químicas e de transporte que, por encontrarem-se disponíveis para consulta na literatura, são reportadas nesta secção de forma resumida.

2.4.1 - Umidade de equilíbrio da erva-mate

A umidade de equilíbrio da erva-mate representa o valor de umidade do sólido em equilíbrio com o ar ambiente a uma determinada condição de umidade relativa e temperatura. Uma equação empírica obtida a partir de medidas experimentais de umidade de equilíbrio por utilização de soluções salinas saturadas para controle da umidade relativa no intervalo de 11-97%, respectivamente nas temperaturas constantes de 30, 40 e 50°C, é proposta por Zanoelo, 2005. Dentre várias expressões empíricas testadas pelo autor para correlacionar a variável dependente às condições de operação, o modelo de Halsey Modificado foi o que apresentou menor erro padrão de estimativa (0,83%) e menor desvio relativo médio (8,3%). A equação demonstrou-se capaz de explicar 96% ($R^2=0,96$) das variações da umidade de equilíbrio ocasionadas por mudanças na umidade relativa e na temperatura na faixa investigada.

$$M_E = 10^{-2} \left[\frac{-\exp(-5.7 \times 10^{-3} T + 3.02)}{\ln(R_h)} \right]^{0.662} \quad (2.1)$$

A Figura 2.2 confirma a validade dos resultados gerados pela Equação (2.1) por comparação entre valores de umidade de equilíbrio de erva-mate e resultados análogos reportados por Zanoelo, 2005.

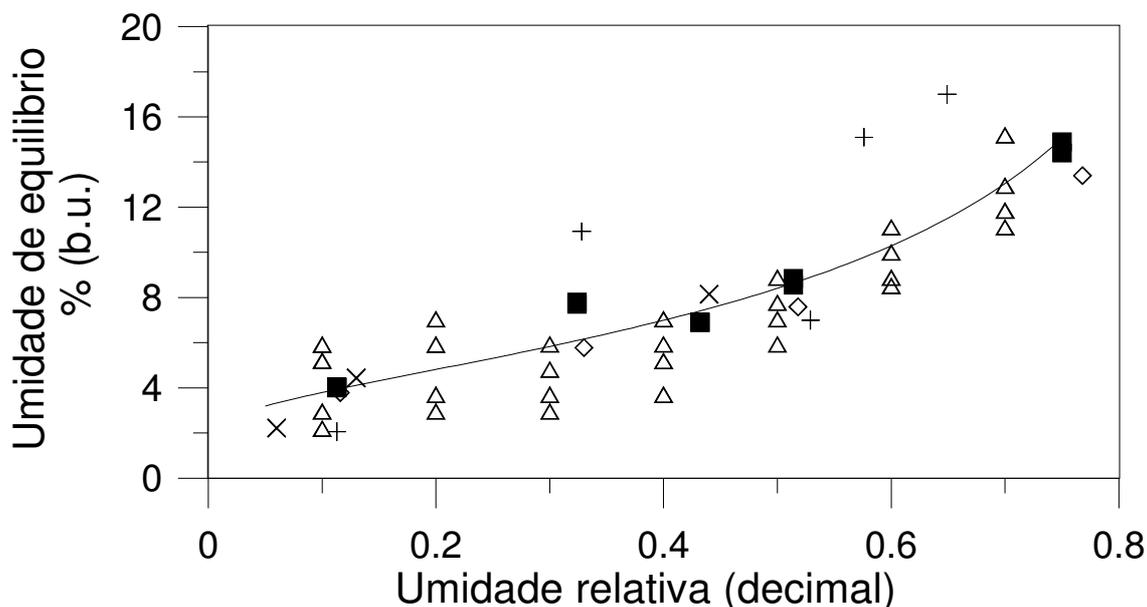


Figura 2.2 – Comparação entre valores de umidade de equilíbrio para erva-mate, calculados a partir da Equação 2.1 (linha sólida) e obtidos a partir de outras investigações experimentais (símbolos) em temperaturas próximas. Δ = M_E para chá preto a 25°C (Jayaratnam e Kirtisinghe, 1974), \times = M_E para chá preto a 25°C (Temple e Van Boxtel, 1999b), \diamond = M_E para chá verde (Yoshitomi, 1989), $+$ = M_E para folhas de erva-mate a 25°C (Scipioni et al., 2000), \blacksquare M_E para folhas de erva-mate a 30°C (Zanoelo, 2005).

2.4.2 - Calor específico, condutividade térmica e densidade da erva-mate

Embora diferentes modelos empíricos tenham sido propostos na literatura para determinação da condutividade térmica e calor específico de produtos alimentícios (Gratzek e Toledo 1993; Mattea *et al.* 1986, 1989; Maroulis *et al.* 1991), os mesmos são fortemente dependentes da composição dos materiais (fração mássica de água, de gordura, carboidratos e cinzas). Ramos e folhas de erva-mate possuem uma estrutura análoga a de um sólido poroso e apresentam basicamente em sua composição água, celulose, ar e outros sólidos solúveis. Em essência os modelos acima referidos não são adequados para predição dos parâmetros investigados devido às diferenças significativas de composição e estrutura entre alimentos usuais e a erva-mate.

Schmalko *et al.* (1997) realizaram um trabalho experimental para determinação destes parâmetros termofísicos utilizando ramos de *Ilex paraguariensis* com casca e sem casca. Dada a diferença de estrutura, forma e composição entre folhas e ramos,

teoricamente os resultados obtidos por estes pesquisadores poderiam ser diferentes dos valores que seriam obtidos para folhas. Entretanto, considerando a inexistência de resultados na literatura para folhas de erva-mate, os resultados experimentais são apresentados de forma sintética nas Equações (2.2), (2.3) e (2.4).

$$\rho = 558 + 447M^2 \quad (2.2)$$

$$k = 0,713 - 0,621 \exp\left[-1,57\left(\frac{M}{1+M}\right)\right] \quad (2.3)$$

$$C_p = 1790 + 2360\left(\frac{M}{1+M}\right) \quad (2.4)$$

Yoshitomi (1987) e Yin (1985) realizaram estudos similares para investigação do calor específico de brotos de *Camellia sinensis* obtendo aproximadamente os valores de 960 e 1440 J °Ckg⁻¹ de matéria seca, respectivamente. O trabalho de Yin (1985) apresenta também valores de condutividade térmica para o mesmo produto da ordem de 0,0483 W m°C⁻¹ assumindo um sólido com umidade média de 8,3% (base úmida). Dados de densidade aparente (367 kg m⁻³) e difusividade térmica (8,34×10⁻⁸ m² s⁻¹) foram obtidos por Yin (1985) considerando a mesma umidade acima referida.

A Figura 2.3 apresenta uma comparação entre os valores experimentais (Yin, 1985, Yoshitomi, 1987 e Schmalko *et al.*, 1997) e calculados dos três parâmetros considerados nesta secção. As curvas geradas pelas equações anteriormente apresentadas descrevem bem a correlação experimental observada por Schmalko *et al.* (1997) entre as variáveis dependentes e a umidade. De fato, este comportamento era já aguardado, visto que os parâmetros destes modelos foram ajustados para minimizar os somatórios dos quadrados das diferenças entre valores experimentais e calculados. A partir da Figura 2.3 observa-se também que os valores experimentais para a densidade, condutividade e calor específico de folhas de *camellia sinensis* determinados por Yin (1985) estão relativamente próximos dos valores dos mesmos parâmetros em palitos de erva-mate. Esta pequena diferença entre as propriedades dos palitos (*Ilex paraguariensis*) e folhas (*Camellia sinensis*) corroboram a utilização das Equações (2.2), (2.3) e (2.4) para o cálculo de todas as propriedades termofísicas das folhas de

erva-mate envolvidas neste trabalho. Ressalta-se que esta hipótese pressupõe diferenças desprezíveis na composição química das folhas de chá e erva-mate ou um efeito negligenciável dos diferentes constituintes sobre os parâmetros termofísicos.

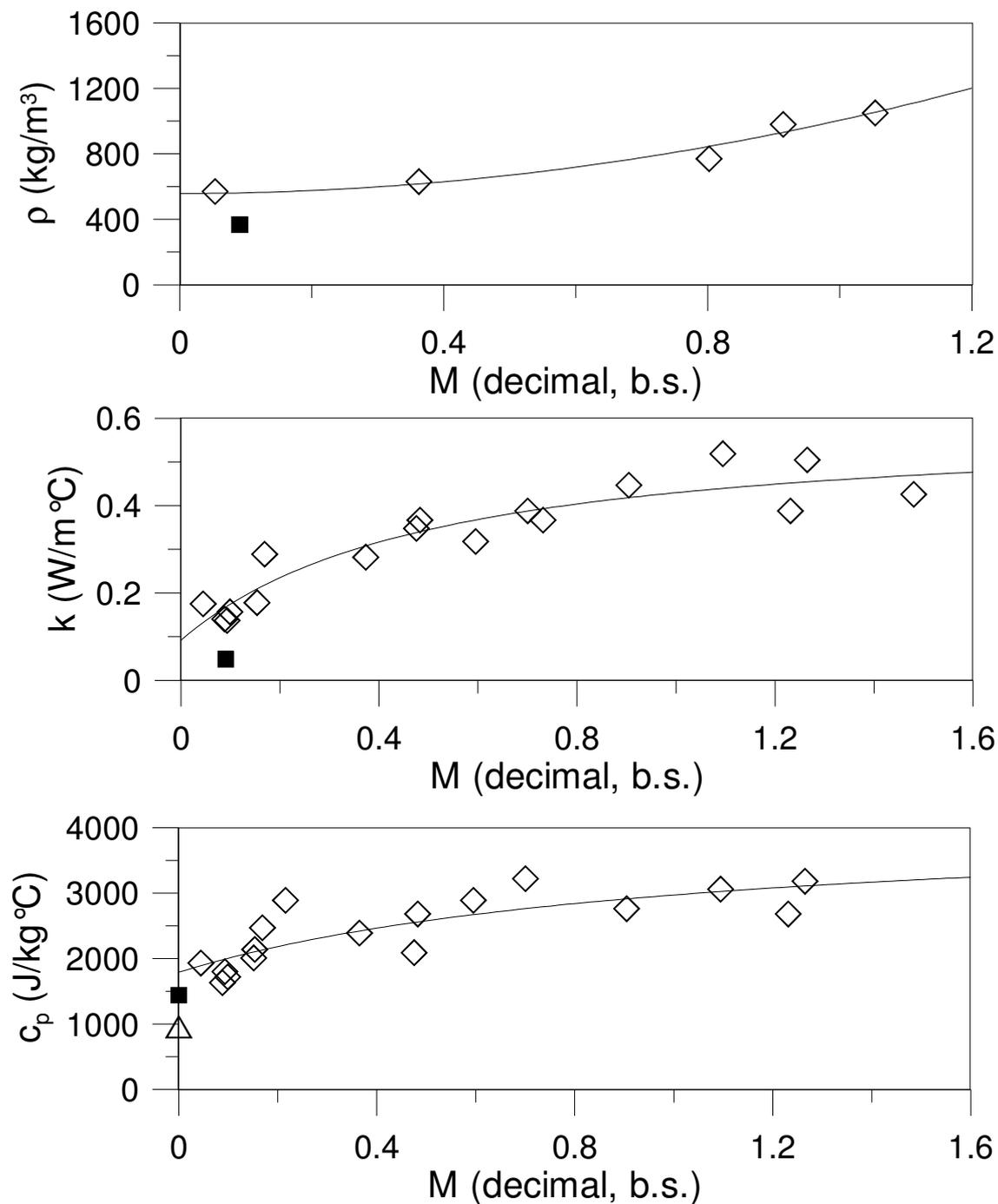


Figura 2.3 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (curvas) para a densidade, condutividade térmica e calor específico de erva-mate. Losangos=Schmalko et al. (1997); Quadrados=Yin (1985); Triângulos=Yoshitomi (1987).

2.4.3 - Coeficiente de transporte de calor e massa

Uma expressão para o cálculo do coeficiente efetivo de transferência de massa obtida através de curvas experimentais de secagem de *Camellia sinensis* em um leito de camada delgada é reportada na literatura (Temple e van Boxtel, 1999b). Na investigação conduzida por estes pesquisadores a expressão da taxa de transferência de massa é representada através de um modelo análogo a Lei de Newton do resfriamento, o qual é freqüentemente mencionado na literatura como *modelo de Lewis* ou modelo exponencial de secagem (Jayas *et al.*, 1991). A correlação empírica tem sua validade restrita as condições experimentais investigadas, nas quais considerou-se o efeito da velocidade do ar (0,01 e 0,63 m s⁻¹) e a influência da temperatura no intervalo de 50 °C a 150°C.

$$C_s = 2,8 \times 10^{-4} u_g (T_g - 45) - 6,7 \times 10^{-4} \quad (2.5)$$

Uma investigação análoga a de Temple e van Boxtel (1999b) para secagem de *Camellia sinensis* foi conduzida por Panchariya *et al.* (2002). Dentre os vários modelos semi-empíricos testados para reproduzir curvas de secagem obtidas em um intervalo de velocidade de 0,25 a 0,65 m s⁻¹ e em temperaturas entre 80 e 120°C, o modelo de Lewis foi que apresentou melhor desempenho. A Equação (2.6) correlaciona o coeficiente efetivo de transferência de massa apresentado no modelo de Lewis com as condições de operação durante a secagem.

$$C_s = 1 \times 10^{-6} (T_g)^{2,08} u_g^{1,11} \quad (2.6)$$

Um estudo de secagem em leito raso operando em regime de fluidização foi conduzido por Zanoelo (2007) para determinação dos coeficientes efetivos de transferência de massa e calor durante a secagem de erva-mate. Uma expressão empírica foi desenvolvida a partir de perfis experimentais de temperatura e umidade de folhas de erva-mate. A correlação foi proposta de forma a minimizar a diferença relativa entre os resultados experimentais e aqueles calculados a partir da solução simultânea de um sistema de equações diferenciais ordinárias representando o balanço de massa e

energia na fase sólida do secador. Os experimentos considerados neste procedimento de otimização assumiam variação de temperatura de secagem de 50 a 100°C e folhas com diâmetro equivalente entre $5,2 \times 10^{-3}$ a $1,05 \times 10^{-2}$ m.

$$C_s = 1,56 \times 10^{-4} T_g - 7,507 \times 10^{-3} \quad (2.7)$$

$$h_m = 4,72 T_g - 9,14 \quad (2.8)$$

Uma análise da importância da difusão e convecção no transporte de massa nas condições investigadas por Zanoelo (2007) evidencia que ambos os fenômenos são importantes. Portanto, espera-se que a velocidade do ar tenha um efeito significativo sobre o coeficiente externo de transferência de massa e por consequência sobre o coeficiente efetivo, como já demonstrado na investigação de Temple e van Boxtel (1999b) para *Camellia sinensis*. Entretanto, a influência desta variável não é considerada nas Equações (2.7) e (2.8) devido ao estreito intervalo de velocidade onde boas condições de fluidização são obtidas, as quais oscilariam entre 0,6 e 1,0 m s⁻¹.

A Equação (2.9) representa uma expressão para cálculo do coeficiente efetivo de transferência de massa na secagem de erva-mate em leito fixo (Zanoelo *et al.*, 2007). O modelo foi proposto a partir de ensaios de secagem de folhas com diâmetro equivalente igual a 0,03 m, o que representa folhas de erva-mate cortadas pela metade na direção longitudinal. No desenvolvimento desta correlação foi considerado o efeito da velocidade mássica entre 0,1 e 1,0 kg m⁻² s⁻¹, bem como a influência da temperatura entre 50 e 103 °C.

$$C_s = 3,6 \times 10^{-5} T_g - 4,344 \times 10^{-3} G + 9,03 \times 10^{-5} T_g G - 1,746 \times 10^{-3} \quad (2.9)$$

A Figura 2.4 apresenta uma comparação entre as diferentes correlações empíricas para cálculo dos coeficientes efetivos de transferência de massa a diferentes temperaturas e na velocidade de 0,5 m s⁻¹. A densidade do ar nas diferentes temperaturas investigadas, a qual é requerida na Equação (2.9), foi estimada através da Equação (2.10) assumindo dados de densidade do ar na faixa de -20 °C a 180°C (Holman, 1983).

$$\rho_g = 1,298 - 4,584 \times 10^{-3} T_g + 9,606 \times 10^{-6} (T_g)^2 \quad (2.10)$$

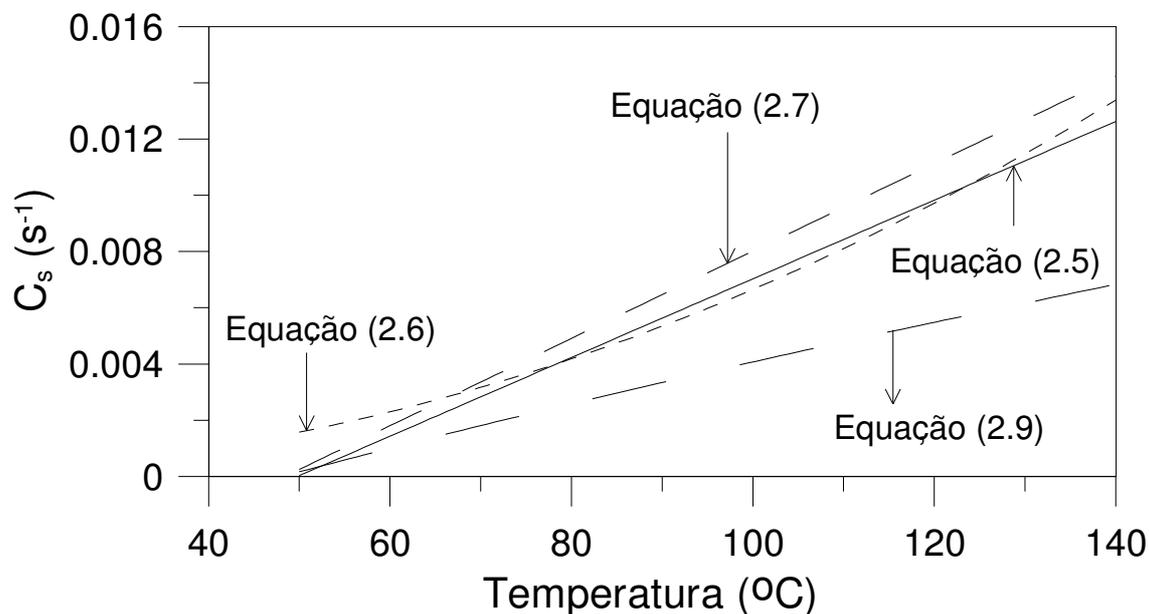


Figura 2.4 – Comparação entre coeficientes efetivos de transferência de massa durante a secagem em leito fixo (Equação 2.9) e em leito fluidizado (Equação 2.7) de *Ilex paraguariensis* e de *Camellia sinensis* em leitos de camada delgada (Equações 2.5 e 2.6).

A validade da Equação (2.8) é verificada no estudo que apresenta os coeficientes modificados de transferência de calor para erva-mate em leito fluidizado (Zanoelo, 2007). Naquela investigação os números de Nusselt obtidos a partir da Equação (2.8) são comparados com valores decorrentes da utilização da bem conhecida expressão de Ranz e Marshall (1952) para transferência de calor de esferas isoladas submetidas a fluidização.

2.5 - MEDIDORES ON-LINE DE UMIDADE EM SÓLIDOS

Embora o objetivo principal desta investigação não seja o desenvolvimento de um sensor para medidas rápidas e “on-line” de umidade da erva-mate, uma análise de técnicas e equipamentos disponíveis para este propósito se faz necessário. Entretanto, antes destas técnicas serem relacionadas e descritas convém ressaltar que o método gravimétrico convencional de medida de umidade em sólidos, o qual será utilizado para determinação das curvas experimentais de umidade apresentadas neste trabalho

(*International Standards Organisation*, 1980), é impraticável quando o objetivo é o controle do processo de secagem baseado em medidas de umidade na descarga de secadores.

Diferentes trabalhos têm sido apresentados na literatura para determinação rápida de umidade em sólidos (Hall *et al.*, 1988; Temple, 2000; Rywotycki, 2003; Mizukami *et al.*, 2006). Uma técnica amplamente difundida em laboratórios de pesquisa envolve balanças de determinação de umidade por infravermelho. Neste equipamento as amostras são dispostas sobre uma balança em uma câmara isolada e submetidas a um processo de secagem por aquecimento com irradiação de luz no espectro do infravermelho. Embora a secagem seja acelerada e um microprocessador calcule a umidade diretamente a partir das leituras de perda de peso da amostra, a técnica apresenta alguns inconvenientes que a tornam impossível de ser aplicada com o objetivo de controle. O primeiro aspecto negativo é a necessidade de isolamento da amostra em uma câmara sujeita a irradiação com infravermelho, enquanto que o segundo ponto crítico é o tempo de análise, o qual é de aproximadamente 10 minutos para amostras de *Camellia sinensis* com umidades residuais e de até 30 minutos para amostras desta mesma planta *in natura* (70% b.u.) (Temple, 2000). Outro procedimento amplamente utilizado na indústria de processamento de grãos, mas inadequado para os propósitos da presente investigação, baseia-se na diferença de condutividade de amostras com diferentes teores de umidade. Em particular a técnica é imprópria para medidas de umidade em folhas de chá e erva-mate *in natura* devido a saturação do detector de condutividade na faixa de 60 a 70% de umidade (b.u.), enquanto que para amostras com umidades comerciais (<10%) a variabilidade das amostras no que se refere a quantidade de fibras e tamanho de partículas torna impossível a calibração (Temple, 2000).

Do ponto de vista de aplicação em controle dinâmico, as técnicas viáveis atualmente disponíveis para determinação de umidade envolvem medidas de propriedades elétricas como impedância e capacitância da amostra (Rywotycki, 2003; Mizukami *et al.*, 2006) e espectroscopia por reflexão no infravermelho próximo (NIRS) (Hall *et al.*, 1988; Temple, 2000). Ambos os métodos foram testados com relativo sucesso para determinação de umidade de folhas de *Camellia sinensis* na faixa de aproximadamente 2 a 70% de umidade em base úmida (Temple, 2000; Mizukami *et al.*, 2006).

A técnica que envolve medidas das propriedades elétricas de amostras e sua correlação com a umidade do material foi investigada por Mizukami *et al.* (2006)

através da utilização de quatro eletrodos de aço inox e um medidor (Hioki-Modelo 3532-80) para determinar a capacitância e impedância de amostras de *Camellia sinensis* com diferentes umidades. Os pesquisadores observaram uma correlação consistente entre a umidade e ambas as propriedades elétricas referidas que permite a predição da umidade com um erro padrão de estimativa de aproximadamente 3,5% (b.u.). Embora a técnica requeira o contato entre amostra e sensor, a resposta rápida (menos de 1 minuto) e o erro relativamente baixo permitem a utilização deste tipo de sensor para o propósito aqui investigado.

A NIRS consiste em irradiar uma amostra com luz infravermelho de baixa intensidade que não altera a umidade original do material. A luz refletida é medida em comprimentos de onda específicos e a absorbância é calculada. A técnica é baseada no fato de que as moléculas de água apresentam valores definidos de absorbância em determinados comprimentos de onda diferentes dos encontrados nas moléculas dos demais compostos do material investigado. Sensores comerciais (*Infrared Engineering*-Modelo MM55E; *Moisture Systems*-Modelo MicroQuad MQ8000) baseados nesta técnica foram testados para determinação de umidade de partículas de chá na faixa de aproximadamente zero a 70% (Temple, 2000). Embora uma curva de calibração com bom coeficiente de correlação tenha sido encontrada, os parâmetros ajustáveis da equação oscilavam de maneira significativa quando diferentes amostras eram testadas. A fim de corrigir este problema, foi feita uma seleção de filtros de luz que permitisse que somente a luz, refletida em comprimentos de onda absorvidos pela água fossem detectados nos sensores comerciais. A análise foi feita empregando 14 filtros a mais do que os 5 incluídos nas versões de mercado dos equipamentos acima referidos. Após esta etapa foram obtidas curvas de calibração com boa repetibilidade e com erro padrão de estimativa da ordem de 0,4% e 3% (b.u.) para medidas de umidade na faixa de 1-12% e de 1-75%, respectivamente (Temple, 2000). De maneira geral pode-se dizer que o método é instantâneo, não destrutivo e não requer contato algum entre sensor e amostra, o que o torna extremamente atrativo para o propósito de controle em secadores de ervamate.

CAPÍTULO 3 - MATERIAIS E MÉTODOS

Como citado anteriormente, este estudo é uma investigação acerca de um modelo dinâmico e de um sistema de controle de umidade de folhas de erva-mate na descarga de secadores de esteira, pois as variações de umidade do produto desidratado mostram-se consideráveis, a necessidade de se projetar um sistema de controle de umidade, melhorá-lo e ajustá-lo. Com este propósito, o Capítulo 3 apresenta a metodologia empregada para: (i) obtenção e preparação dos dados que comprovam a necessidade de controle de umidade em secadores industriais; (ii) obtenção de perfis experimentais de umidade e temperatura de folhas de erva-mate em secadores batelada de laboratório para identificação da melhor expressão empírica para os coeficientes efetivos de transferência de calor e massa; (iii) medidas experimentais de umidade e temperatura de folhas de erva-mate em secadores industriais de esteira. Estes resultados são determinantes para o desenvolvimento de um modelo matemático representativo do processo e para identificação das variáveis do modelo fenomenológico que podem e/ou devem ser manipulados em um sistema de controle.

3.1 - DADOS EXPERIMENTAIS

3.1.1 - Obtenção dos dados utilizados para comprovação ou rejeição da necessidade de um sistema de controle

Um conjunto de resultados experimentais de umidade na descarga de 13 secadores contínuos de erva-mate operando em escala industrial, os quais estão instalados em pequenas e médias indústrias localizadas no Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná, foi obtido no sentido de confirmar ou rejeitar a necessidade de implementação de um sistema de controle de umidade do produto. Apesar das diferenças usuais entre as 13 indústrias no que se refere ao tipo de secador e condições de operação, um primeiro estágio de desativação enzimática onde as folhas são alimentadas com uma umidade de aproximadamente 60 ± 5 % (b.u.) sempre foi encontrado. Embora na etapa de desativação enzimática a umidade do produto seja reduzida para até aproximadamente 25 ± 10 % (b.u.), um decréscimo ainda maior desta variável é esperado visto que todas as 13 indústrias investigadas são equipadas com

secadores rotatórios ou de esteira, onde o produto é encaminhado após o tratamento térmico preliminar para desativação das enzimas.

A fim de determinar a umidade das partículas desidratadas na saída dos secadores, amostras foram manualmente removidas do leito de secagem em intervalos regulares, de uma em uma hora, e hermeticamente embaladas para posterior análise da umidade em laboratório. O método gravimétrico convencional (*International Standards Organisation*, 1980) foi utilizado para a determinação da umidade. Aproximadamente três (3) gramas constituíam uma amostra, sendo que as mesmas eram mantidas durante vinte e quatro (24) horas em estufa (com circulação de ar) com temperatura controlada em 105°C. A umidade foi obtida dividindo-se a diferença de peso da amostra antes e depois da estufa (peso de água contida na folha) pelo peso inicial da amostra, também chamada umidade em base úmida. Um total de 21 a 24 medidas foi realizado em um período de 4 a 8 horas em cada indústria investigada.

3.1.2 - Dados obtidos em laboratório para validação do coeficiente de transferência de massa

Curvas experimentais de secagem em diferentes condições de operação foram obtidas em um secador de bandeja de laboratório a fim de definir a correlação empírica para o coeficiente efetivo de transferência de massa (Temple & van Boxtel, 1999a; Panchariya *et al.*, 2002; Zanoelo, 2007; Zanoelo *et al.*, 2007) que melhor reproduz o transporte de água a partir das folhas. Em particular, uma massa constante de folhas de erva-mate de aproximadamente $20,4 \pm 0,3$ g, com uma umidade inicial de 51 ± 10 % (base úmida) e diâmetro equivalente das partículas de 0,042 m (medida folha por folha com régua graduada) foi distribuída sobre uma bandeja metálica perfurada para formar um leito raso de partículas com altura não superior a 30 mm. Ar quente foi soprado dentro da câmara de secagem em uma velocidade constante de $0,156 \text{ m s}^{-1}$ (ver Figura 3.1), medida com o auxílio de um *medidor de velocidade do ar*, marca *Testo 405-V1 - anemômetro de fio quente*, com intervalo de medições entre 0 e 10 m s^{-1} , com precisão de $\pm 0,1 \text{ m s}^{-1}$, e em três diferentes temperaturas no intervalo de 60, 75 e 90°C, respectivamente. A temperatura interna foi monitorada por um termopar do tipo K, enquanto que a velocidade do ar foi medida com um anemômetro de fio quente previamente calibrado (Testo 405-V1). Com o auxílio de uma carta psicrométrica para

mistura ar-água e medidas simultâneas de temperatura de bulbo úmido e seco um valor da umidade absoluta do ar de aproximadamente 0,0128 g de água por grama de ar seco foi encontrado. A pressão atmosférica no dia e horário, segundo o SIMEPAR (, oscilou entre 909 e 911 hpa. A perda de massa do material foi determinada “off-line” por registro periódico do peso da bandeja com uma balança eletrônica analítica localizada fora da câmara de secagem. Apesar do erro introduzido devido a remoção das amostras da câmara de secagem para pesagem, este procedimento é considerado suficientemente rápido para assegurar reprodutibilidade das curvas de secagem (Panchariya *et al.*, 2002). Réplicas perfeitas das corridas experimentais não foram possíveis, visto que variações pequenas de umidade inicial foram detectadas. Entretanto, exceto por esta variável, quatro réplicas foram realizadas em condições idênticas de temperatura e velocidade do ar.

Devido à grande turbulência, a velocidade do ar dentro da estufa foi monitorada em intervalos regulares de 15 segundos por um período de meia hora com o anemômetro de fio quente já mencionado. A Figura 3.1 apresenta a distribuição dos valores da velocidade do ar medidos no período e o seu valor médio.

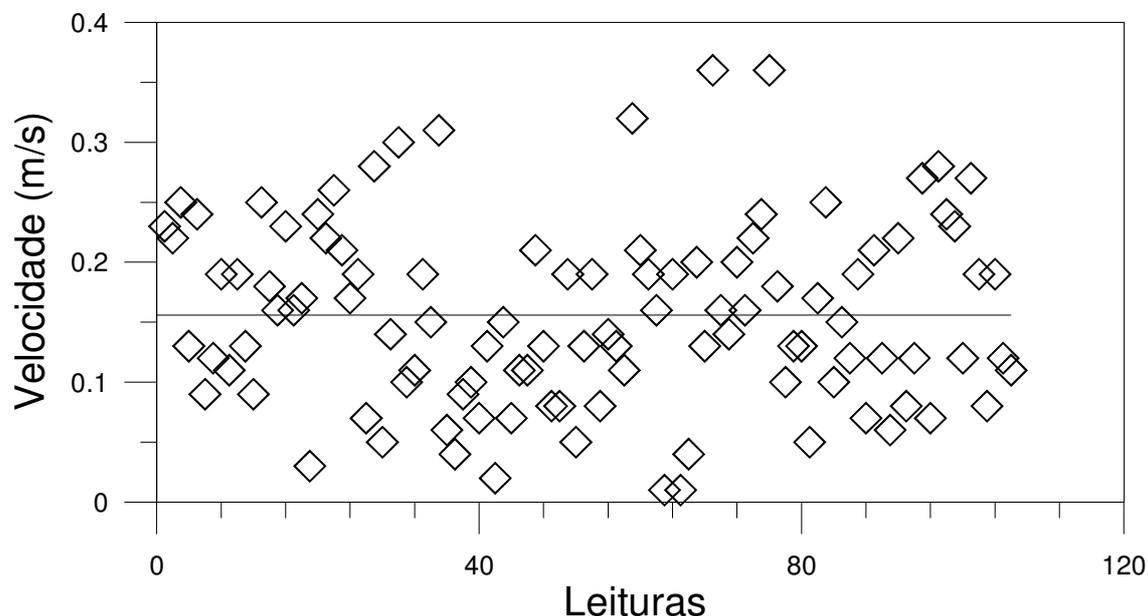


Figura 3.1 – Distribuição das medidas de velocidade do gás (ar) de secagem, em laboratório, à temperatura ambiente, dentro de uma estufa elétrica (símbolos) e média da velocidade obtida (linha).

Para se obter um perfil da temperatura do sólido, as temperaturas das folhas também foram monitoradas no mesmo intervalo de tempo utilizado para obtenção das

curvas de secagem. Um medidor de temperatura de superfícies por infravermelho, (marca TFA - *ScanTemp* 410) com intervalo de medição de temperaturas entre -33°C e $+500^{\circ}\text{C}$ e precisão de $\pm 2\%$ foi empregado. Para os propósitos deste trabalho cabe ressaltar que estes perfis de temperatura seriam úteis para validação da correlação empírica para o coeficiente efetivo de transferência de calor (Equação 2.8). Devido ao custo elevado dos medidores de umidade instantâneos, um controle inferencial baseado em medidas de temperatura do sólido poderia ser sugerido caso os perfis de temperatura possam ser estimados de forma satisfatória.

Ressalta-se novamente que a obtenção das curvas de umidade e temperatura da erva-mate durante a secagem em laboratório é de extrema importância para validação dos coeficientes efetivos de transferência de massa e calor, sem os quais a utilização do modelo para o propósito de predição e controle seria impraticável.

3.1.3 - Dados obtidos na indústria para validação do modelo matemático proposto

Como mencionado anteriormente, o modelo matemático proposto neste trabalho foi validado através de dados obtidos em uma unidade industrial de uma ervateira colaboradora durante turno normal de funcionamento. Com este propósito, perfis axiais de umidade e temperatura das folhas de erva-mate foram obtidos em um secador de esteira contínuo operando em larga escala e em estado pseudo-estacionário.

A Figura 3.2 demonstra esquematicamente o funcionamento do secador tomado como referência para as medidas de umidade e temperatura das folhas em condições reais de processamento. Em essência, este equipamento opera com duas esteiras perfuradas, feitas de metal, com 30 metros de comprimento e 4,5 metros de largura. As esteiras são dispostas uma sobre a outra e conectadas em suas extremidades a engrenagens de forma a propiciar o movimento que desloca o material entre a alimentação e a descarga. Embora as velocidades das correias pudessem ser manualmente ajustadas para obtenção de um controle empírico do processo de secagem, ambas moviam-se a uma velocidade constante de $0,004 \text{ m s}^{-1}$, o que corresponde a um tempo de residência no secador de 4 horas e 10 minutos. A esteira é alimentada com folhas na bandeja superior, com umidades de aproximadamente $33\% \pm 11\%$ em b.s., formando uma camada uniforme de sólidos aquecidos pelo ar a $59 \pm 4^{\circ}\text{C}$. Após a

passagem pelo estágio superior, o material cai por gravidade sobre a esteira inferior entrando em contato com ar a temperatura de $104 \pm 6^\circ\text{C}$.

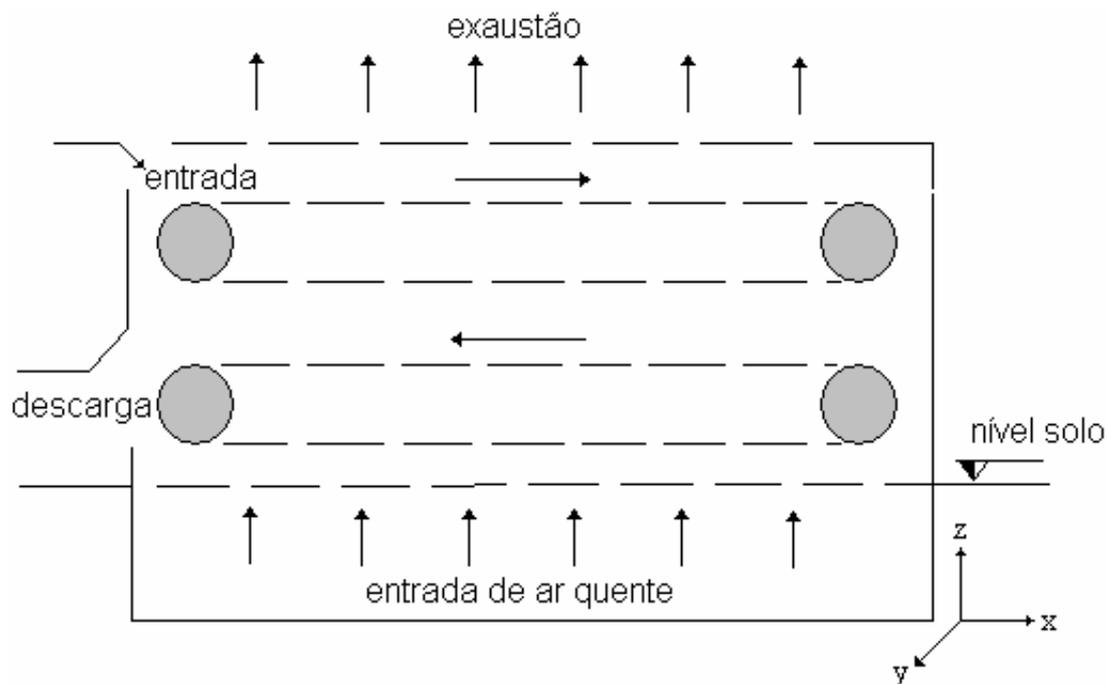


Figura 3.2 – Diagrama esquemático do secador contínuo de esteira industrial visitado, utilizado na validação do modelo matemático proposto.

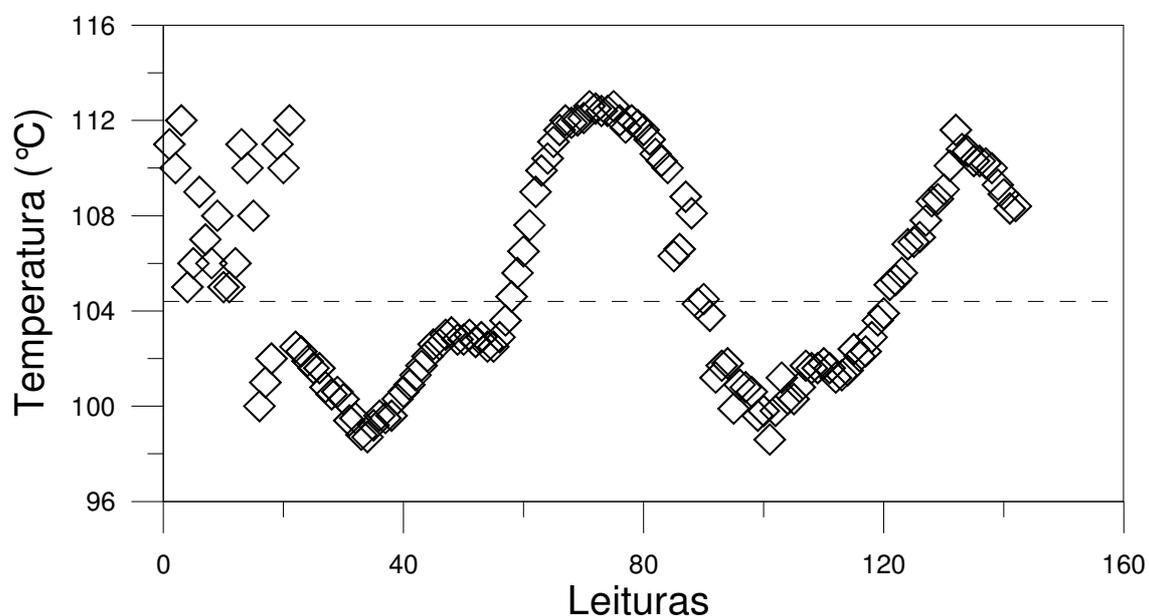


Figura 3.3 – Distribuição das medidas da temperatura de secagem (símbolos), efetuadas internamente em secador comercial, operando em uma ervateira no estado do Paraná, e a média obtida para esta variável (linha).

Ao contrário da estufa em laboratório, por se tratar de um processo dinâmico, a temperatura do ar de secagem não se mantém constante, pois não há nenhum tipo de controle atuando nesta variável, sofrendo pequenas variações ao longo da operação. Este fato motivou um monitoramento da temperatura em intervalos regulares de 15 s por um período de meia hora. Um termopar do tipo K com precisão de $\pm 0,5$ °C foi utilizado para obtenção destes valores. A Figura 3.3 apresenta a distribuição de temperatura na esteira inferior.

Um conjunto de mais de 100 leituras foi envolvido para determinação de um valor médio de velocidade do ar igual à aproximadamente $0,21$ m s⁻¹, enquanto que o desvio padrão em relação a esta média foi de $\pm 0,16$ m s⁻¹. A Figura 3.4 registra a distribuição dos valores da velocidade do ar medidos em intervalos regulares de 15 s, bem como o valor médio no período. O mesmo anemômetro de fio quente empregado para medidas de velocidade do ar em estufa de laboratório foi utilizado no secador industrial. Cabe ressaltar que foi assumido como posição de medida da velocidade um ponto próximo à exaustão do secador, devido a limitações do aparelho utilizado, o qual não suporta leituras a temperaturas superiores a 60°C.

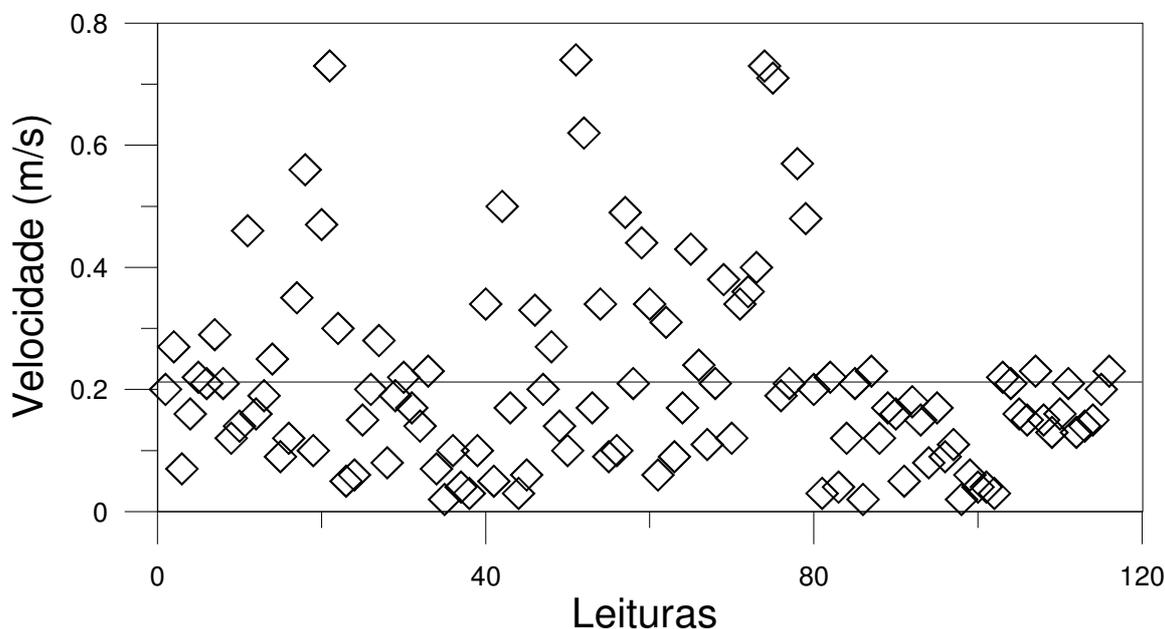


Figura 3.4 – Distribuição das medidas da velocidade do ar de secagem (símbolos), efetuadas internamente em secador comercial, e a média obtida para esta variável (linha).

A umidade inicial do produto e as condições de temperatura e velocidade do ar de secagem foram determinadas em duas diferentes visitas à mesma fábrica. Os valores

médios para estas variáveis, anteriormente mencionados, referem-se às médias de todas as medidas realizadas nas duas diferentes ocasiões. O intervalo de variação destes parâmetros de operação é fundamental para estimativa do grau de perturbação a ser imposto para estas variáveis quando da simulação do processo em malha aberta e fechada.

As medidas de umidade nas diferentes posições da esteira foram realizadas através de método gravimétrico convencional (*International Standards Organization*, 1980) envolvendo um forno mantido a temperatura constante de 105°C e uma balança digital com a precisão de 10^{-4} g. Os valores de temperatura das folhas foram determinados com o auxílio de um termômetro de infravermelho. Embora este tipo de sensor seja empregado para medidas de temperatura na superfície do produto investigado, admite-se que o valor encontrado represente satisfatoriamente a temperatura média do material, visto que gradientes internos de temperatura não são esperados devido a espessura reduzida das folhas.

Para assegurar a confiabilidade dos dados da primeira visita, 15 amostras de erva-mate foram tomadas como referência na determinação de umidade das folhas em cada posição axial. Na segunda visita somente 3 amostras foram retiradas do leito em cada ponto de amostragem ao longo da esteira, visto que nesta condição as medidas foram realizadas de forma a minimizar o efeito de variações na umidade da carga de produto alimentada. Para tal propósito, deixava-se transcorrer um período de tempo necessário para que o produto avançasse uma distância Δx , a qual separava dois pontos consecutivos de amostragem. Este tempo era facilmente calculado ao dividir-se o espaço percorrido (Δx) pela velocidade da esteira.

3.2 - MODELAGEM MATEMÁTICA

A estratégia adotada para obtenção do modelo matemático consiste na obtenção de equações de balanço para apenas uma esteira do secador (ver Figura 3.5). Esta simplificação elimina a necessidade de previsão da variação das propriedades do gás entre estágios, o que tornaria o modelo muito complexo visto que um balanço adicional de massa para a água e outro de energia na fase gás seriam requeridos.

O modelo matemático proposto envolve um balanço de massa para água e um balanço de energia em um elemento estacionário infinitesimal de volume da fase sólida

localizada sobre a esteira. Um sistema de duas equações diferenciais parciais de primeira ordem representa o modelo transiente unidirecional. O elemento de volume através do qual o ar quente está fluindo é um meio poroso com uma fase sólida representada por uma mistura da água líquida e da matéria seca. Como é aceito geralmente para secagem de camada delgada, os gradientes de umidade e as mudanças nas propriedades do ar ao longo da camada do leito foram negligenciados.

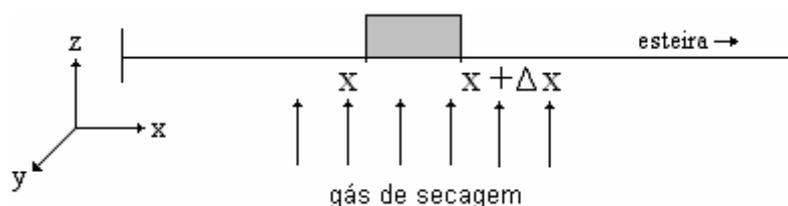


Figura 3.5 – Diagrama esquemático assumido para obtenção do modelo proposto.

Pode-se observar, conforme a figura acima, que a variação da umidade e da temperatura do sólido nas direções y e z é desprezível em relação à direção x . Já pode-se deduzir que as variáveis do processo são função do tempo e do comprimento do secador, o que foi confirmado pelas equações finais do modelo. Considerando-se apenas variações de umidade na direção x , a mudança ocorrida quando o ar atravessa o leito poroso de erva é maior do que as variações que podem ocorrer na parte superior ou inferior da esteira somente através de contato com o ar quente.

Antes de iniciar a modelagem propriamente dita, pode-se reforçar mais algumas considerações importantes:

- i) o fluxo de ar é unidirecional e transversal ao leito poroso de erva-mate;
- ii) o ar comporta-se como gás ideal;
- iii) o secador opera a pressão atmosférica;
- iv) a umidade relativa do ar é função da temperatura, da pressão e da umidade do ar antes da passagem pelo leito (M_0);
- v) dados importantes dentro do contexto do modelo, como a taxa de secagem, umidade de equilíbrio, coeficiente de transferência de massa, densidade e condutividade da erva-mate, já foram abordados no item 2.4 deste trabalho.

3.2.1 - Balanço de massa para a água contida nas folhas

Sabemos que:

$$Entra - Sai = Acúmulo \quad (3.1)$$

Com a aplicação do balanço de massa obtemos:

$$\left| (m_{ss} M) \right|_x - \left| (m_{ss} M) \right|_{x+\Delta x} - Ka_p (M - M_e) = \frac{d(\rho_{ss} V_s M)}{dt} \quad (3.2)$$

Podemos melhorar a Eq. (3.2) separando os elementos constantes:

$$\left| (m_{ss} M) \right|_x - \left| (m_{ss} M) \right|_{x+\Delta x} - Ka_p (M - M_e) = (\rho_{ss} V_s) \frac{dM}{dt} \quad (3.3)$$

O volume total de matéria-prima (V_{leito}), dentro do secador, será igual ao volume de vazios (V_v), somado ao volume de sólido (V_s). Pode-se sugerir que a porosidade do leito de erva-mate não é constante ao longo do secador, pois a medida que a matéria-prima vai secando, ocorre uma contração (acomodação das folhas) natural no volume do leito poroso. Cabe lembrar que o produto dentro do secador já passou pela etapa de desativação enzimática, pré-secagem (sapeco), conforme descrito no Item 2.2 deste trabalho, portanto esta contração nesta etapa é mínima e foi desprezada. Sendo então a porosidade (ε) considerada igual ao volume de vazios dividido pelo volume total, pode-se deduzir:

$$V_{leito} = V_v + V_s \quad (3.4)$$

$$V_v = V_{leito} - V_s \quad (3.5)$$

Como:

$$\varepsilon = \frac{V_v}{V_{leito}} \quad (3.6)$$

Substituindo (3.5) em (3.6):

$$\varepsilon = \frac{V_{leito} - V_s}{V_{leito}} \quad (3.7)$$

$$V_s = (1 - \varepsilon)V_{leito} \quad (3.8)$$

Dividindo-se a Equação (3.3) pelo volume total do leito (V_{leito}), obtemos:

$$\frac{|(m_{ss}M)|_x - |(m_{ss}M)|_{x+\Delta x}}{V_{leito}} - Ka(M - M_e) = \rho_{ss}(1 - \varepsilon) \frac{dM}{dt} \quad (3.9)$$

onde:

$$a = \frac{a_p}{V_{leito}} \quad (3.10)$$

$$(1 - \varepsilon) = \frac{V_s}{V_{leito}} \quad (3.11)$$

A vazão mássica de sólido seco (m_{ss}) pode ser considerada igual ao produto da densidade do sólido seco (ρ_{ss}) pela vazão volumétrica de sólido (Q_s):

$$m_{ss} = \rho_{ss}Q_s \quad (3.12)$$

Substituindo (3.12) em (3.9) obtemos:

$$\frac{|(\rho_{ss}Q_sM)|_x - |(\rho_{ss}Q_sM)|_{x+\Delta x}}{V_{leito}} - Ka(M - M_e) = \rho_{ss}(1 - \varepsilon) \frac{dM}{dt} \quad (3.13)$$

Sabe-se que a vazão mássica (Q_s) é igual à área efetiva da seção da amostra (A_{ss}) multiplicada pela velocidade de escoamento (u). Neste caso, a velocidade de escoamento obrigatoriamente será a mesma da correia (esteira) do secador (u_c):

$$Q_s = u_c A_{ss} \quad (3.14)$$

Substituindo (3.14) em (3.13), obtém-se:

$$\frac{(\rho_{ss} u_c A_{ss} M)|_x - (\rho_{ss} u_c A_{ss} M)|_{x+\Delta x}}{V_{leito}} - Ka(M - M_e) = \rho_{ss} (1 - \varepsilon) \frac{dM}{dt} \quad (3.15)$$

Considerando-se “x”, dimensionalmente, o eixo de evolução da esteira (ver Figura 3.5) a área da seção da amostra (A_{ss}) seria dada pela multiplicação dos eixos “y” e “z”, ou seja, o produto entre Δy e Δz , respectivamente. Conseqüentemente, o volume total da amostra (V_{leito}) seria dado pelo produto de Δx , Δy e Δz . Cabe lembrar que a área efetiva da seção de sólido propriamente dito, leva em consideração a porosidade do leito, ou seja, é igual a área inteira multiplicada pela porosidade (ε); então:

$$V_{leito} = \Delta x \Delta y \Delta z \quad (3.16)$$

$$A_{total} = \Delta y \Delta z \quad (3.17)$$

$$A_{ss} = A_{total} (1 - \varepsilon) \quad (3.18)$$

Podem-se substituir alguns termos da Equação (3.15), adequadamente, por (3.16), (3.17), e (3.18), obtendo:

$$\frac{(\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon) \Delta y \Delta z M)|_x - (\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon) \Delta y \Delta z M)|_{x+\Delta x}}{\Delta x \Delta y \Delta z} - Ka(M - M_e) = \rho_{ss} (1 - \varepsilon) \frac{dM}{dt} \quad (3.19)$$

Rearranjando os termos:

$$\rho_{ss} u_c (1 - \varepsilon) \frac{(M)|_x - (M)|_{x+\Delta x}}{\Delta x} - Ka(M - M_e) = \rho_{ss} (1 - \varepsilon) \frac{dM}{dt} \quad (3.20)$$

Aplicando Limite ($\Delta x \rightarrow 0$):

$$\left[\frac{|(M)|_x - |(M)|_{x+\Delta x}}{\Delta x} \right] = -\frac{dM}{dx} \quad (3.21)$$

Substituindo (3.21) em (3.20):

$$-\rho_{ss}u_c(1-\varepsilon)\frac{\partial M}{\partial x} - Ka(M - M_e) = \rho_{ss}(1-\varepsilon)\frac{\partial M}{\partial t} \quad (3.22)$$

Dividindo-se ambos os lados da igualdade por $\rho_{ss}(1-\varepsilon)$ obtém-se a expressão final para o balanço de massa para a água:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -u_c \frac{\partial M}{\partial x} - C_s(M - M_e) \quad (3.23)$$

Onde,

$$C_s = \frac{Ka}{(1-\varepsilon)\rho_{ss}} \quad (3.24)$$

3.2.2 - Balanço de energia na fase sólida do secador

Partindo da mesma afirmação feita pela Equação (3.1), obtemos:

$$\begin{aligned} & |m_{ss}Cp_{ss}(T - T_r) + m_{ss}MCp_l(T - T_r)|_x - |m_{ss}Cp_{ss}(T - T_r) + m_{ss}MCp_l(T - T_r)|_{x+\Delta x} + \\ & + ha_p(T_g - T) - Ka_p(M - M_e)[Cp_g(T_g - T) + \Delta Hv] = \quad (3.25) \\ & = \frac{d\{\rho_{ss}V_s[Cp_{ss}(T - T_r) + MCp_l(T - T_r)]\}}{dt} \end{aligned}$$

Dividindo-se a Eq. (3.25) pelo volume total do leito (V_{leito}), e substituindo adequadamente seus respectivos termos pelas equações (3.8), (3.12) e (3.14), chega-se a:

$$\left. \frac{\rho_{ss} u_c A_{ss} C_{p_{ss}} T + \rho_{ss} u_c A_{ss} M C_{p_l} T}{V_{leito}} \right|_x - \left. \frac{\rho_{ss} u_c A_{ss} C_{p_{ss}} T + \rho_{ss} u_c A_{ss} M C_{p_l} T}{V_{leito}} \right|_{x+\Delta x} + \quad (3.26)$$

$$+ ha(T_g - T) - Ka(M - M_e)[C_{p_g}(T_g - T) + \Delta H_v] = \frac{d[\rho_{ss}(1-\varepsilon)(C_{p_{ss}}T + M C_{p_l}T)]}{dt}$$

Utilizando as equações (3.16), (3.17) e (3.18), obtemos:

$$\left. \frac{\rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z C_{p_{ss}} T + \rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z M C_{p_l} T}{\Delta x \Delta y \Delta z} \right|_x + ha(T_g - T) +$$

$$- \left. \frac{\rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z C_{p_{ss}} T + \rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) \Delta y \Delta z M C_{p_l} T}{\Delta x \Delta y \Delta z} \right|_{x+\Delta x} - Ka(M - M_e) \quad (3.27)$$

$$[C_{p_g}(T_g - T) + \Delta H_v] = \rho_{ss}(1-\varepsilon) \frac{d[(C_{p_{ss}} + M C_{p_l})T]}{dt}$$

Rearranjando os termos e aplicando limite ($\Delta x \rightarrow 0$), obtemos:

$$- \rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) C_{p_{ss}} \frac{\partial T}{\partial x} - \rho_{ss} u_c (1-\varepsilon) C_{p_l} \frac{\partial(TM)}{\partial x} + ha(T_g - T) - Ka(M - M_e) \quad (3.28)$$

$$[C_{p_g}(T_g - T) + \Delta H_v] = \rho_{ss}(1-\varepsilon) \frac{\partial[(C_{p_{ss}} + M C_{p_l})T]}{\partial t}$$

Dividindo-se, para simplificação, ambos os lados da equação acima $\rho_{ss}(1-\varepsilon)$ resulta:

$$- u_c C_{p_{ss}} \frac{\partial T}{\partial x} - u_c C_{p_l} M \frac{\partial T}{\partial x} - u_c C_{p_l} T \frac{\partial M}{\partial x} + h_m(T_g - T) - C_s(M - M_e) \quad (3.29)$$

$$.[C_{p_g}(T_g - T) + \Delta H_v] = (C_{p_{ss}} + C_{p_l}M) \frac{\partial T}{\partial t} + (C_{p_l}T) \frac{\partial M}{\partial t}$$

Onde, $h_m = \frac{h_a}{\rho_{ss}(1-\varepsilon)}$;

Rearranjando os termos:

$$\begin{aligned}
 -u_c(Cp_{ss} + MCp_l)\frac{\partial T}{\partial x} + h_m(T_g - T) - C_s(M - M_e)[Cp_g(T_g - T) + \Delta H_v] = \\
 (3.30) \\
 = (Cp_{ss} + Cp_l M)\frac{\partial T}{\partial t} + (Cp_l T)(u_c \frac{\partial M}{\partial x} + \frac{\partial M}{\partial t})
 \end{aligned}$$

Substituindo a Equação (3.23), obtida no balanço de massa anterior, na equação (3.30) chegamos à expressão final do balanço de energia na fase sólida do secador:

$$\begin{aligned}
 -u_c(Cp_{ss} + MCp_l)\frac{\partial T}{\partial x} + h_m(T_g - T) - C_s(M - M_e)[Cp_g(T_g - T) + \Delta H_v - Cp_l T] = \\
 (3.31) \\
 = (Cp_{ss} + Cp_l M)\frac{\partial T}{\partial t}
 \end{aligned}$$

3.2.3 - Modelo matemático para secadores de esteira de leito raso em regime transiente

As equações (3.32) e (3.33), resultantes da aplicação dos balanços de massa e energia, respectivamente, representam duas equações diferenciais parciais (EDP's) e são propostas como modelo matemático, pois simulam o comportamento das folhas de erva-mate em um processo de secagem em secador de camada delgada.

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -u_c \frac{\partial M}{\partial x} - C_s(M - M_e) \quad (3.32)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} = u_c \frac{\partial T}{\partial x} - \frac{C_s(M - M_e)}{(Cp_{ss} + Cp_l M)} [Cp_g(T_g - T) + \Delta H_v - Cp_l T] + \frac{h_m(T_g - T)}{(Cp_{ss} + Cp_l M)} \quad (3.33)$$

Na Equação (3.32), o soluto entra ou deixa o volume de controle por meio do movimento total da bandeja que suporta o leito raso de folhas, bem como por difusão interna da água líquida para a superfície da partícula e por convecção da superfície do

material para a atmosfera de secagem (Zanoelo, 2007). Estes aspectos fenomenológicos são descritos pelo primeiro e segundo termos no lado direito da Equação (3.32), respectivamente. No que se refere à Equação (3.33), pode-se dizer simplificadaamente que o primeiro termo do lado direito da igualdade representa a energia que entra ou deixa o volume de controle por movimento da esteira, enquanto que o segundo termo indica a perda de energia por troca de calor sensível e latente entre a água e o meio de aquecimento. O último termo da referida expressão descreve a taxa de transferência de calor por convecção no processo de transmissão de calor do ar quente para o material sólido.

Um ponto importante a mencionar no que se refere a solução do modelo é que a equação semi-empírica de Lewis (Wiriyampaiwong *et al.*, 2004; Tang *et al.*, 2005; Zanoelo *et al.*, 2006) expressa um caso especial do presente balanço de massa, isto é quando a umidade é constante em relação à posição axial. Conseqüentemente, o termo inteiro que multiplica a diferença entre o material e a umidade de equilíbrio é a constante de secagem que aparece no modelo de Lewis (C_s). Este parâmetro, o qual é definido na Equação (3.24) é indicado como um coeficiente efetivo ou aparente, porque representa uma combinação entre a barreira interna e superficial para transferência de massa.

A grande contribuição desta constatação é que a constante de secagem do modelo de Lewis foi previamente determinada para folhas de erva-mate em leito fixo (Equação 2.9) e fluidizado (Equação 2.7), assim como para folhas de chá em secadores de camada delgada (Equações 2.5 e 2.6). Todos os parâmetros das expressões empíricas para a constante de secagem foram calculados através das curvas de secagem experimentais obtidas em condições de operação definidas na Tabela 3.1.

Tabela 3.1. Condições de operação utilizadas no procedimento de ajuste das equações empíricas para a constante da secagem do modelo de Lewis.

Equação	u_g (m s⁻¹)	T_g (°C)	d_s (m)	Referência
2.9	0,082-1,12	50-103	0,03	Zanoelo <i>et al.</i> (2007)
2.7	0,6-1,0	50-100	$5,2 \times 10^{-3}$ - $1,1 \times 10^{-2}$	Zanoelo (2007)
2.5	0,048-0,63	50-150	5×10^{-4}	Temple & van Boxtel (1999a)
2.6	0,25-0,65	80-120	5×10^{-4}	Panchariya <i>et al.</i> (2002)

3.2.4 - Modelo matemático para secadores de esteira de leito raso em regime permanente

$$\frac{dM}{dx} = -\frac{C_s(M - M_e)}{u_c} \quad (3.34)$$

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{C_s(M - M_e)[Cp_g(T_g - T) + \Delta H_V - Cp_l T] + h_m(T_g - T)}{u_c(Cp_{ss} + Cp_l M)} \quad (3.35)$$

3.2.5 - Solução analítica em regime permanente para a equação de umidade

A Equação (3.34) é uma EDO separável de primeira ordem e, portanto, uma solução analítica pode ser obtida prontamente por integração:

$$\int \frac{dM}{M - M_e} = -\frac{C_s}{u_c} \int dx \quad (3.36)$$

$$M - M_e = c' \exp(-C_s x / u_c) \quad (3.37)$$

Aplicando a condição de contorno definida na entrada do secador, onde $M = M_0$ em $x = 0$, obtém-se finalmente uma expressão algébrica que satisfaz a Equação (3.34):

$$\frac{M - M_e}{M_0 - M_e} = \exp\left(-\frac{C_s x}{u_c}\right) \quad (3.38)$$

ou,

$$M(x) = (M_0 - M_e) \exp\left(-\frac{C_s x}{u_c}\right) + M_e$$

3.2.6 - Solução numérica do modelo de secagem em regime transiente

Como pode-se observar, as simplificações possíveis no modelo matemático proposto foram efetuadas com critério. O uso de modelos muito simplificados pode resultar numa redução no tempo de simulação computacional, entretanto, dependendo do cenário simulado, pode reduzir também a acurácia dos resultados. Por outro lado,

modelos mais complexos podem exigir um considerável esforço computacional na solução dos sistemas de equações diferenciais parciais que descrevem o comportamento dinâmico do processo e de seus componentes, sendo que esta complexidade pode ser desnecessária para certos cenários (Paz, 2004).

Diferentes métodos foram utilizados na tentativa de resolver as equações diferenciais apresentadas: separação de variáveis, transformada de Laplace e diferenças finitas. Tentou-se a solução por *separação de variáveis* (relativamente mais simples) exaustivamente, porém este método foi descartado, pois após a aplicação das condições de contorno obtinha-se sempre uma solução em função somente de x (posição ao longo da esteira) e nunca em função de t (tempo). De forma análoga, a solução por transformada de Laplace, mostrou-se infrutífera, pois reproduzia os diferentes estados permanentes após determinadas perturbações, porém não representava a transição entre estes estados.

Neste contexto o sistema de equações diferenciais parciais unidimensionais e em estado transiente (Equações 3.32 e 3.33) foi resolvido através do método numérico das linhas envolvendo uma fórmula implícita de diferenças finitas (BDF), de primeira ordem, para aproximação das derivadas no espaço e no tempo. Uma descrição detalhada do procedimento empregado é apresentada para a solução da Equação (3.32), a qual pode ser resolvida isoladamente. O mesmo procedimento aplica-se para a Equação 3.33, porém neste caso o acoplamento da equação representando o balanço de massa e energia se faz necessária.

Na primeira tentativa de solucionar o modelo obtido, foi feita a adimensionalização da equação diferencial, admitindo-se:

$$\text{a) Variáveis adimensionais: } MR = \frac{M - M_e}{M_0 - M_e} \quad (3.39)$$

$$\begin{aligned} \text{b) Condições de contorno: } \quad x = 0 &\rightarrow MR = 1,0 \\ t = 0 &\rightarrow \text{Regime permanente } (C_{si} = C_s; u_c = u_{ci}) \end{aligned}$$

$$MR = \exp\left(-\frac{C_{si}x}{u_{ci}}\right) = f(x)$$

De acordo com a Equação (3.32), temos:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -u_c \frac{\partial M}{\partial x} - C_s(M - M_e)$$

Na Equação (3.39), podemos isolar M , da seguinte maneira:

$$M = MR(M_0 - M_e) + M_e \quad (3.40)$$

Substituindo a Equação (3.40) na Equação (3.32), obtemos:

$$\frac{\partial MR}{\partial t}(M_0 - M_e) = -u_c(M_0 - M_e) \frac{\partial MR}{\partial x} - C_s MR(M_0 - M_e) - C_s M_e + C_s M_e \quad (3.41)$$

Fazendo as simplificações possíveis em (3.41) chegamos a Equação adimensional em MR :

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = -u_c \frac{\partial MR}{\partial x} - C_s MR \quad (3.42)$$

A partir da Equação adimensional em M , para solucionar numericamente o problema, fez-se uso primeiramente do método BDF (*Backward Differentiation Formula*) de 1ª ordem implícito, finalizando com o Método das Linhas; da seguinte maneira:

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = -u_c \frac{\partial MR}{\partial(zL)} - C_s MR \quad (3.43)$$

$$\frac{\partial MR}{\partial t} = -\frac{u_c}{L} \frac{\partial MR}{\partial z} - C_s MR \quad (3.44)$$

Onde: $z = \frac{x}{L}$;

Admitindo: $i \rightarrow f(\text{tempo}) \rightarrow i = t_i / \Delta t$;

$j \rightarrow f(\text{posição adimensional}) \rightarrow j = z_j / \Delta z$;

$$\left. \frac{\partial MR}{\partial t} \right|_{i+1, j+1} = \frac{MR(i+1, j+1) - MR(i, j+1)}{\Delta t} \quad \text{BDF 1ª ordem implícito} \quad (3.45)$$

$$\left. \frac{\partial MR}{\partial z} \right|_{i+1, j+1} = \frac{MR(i+1, j+1) - MR(i+1, j)}{\Delta z} \quad \text{BDF 1ª ordem implícito} \quad (3.46)$$

Substituindo as equações (3.45) e (3.46), respectivamente, em (3.44), obtemos:

$$\frac{MR(i+1, j+1) - MR(i, j+1)}{\Delta t} = -\frac{u_c}{L} \left[\frac{MR(i+1, j+1) - MR(i+1, j)}{\Delta z} \right] - C_s MR(i+1, j+1)$$

$$MR(i+1, j+1) - MR(i, j+1) = -\frac{u_c}{L} \frac{\Delta t}{\Delta z} [MR(i+1, j+1) - MR(i+1, j)] - C_s \Delta t MR(i+1, j+1) \quad (3.47)$$

Fazendo: $\alpha = \frac{u_c \Delta t}{L \Delta z}$;
 $\beta = C_s \Delta t$.

Podemos efetuar as substituições adequadamente, resultando:

$$MR(i+1, j+1) - MR(i, j+1) = -\alpha [MR(i+1, j+1) - MR(i+1, j)] - \beta MR(i+1, j+1)$$

$$MR(i+1, j+1)(1 + \alpha + \beta) - MR(i, j+1) - \alpha MR(i+1, j) = 0 \quad (3.48)$$

A Figura 3.6 mostra o domínio de integração com duas divisões na direção temporal ($i=2$) e quatro na direção axial ($j=4$). Esta malha grosseira permite a obtenção dos perfis ao longo da esteira (j variando de 1 a 5) no instante t_2 e t_3 por solução manual, para posterior comparação com resultados obtidos através do código computacional, admitindo a mesma malha. Este procedimento foi utilizado para reduzir a possibilidade de erros na implementação da rotina de cálculo computacional.

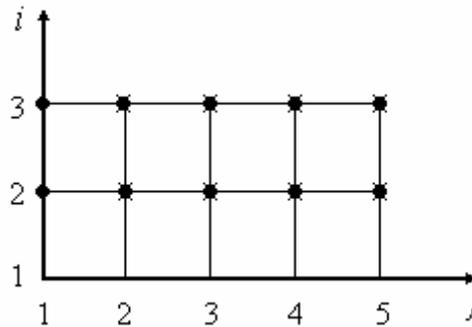


Figura 3.6 – Intervalos assumidos para se obter a solução numérica do modelo através do método das linhas.

Assumindo:

$$i = 1 \text{ e, } j = 1 \rightarrow MR(2,2)(1 + \alpha + \beta) - MR(1,2)^{Cl} - \alpha MR(2,1)^{CA} = 0 ;$$

$$j = 2 \rightarrow MR(2,3)(1 + \alpha + \beta) - MR(1,3)^{Cl} - \alpha MR(2,2) = 0 ;$$

$$j = 3 \rightarrow MR(2,4)(1 + \alpha + \beta) - MR(1,4) - \alpha MR(2,3) = 0 ;$$

$$j = 4 \rightarrow MR(2,5)(1 + \alpha + \beta) - MR(1,5) - \alpha MR(2,4) = 0 .$$

$$i = 2 \text{ e, } j = 0 \rightarrow MR(3,2)(1 + \alpha + \beta) - MR(2,2) - \alpha MR(3,1) = 0 ;$$

$$j = 1 \rightarrow MR(3,3)(1 + \alpha + \beta) - MR(2,3) - \alpha MR(3,2) = 0 ;$$

$$j = 2 \rightarrow MR(3,4)(1 + \alpha + \beta) - MR(2,4) - \alpha MR(3,3) = 0 ;$$

$$j = 3 \rightarrow MR(3,5)(1 + \alpha + \beta) - MR(2,5) - \alpha MR(3,4) = 0 .$$

Utilizando-se a Equação (3.48), foi implementada uma rotina computacional em linguagem FORTRAN para solução das equações e simulação virtual do problema, com o objetivo de compará-la mais adiante aos perfis de umidade e temperatura do sólido obtidos em laboratório e em secador comercial.

Após algumas simulações em computador surgiu uma importante constatação. Observou-se a impossibilidade desta solução perceber variações na umidade inicial da matéria-prima. Como relatado pela própria indústria ervateira e constatado através de dados apresentados no Capítulo 4, a umidade inicial do produto constitui uma das perturbações mais significativas do processo.

Analogamente a tudo que foi descrito nos últimos parágrafos, a segunda e definitiva solução numérica do balanço de massa foi obtida assumindo-se como resposta M e não MR (umidade simplificada), como informado na Figura 3.7:

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -u_c \frac{\partial M}{\partial(zL)} - C_s(M - M_e) \quad (3.49)$$

$$\frac{\partial M}{\partial t} = -\frac{u_c}{L} \frac{\partial M}{\partial z} - C_s(M - M_e) \quad (3.50)$$

Onde: $z = \frac{x}{L}$;

$$x = zL$$

Assumindo: $i \rightarrow f(\text{tempo}) \rightarrow i = t_i / \Delta t$;

$$j \rightarrow f(\text{posição adimensional}) \rightarrow j = z_i / \Delta z$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial t} \right|_{i+1, j+1} = \frac{M(i+1, j+1) - M(i, j+1)}{\Delta t} \quad \text{BDF 1ª ordem implícito} \quad (3.51)$$

$$\left. \frac{\partial M}{\partial z} \right|_{i+1, j+1} = \frac{M(i+1, j+1) - M(i+1, j)}{\Delta z} \quad \text{BDF 1ª ordem implícito} \quad (3.52)$$

Substituindo as equações (3.51) e (3.52), respectivamente, em (3.50), obtemos:

$$\frac{M(i+1, j+1) - M(i, j+1)}{\Delta t} = -\frac{u_c}{L} \left[\frac{M(i+1, j+1) - M(i+1, j)}{\Delta z} \right] - C_s M(i+1, j+1) + C_s M_e$$

$$M(i+1, j+1) - M(i, j+1) = -\frac{u_c}{L} \frac{\Delta t}{\Delta z} [M(i+1, j+1) - M(i+1, j)] - C_s \Delta t M(i+1, j+1) + C_s \Delta t M_e \quad (3.53)$$

Novamente: $\alpha = \frac{u_c \Delta t}{L \Delta z}$;

$$\beta = C_s \Delta t .$$

Podemos efetuar as substituições adequadamente, resultando:

$$M(i+1, j+1)(1 + \alpha + \beta) - M(i, j+1) - \alpha M(i+1, j) - \beta M_e = 0 \quad (3.54)$$

Finalmente:

$$M(i+1, j+1) = \frac{M(i, j+1) + \alpha M(i+1, j) + \beta M_e}{(1 + \alpha + \beta)} \quad (3.55)$$

Aplicando-se este último procedimento, porém com uso da solução numérica correspondente a Equação (3.55), foi implementada uma rotina computacional, em linguagem FORTRAN, que simula o processo de secagem de erva-mate em secadores contínuos de esteira (leito fluidizado).

3.3 - PROJETO DO CONTROLADOR

Apresentou-se um modelo transiente de secagem e o procedimento matemático para resolvê-lo, a etapa subsequente foi projetar um sistema de controle para manter a umidade na descarga dentro de uma faixa próxima aos valores do set-point, apesar das perturbações na carga. Em especial, as variações de umidade da erva-mate na alimentação, da temperatura e da velocidade do ar de secagem foram consideradas os agentes responsáveis pelas saídas da condição desejada. A umidade na descarga de um secador contínuo pode ser controlada pela manipulação da velocidade da esteira, para dar às folhas de erva-mate o tempo de residência desejado. A variável manipulada manteve-se restrita a faixa de 0,0 e 0,1 m s⁻¹.

Um controlador proporcional-integral-derivativo (PID), o qual é usado quase que exclusivamente em variadores de velocidade acoplados a esteiras (Barton e Lewin, 2000), foi testado virtualmente na presente investigação. A ação proporcional acelera a resposta do processo controlado; a ação integral elimina o *off-set* e a ação derivativa antecipa erros futuros, introduz ações de controle mais rápidas e possui efeito estabilizante na resposta em malha fechada, ou seja, permite uso de ganhos proporcionais mais altos (Seborg *et al.*, 1989).

O controlador PID oferece maior flexibilidade para atingirmos a resposta desejada, pois tem três parâmetros ajustáveis – ganho proporcional, tempos integral e derivativo, o que ao mesmo tempo leva a um problema de sintonia mais difícil. Como já observado em um trabalho similar disponível na literatura (Temple *et al.*, 2000) para o controle de secadores de chá, o ajuste preliminar do controlador, de forma a obter uma resposta ótima para o processo controlado, determinado pelos métodos de Cohen e Coon e de Ziegler-Nichols (Seborg *et al.*, 1989) não foi possível nesta escala de circunstâncias verificadas. No método empírico de Cohen e Coon não foi possível traçar uma reta tangente com confiança, devido a imprecisão do ponto de inflexão. O degrau efetuado no processo em malha aberta (desconectado o controlador e o elemento final de controle) originou uma curva de reação extremamente íngreme e praticamente linear. Já no método de Ziegler-Nichols, não foram encontrados valores de ganho crítico e do período crítico de oscilação capazes de gerar valores para o ganho, tempos integral e derivativo que pudessem estabilizar o sistema em torno do *set-point*.

Conseqüentemente, os parâmetros do controlador PID (ganho proporcional, tempos integral e derivativo) foram ajustados aplicando-se um método de otimização baseado na minimização da integral dos desvios ao quadrado (ISE), conforme Equação (3.56). A forma da resposta em malha fechada, desde o tempo $t = 0$, até se atingir o estado estacionário, pode ser utilizada na formulação de um critério de desempenho baseado na resposta dinâmica. Este critério leva em consideração todo o período de resposta do sistema de controle, diferentemente dos critérios simples que usam características isoladas da resposta dinâmica, como razão de declínio, tempo de assentamento, etc.

$$ISE = \int_0^t [\epsilon(t)]^2 dt \quad (3.56)$$

Depois de selecionado o tipo de controlador, pode-se ajustar os parâmetros de forma a minimizar o *ISE*. Durante o procedimento de ajuste a simulação de secagem começa com o leito vazio. Então, as folhas de mate, com umidade de 0.33 em b.s., são alimentadas continuamente em um único secador de esteira, com 10 m de comprimento, onde ar quente a 104 °C entra no leito movendo-se a velocidade de 0,26 m s⁻¹. Nesta condição inicial de estado estacionário, a velocidade da bandeja é ajustada em 0,1 m s⁻¹

para dar às folhas um tempo de residência de somente 100 s e uma umidade constante na descarga de aproximadamente 25% (b.s.). Uma vez estabilizado o secador, uma diminuição de 88 % no *set-point* é imposta depois de decorridos estes 100 s.

Uma comparação das respostas de umidade na descarga em malha aberta e fechada frente a mudanças aleatórias nas três variáveis que perturbam o processo, em termos de frequência e magnitude, foi realizada para verificar o desempenho do controlador PID. A Figura 3.7 ilustra a simulação do processo em malha fechada, e apresenta o algoritmo utilizado para obtenção de valores de umidade na descarga de secadores em malha fechada.

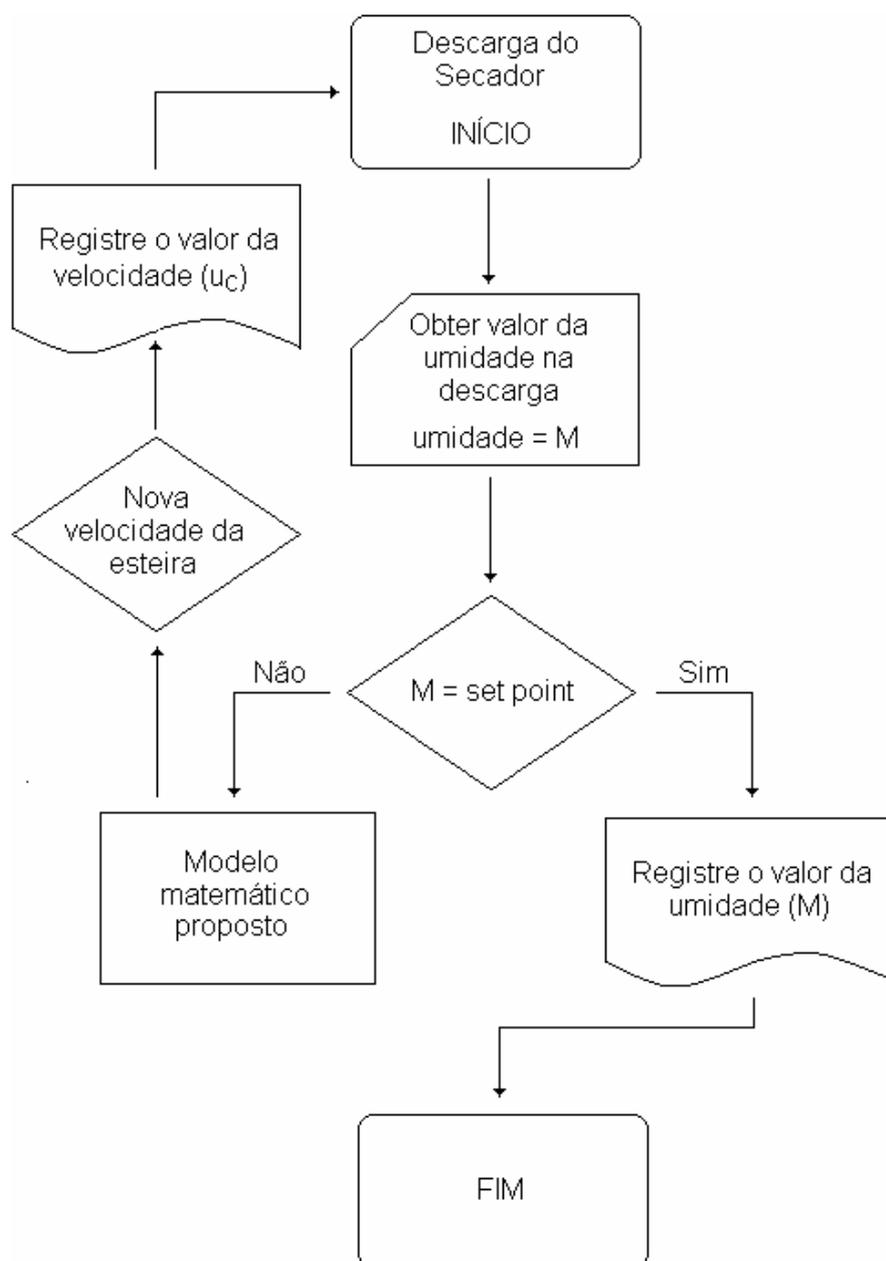


Figura 3.7 – Algoritmo utilizado para desenvolvimento de uma rotina em linguagem FORTRAN para solução e simulação do processo em malha fechada, fazendo uso do modelo proposto.

CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta a confrontação dos resultados obtidos, em laboratório e na indústria, com dados gerados exclusivamente pelo modelo fenomenológico proposto. As simulações realizadas nesta investigação foram conduzidas assumindo-se condições de operação diferentes, conforme descrito nos capítulos anteriores, de acordo com cada caso: em estufa de laboratório e, em secadores comerciais (indústria paranaense). Resumidamente, os perfis de umidade e temperatura do sólido, obtidos caso a caso, são comparados com aqueles gerados pelo modelo matemático em condições de operação semelhantes e apresentados nos itens seguintes.

4.1 - NECESSIDADE DE CONTROLE DA UMIDADE NA DESCARGA DE SECADORES INDUSTRIAIS

Na ausência de uma legislação brasileira específica, em termos de limites comerciais para a umidade das folhas do mate (ANVISA, 2005) e depois de considerar que o limite superior aceitável para as folhas secas embaladas de mate na Argentina (9,5%) não é bastante restritivo (INYM, 2002), os limites fornecidos para o chá (*Camellia sinensis*) foram utilizados (Temple e van Boxtel, 2000). Cabe lembrar, baseado em critérios técnicos, que um intervalo de umidade para a erva-mate entre 2,5 e 3,5 % (b.u.) é indicado na saída dos secadores. De acordo com a literatura (Temple e van Boxtel, 2000) um intervalo, bem abaixo da máxima umidade permitida em chás empacotados (7 % base úmida) foi definida porque durante a classificação dos chás e empacotamento a adsorção de água devido à umidade do ar pode elevar a umidade de 3% para bem acima de níveis aceitáveis como de 7 %. Como as umidades de equilíbrio para folhas de chá e de mate em temperatura ambiente são muito similares, estima-se que a mesma quantidade de água é adsorvida por ambos os materiais.

A Figura 4.1 apresenta os resultados experimentais de umidade de folhas de erva-mate na descarga de diferentes secadores industriais. De acordo com os valores médios, somente as folhas de erva-mate processadas pelas fábricas 5 e 8 apresentam umidades dentro do intervalo de 2,5 a 3,5 % (b.u.), enquanto todas as outras obtiveram um produto final excedendo o limite superior desta faixa. Um cenário ainda mais

negativo é observado quando o desvio padrão em relação a umidade média em cada indústria é levado em consideração. Neste caso, somente a companhia 5 conseguiu produzir folhas secas de mate de acordo com o nível esperado para a umidade na descarga, mantendo um desvio padrão aceitável. De acordo com a suspeita inicial que motivou este trabalho, a maioria das empresas não desidrata adequadamente e/ou possui uma distribuição muito ampla de valores de umidade na descarga do secador em um mesmo turno de operação. Tais dados comprovam que há necessidade de uma melhora no controle do secador, o que poderia trazer benefícios em termos de consumo de energia e qualidade do produto final.

Dois aspectos tecnológicos negativos destacam-se prontamente quando a umidade na descarga de secadores comerciais não é controlada, como relatado na Figura 4.1. A primeira grande desvantagem, que não é evidenciada nesta investigação, é o desnecessário consumo de energia causada pela redução ocasional e recorrente da umidade muito além de seu limite inferior. Em contrapartida, a remoção insuficiente de água, observada claramente na Figura 4.1, evita a inativação de enzimas e a estabilização completa do produto no armazenamento, o que poderia resultar em uma concentração excessiva de compostos fenólicos oxidados tais como os taninos, os quais são espécies químicas associadas com a cor marrom e o gosto amargo do licor do mate (Cheftel e Cheftel, 1992).

Apesar da gravidade de ambos estes problemas, seus impactos no valor do produto final são drasticamente diferentes e podem explicar os resultados não-conservadores mostrados na Figura 4.1. Uma desidratação excessiva é sentida prontamente, pois afeta imediatamente o consumo de energia e aumenta o custo de produção, já uma remoção insuficiente de água das folhas tem um efeito negativo na qualidade, cujo controle é um benefício em longo prazo. Em resumo, na ausência de uma legislação nacional específica em termos de umidade para as folhas embaladas de mate ou de um sistema de gerência da qualidade tal como ISO 9000 a ser atendido, fabricantes de erva-mate, preferem minimizar o uso da energia na secagem a ter que melhorar a qualidade para obterem produtos adicionais de valor elevado.

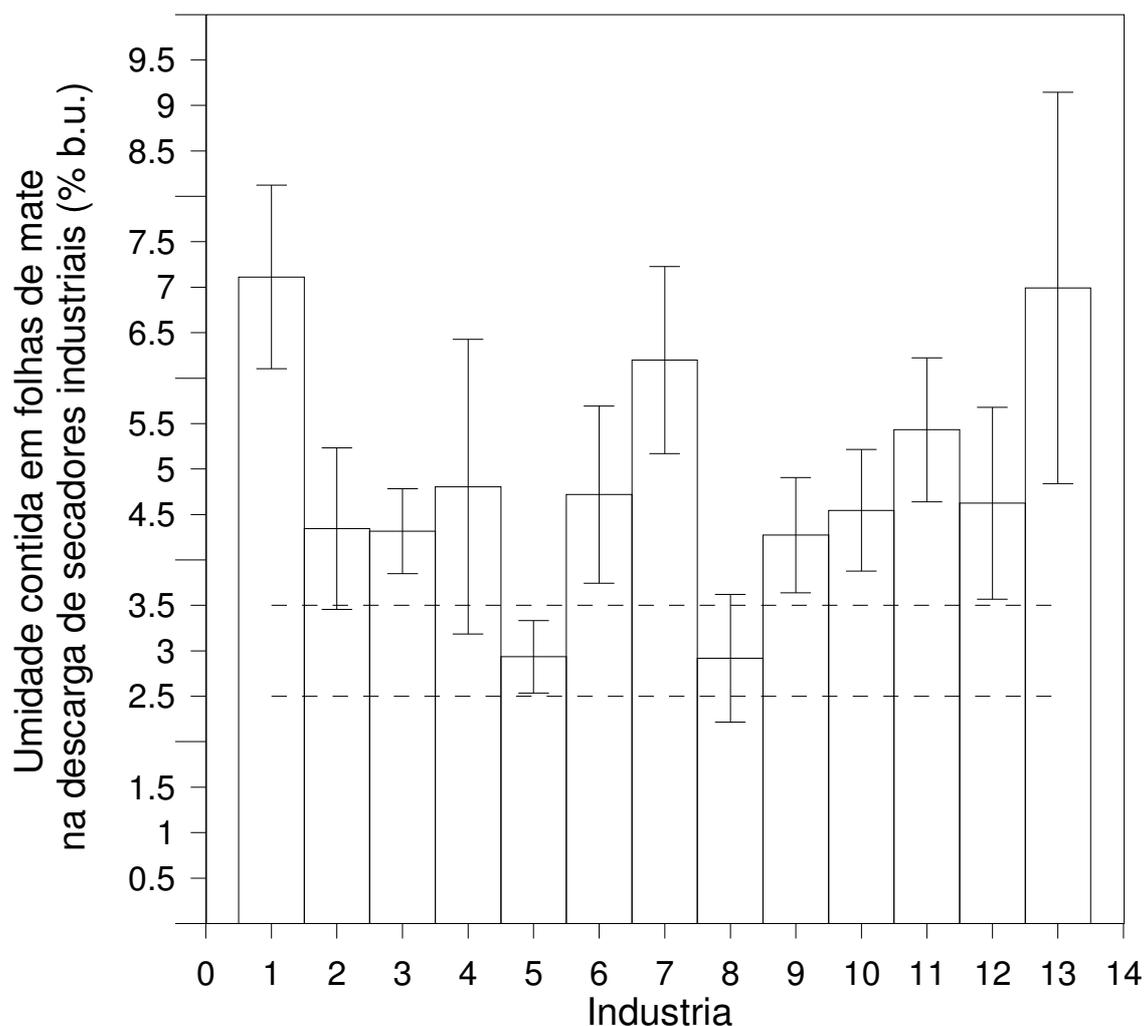


Figura 4.1. Umidade média, durante um dia de operação, na descarga de treze secadores industriais contínuos rotatórios ou de esteira para folhas de mate (barras) e o desvio padrão (linhas).

4.2 - VALIDAÇÃO DO COEFICIENTE DE TRANSFERÊNCIA DE MASSA E DO MODELO MATEMÁTICO

Como já fora mencionado, equações empíricas diferentes para determinação do coeficiente de transferência de massa foram acopladas ao modelo de secagem para simular a perda de massa durante a desidratação das folhas do mate em um secador de bandeja em laboratório nas temperaturas de 60, 75 e 90°C. A validade destas expressões foi verificada por comparação entre as curvas de secagem experimentais e calculadas.

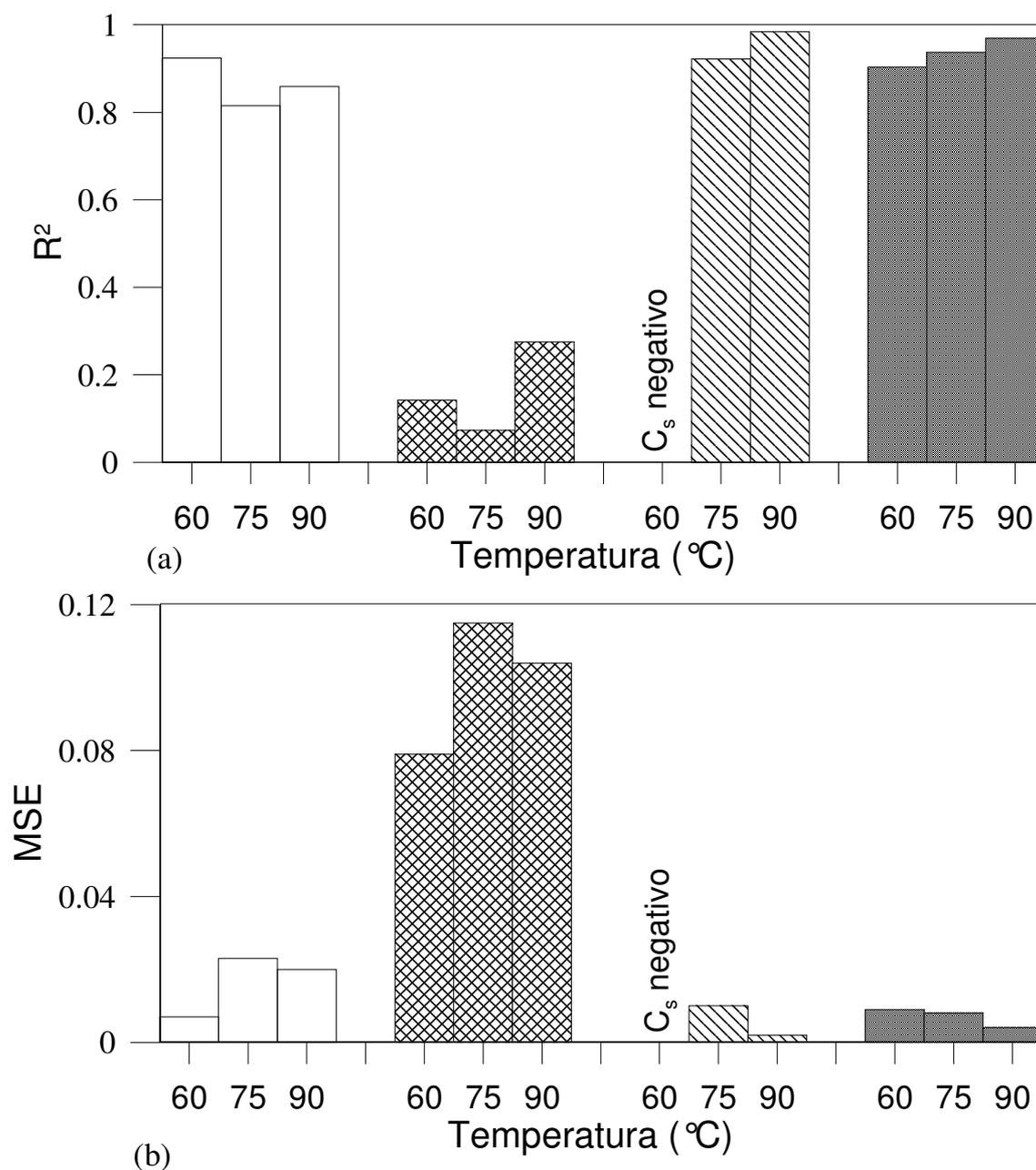


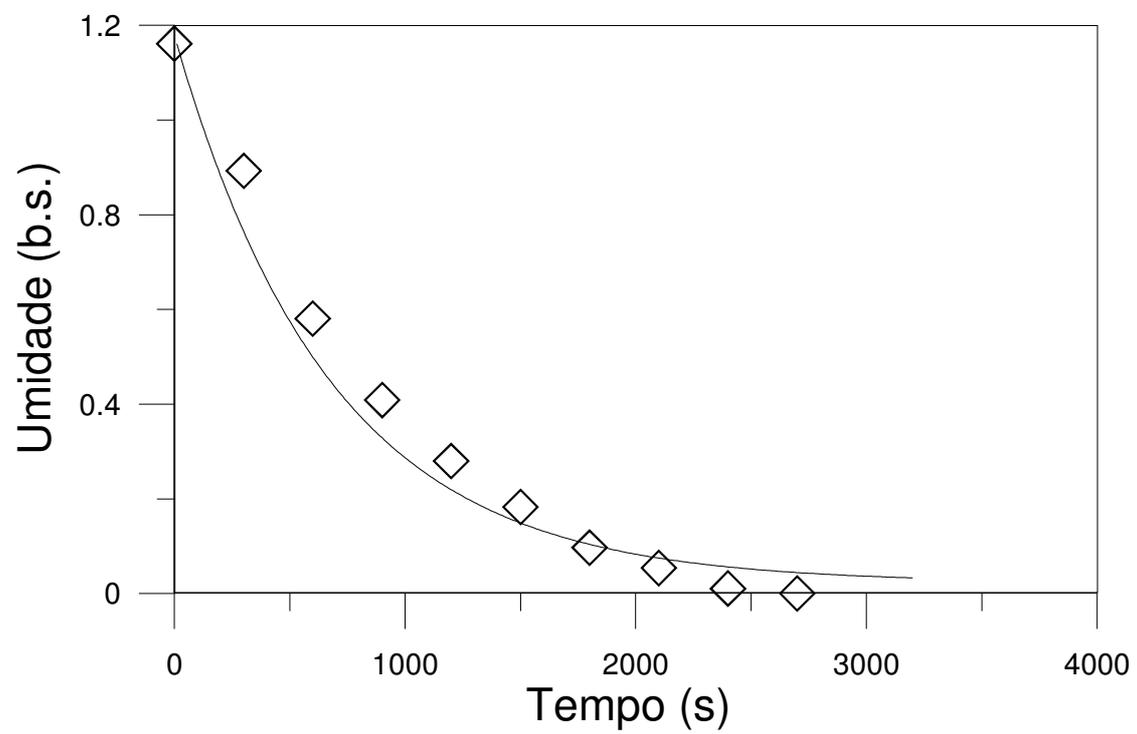
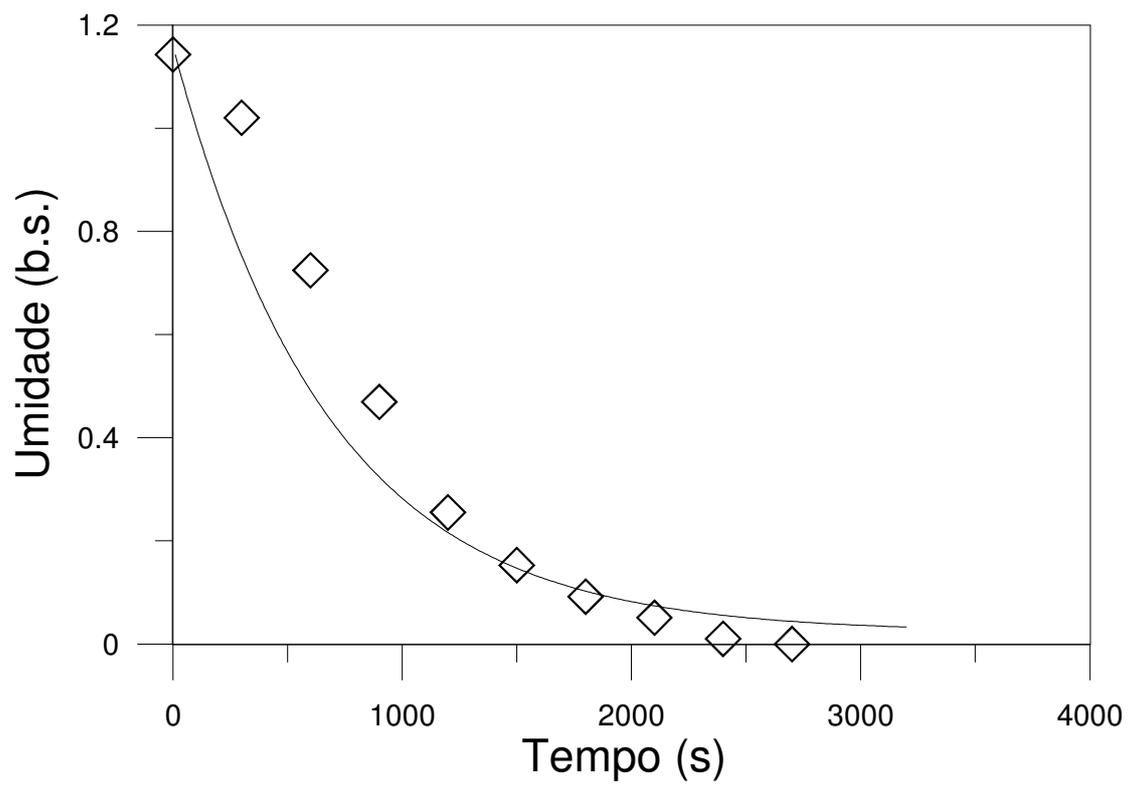
Figura 4.2. Coeficiente de correlação (R^2) e erro ao quadrado médio (MSE) para a Equação (2.9) (barra branca); Equação (2.7) (barra transversal), Equação (2.5) (barra inversa) e Equação (2.6) (barra escura).

O coeficiente de correlação (R^2) e o erro médio ao quadrado (MSE) foram calculados envolvendo as Equações (2.5) a (2.9) e são relatados na Figura 4.2. Uma análise baseada nos valores mais elevados de R^2 e nos valores mais baixos de MSE elege os coeficientes resultantes da Equação (2.6) para reproduzir a resistência efetiva a transferência de massa das folhas de mate para o meio de secagem nas circunstâncias operacionais investigadas neste trabalho. De fato, um bom acordo entre resultados

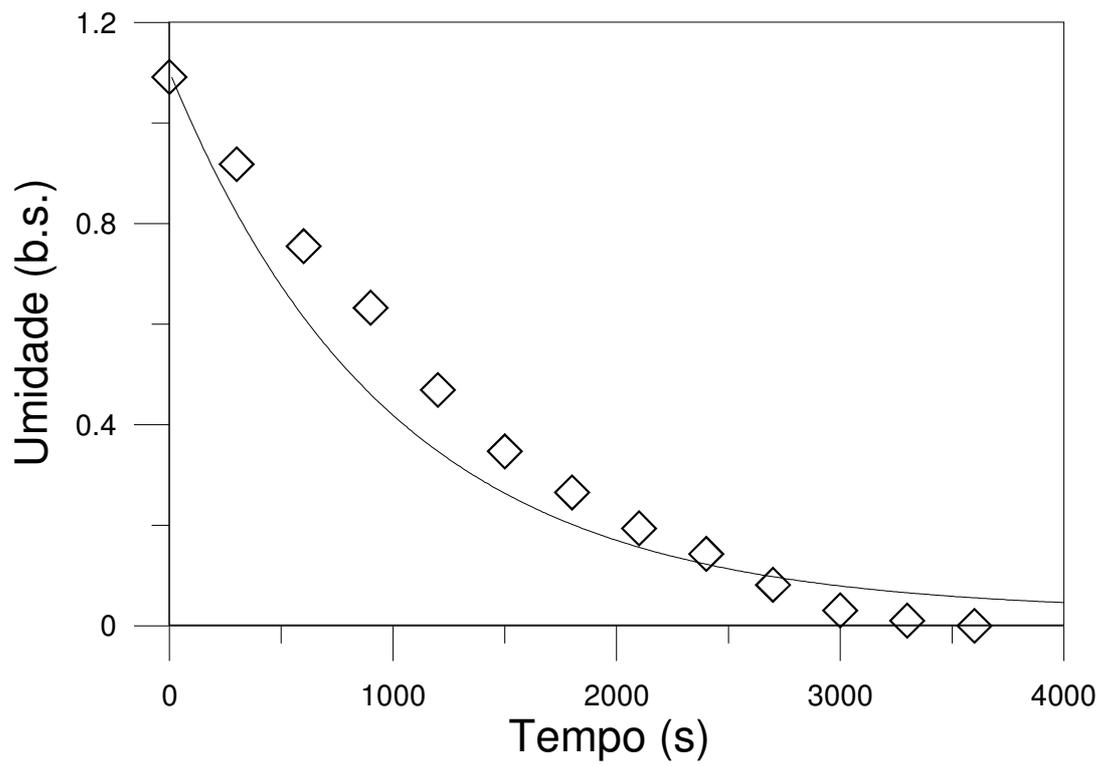
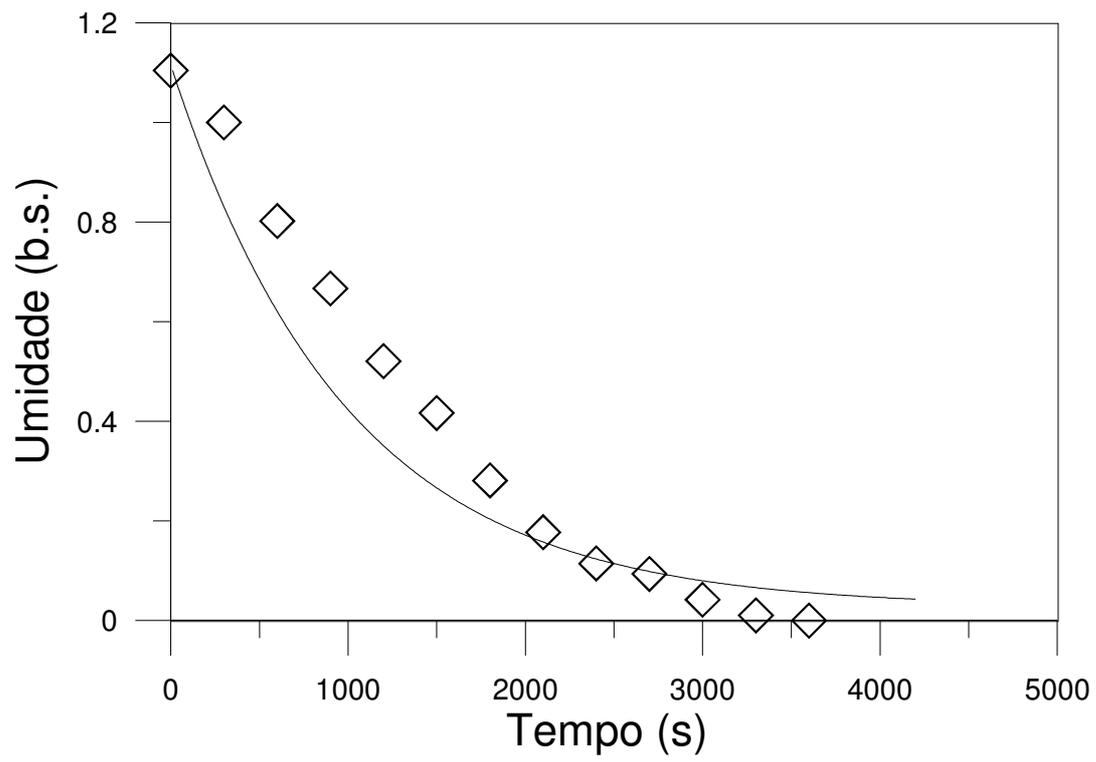
experimentais e calculados de umidade das folhas de mate no decorrer do tempo pode ser confirmado visualmente na Figura 4.3, quando esta expressão é envolvida. O aumento do desvio observado quando a temperatura de secagem é reduzida é atribuído principalmente ao uso de temperaturas um pouco distante da faixa (80 a 120°C) para qual a Equação (2.6) é comprovadamente consistente (Panchariya *et al.*, 2002). Os desvios padrão para os dados experimentais de umidade não foram apresentados devido a diferenças insignificantes encontradas em quatro réplicas.

Embora uma discussão detalhada sobre os aspectos fenomenológicos de transferência de massa não seja o objetivo principal desta investigação, é relevante explicar como a validade da Equação (2.6), que foi ajustada em curvas de secagem experimentais para folhas de chá (*Camellia sinensis*), é mantida para secagem das folhas de mate, apesar das diferenças entre as partículas em termos de dimensão e composição. Isto é atribuído provavelmente ao fato de que ambos os experimentos foram realizados em secadores de camada delgada, em condições análogas de transferência de massa por convecção. Conseqüentemente, embora a secagem de folhas de erva-mate não seja governada exclusivamente por convecção (Zanoelo, 2007), mas por uma combinação deste fenômeno com a difusão, é razoável deduzir que as difusividades da água nestes diferentes materiais secos são similares, ou que o efeito de uma possível diferença no coeficiente de transferência de massa efetivo que leva em consideração a difusão e a convecção é desprezível.

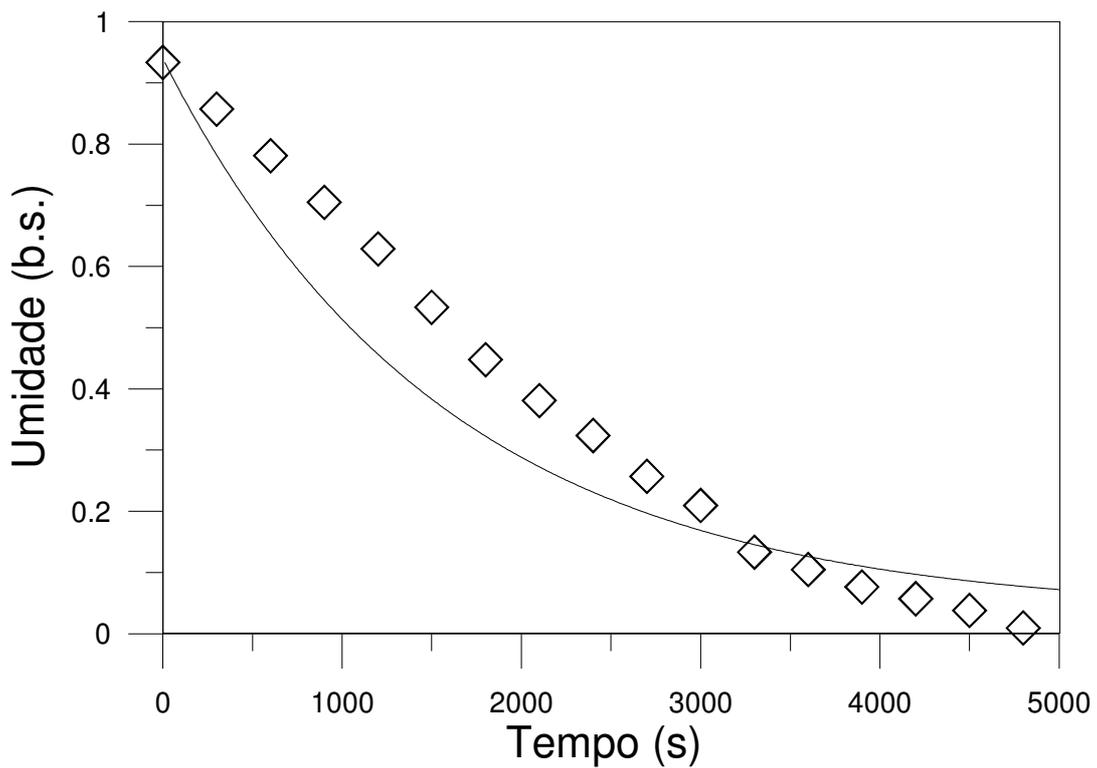
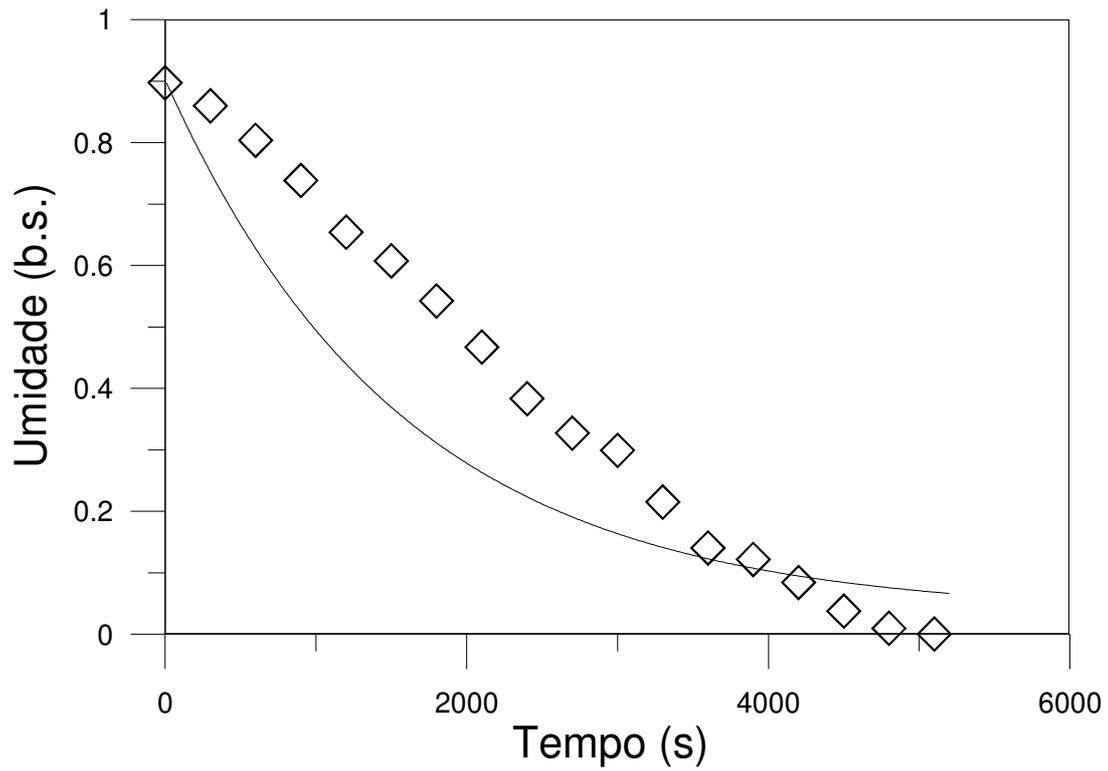
Apesar da consistência da Equação (2.6), as circunstâncias operacionais atuais são muito mais semelhantes ao intervalo de temperatura e de velocidade do ar aplicados para obter os parâmetros empíricos da Equação (2.5) (veja a Tabela 3.1). Visto que estes dados também foram ajustados em curvas de secagem experimentais em secadores de camada delgada, a Equação (2.5) deveria reproduzir as curvas de secagem na esteira com maior precisão do que a Equação (2.6). Embora isto efetivamente ocorra a 75 e 90 °C, como é possível deduzir a partir da Figura 4.2, um valor negativo inesperado de C_s a 60°C (ver Figura 4.2) torna o uso da Equação (2.5) impraticável nas circunstâncias atuais. Como diversas réplicas foram executadas para se obter as constantes de secagem do modelo de Lewis na investigação proposta por Temple e van Boxtel (1999^a), este valor negativo de C_s é creditado a um possível erro no procedimento de ajuste. De fato, quando a linha reta que representa a Equação (2.5) foi traçada no diagrama original escrito por Temple e van Boxtel (1999^a), um coeficiente linear positivo é claramente observado apesar do valor negativo apresentado na Equação (2.5).



(a)



(b)

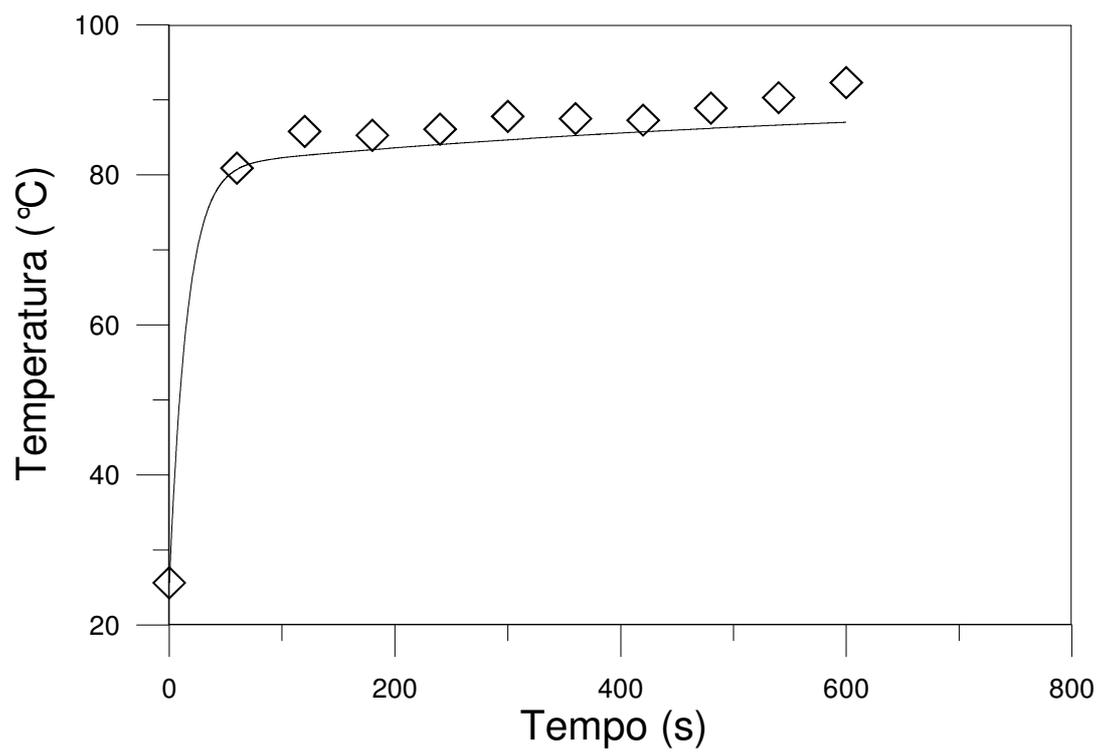
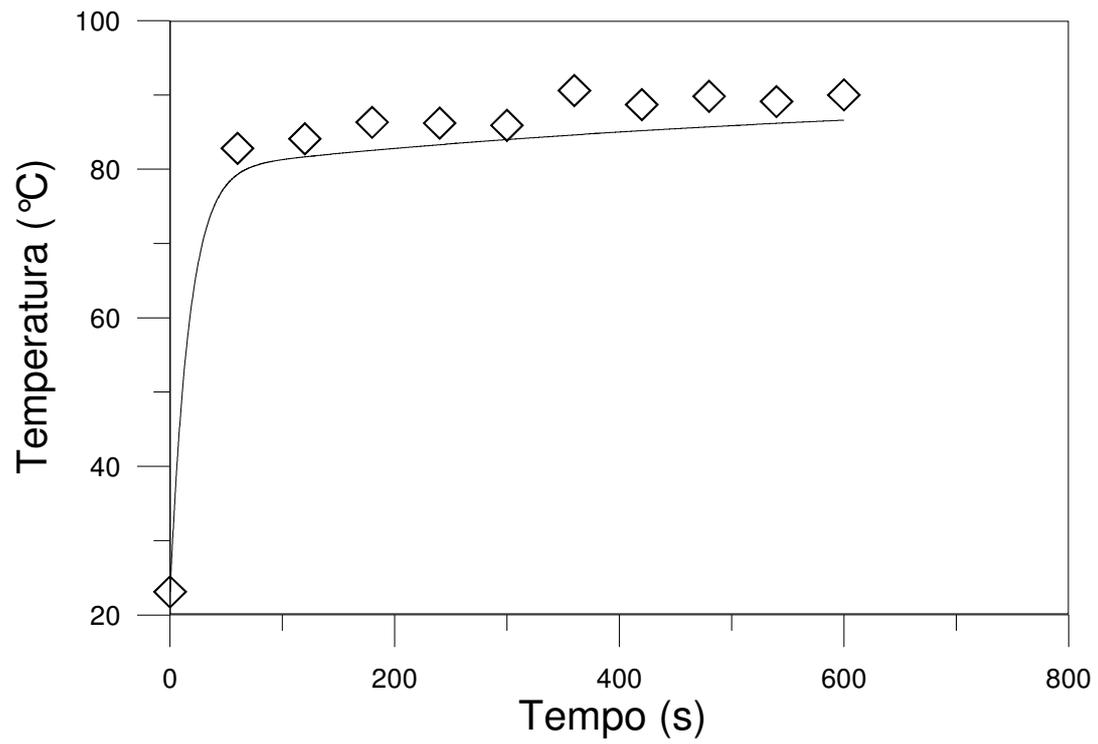


(c)

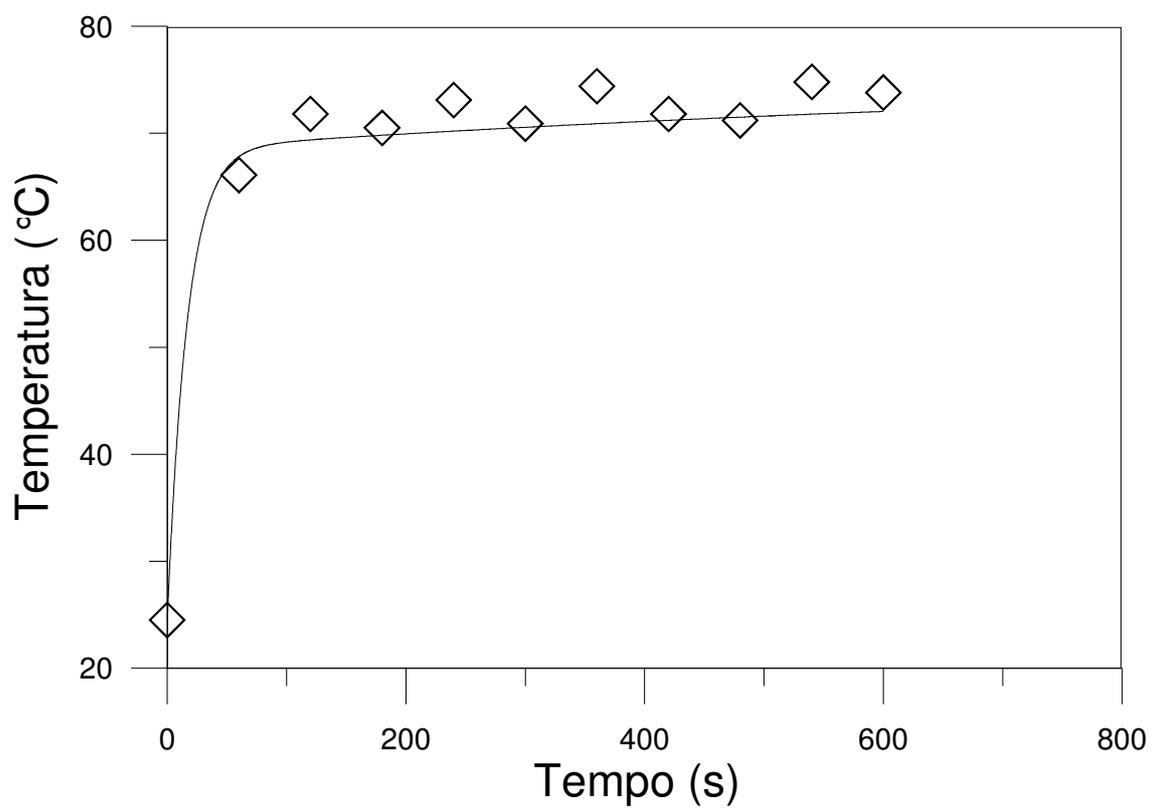
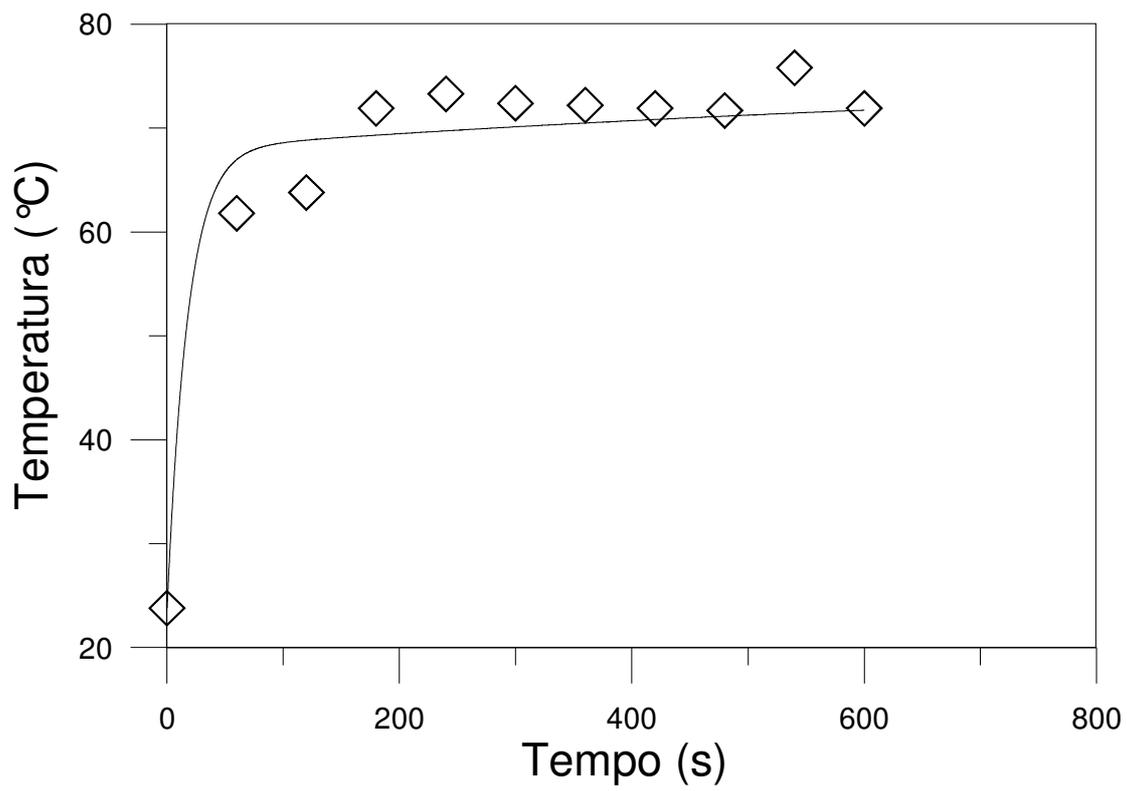
Figura 4.3. Comparação entre curvas de secagem experimentais (símbolos) e calculadas (linha), a 90°C (a), 75°C (b) e 60°C (c), em um secador da bandeja de laboratório. O coeficiente de transferência de massa ideal foi calculado por Panchariya et al. (2002)

A Equação (2.7) pode descrever mais de 80 % da variação de umidade devido a mudanças no tempo de secagem. Entretanto, um resultado melhor provavelmente não foi obtido devido às pequenas diferenças no tamanho das partículas e/ou das espessuras do leito, entre esta investigação e o estudo proposto por Zanoelo *et al.* (2007). Embora esta não seja uma explicação conclusiva, é correto afirmar que as condições de transferência de calor e massa, interna e externa, são certamente diferentes nestes sistemas experimentais comparados. Com respeito à Equação (2.9), que apresentou o coeficiente de correlação (R^2) mais baixo e o erro médio ao quadrado (MSE) mais elevado, nenhuma surpresa foi encontrada. A Equação (2.9) foi baseada em experiências executadas sob condições específicas de fluidização, enquanto que os experimentos aqui reportados foram conduzidos em secadores de leito fixo, embora de camada delgada. Conseqüentemente, as altas taxas de transferência de calor e massa encontradas, quando as partículas são fluidizadas não são observadas na presente investigação e, portanto a Equação (2.9) superestima as taxas de secagem. Todas as curvas de secagem calculadas, usando-se a Equação (2.9) estão bem abaixo dos resultados experimentais relatados na Figura 4.3. Uma análise detalhada a respeito das diferentes cinéticas de secagem em leitos fluidizados e de camada delgada é apresentada por Kunii e Levenspiel (1991), e resumida por Temple e van Boxtel (1999b) para a desidratação do chá preto.

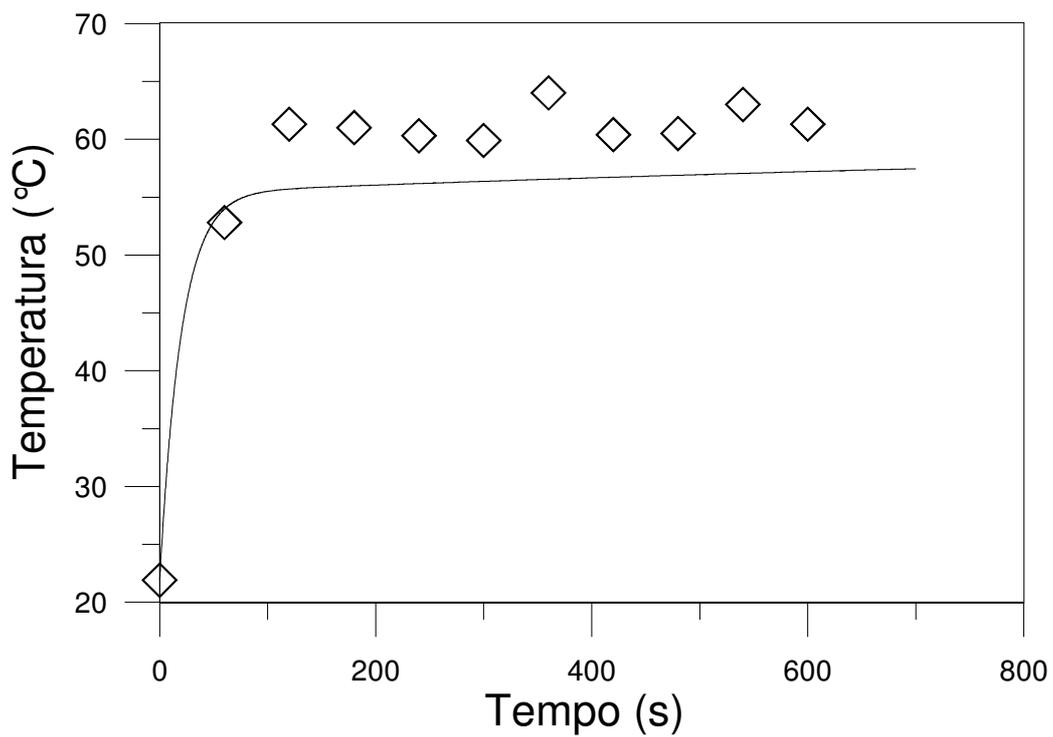
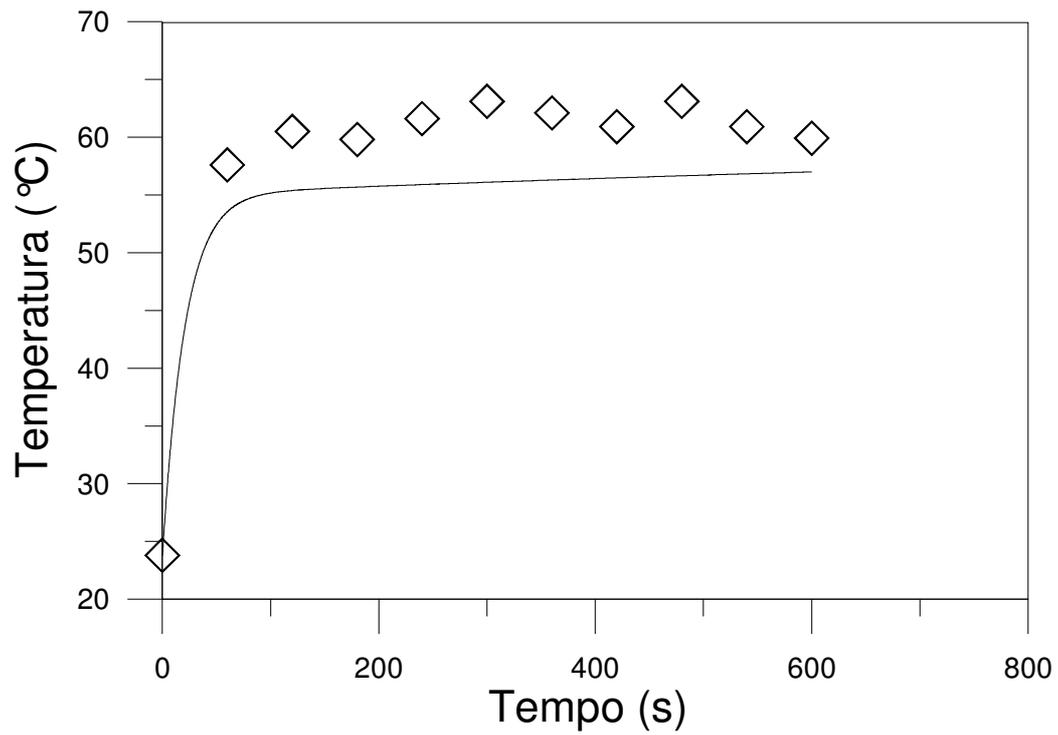
Baseado em dados recentes relacionados ao controle de processo de secagem de *Camellia sinensis* (Temple, 2000), a idéia inicial do presente trabalho envolvia a implantação de um sistema de controle inferencial, utilizando como referência medidas de temperatura do sólido. Mesmo em se tratando de uma investigação de um processo de secagem, a obtenção dos perfis de temperatura do sólido podem ser extremamente importantes para efeito de controle, pois poderia ser possível estabelecer uma correlação entre a temperatura e umidade do material e, por conseqüência a implantação de um sistema de controle por medidas rápidas e simples de temperatura das partículas. Este procedimento alternativo de controle evitaria o custo elevado envolvido em medidas instantâneas de umidade do material. Neste contexto, a validade da Equação (2.8) para estimativa do coeficiente de transferência de calor é verificada por comparação entre perfis experimentais de temperatura no secador de laboratório e resultados calculados a partir da solução simultânea das Equações (3.32) e (3.33) em secadores de batelada.



(a)



(b)

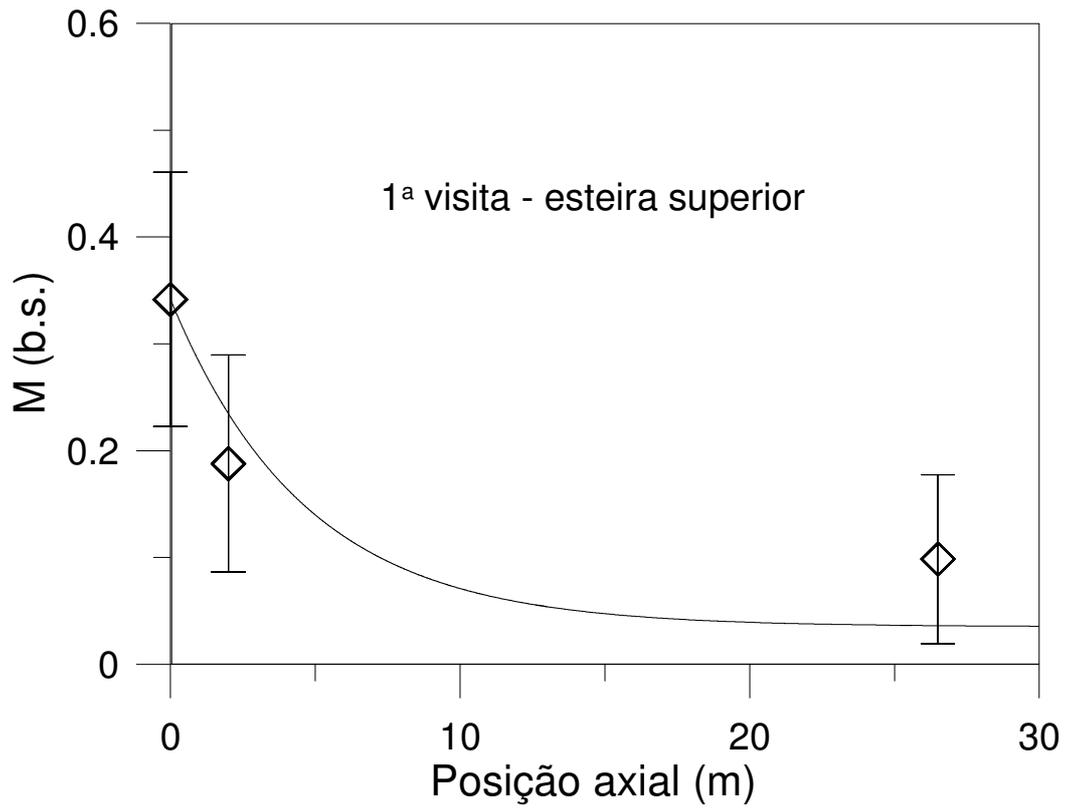


(c)

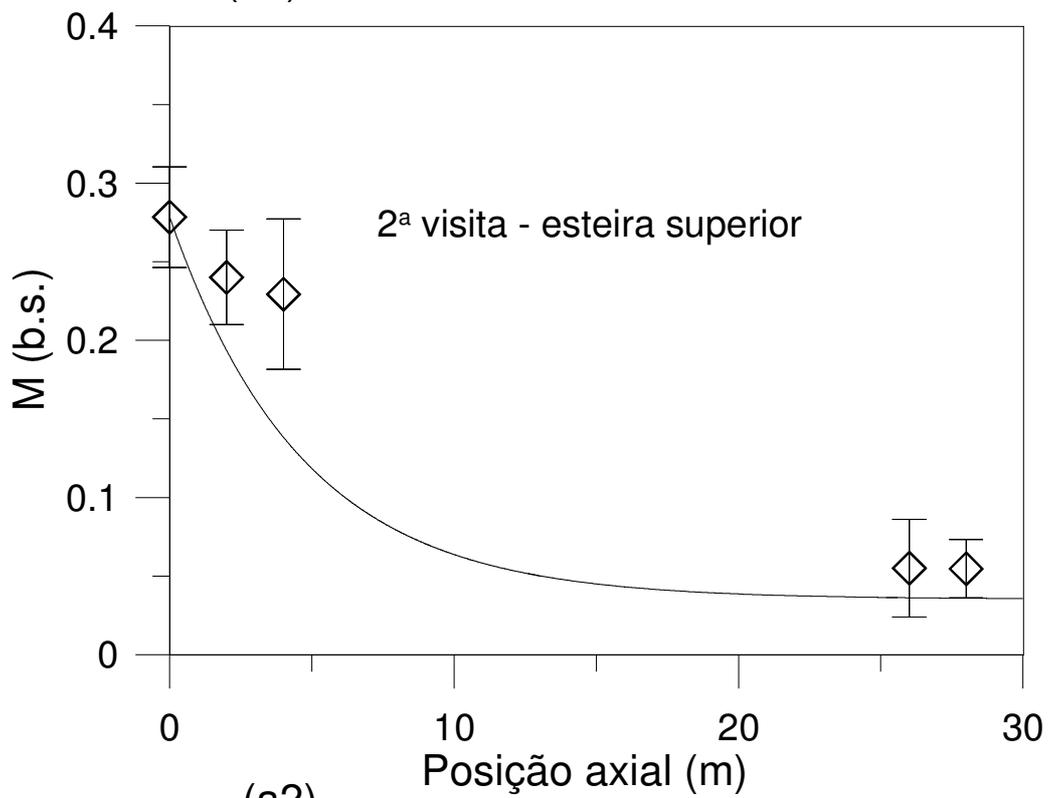
Figura 4.4 – Comparação entre resultados experimentais (símbolos) e calculados (linha) de temperatura do sólido em secador de laboratório a três temperaturas diferentes do ar de secagem: (a) 90 °C, (b) 75 °C e (c) 60 °C

A Figura 4.4 apresenta uma comparação entre os perfis de temperatura do sólido experimentais e gerados pelo modelo nas três diferentes temperaturas do ar de secagem, incluindo a réplica de cada experimento. Em todos os casos observa-se uma concordância entre estes valores, o que torna válida a Equação (2.8) e o modelo adotado para descrição da temperatura do sólido nas condições investigadas, principalmente a temperaturas mais altas, as quais são utilizadas nos secadores industriais. Porém visto que o modelo não reproduz satisfatoriamente os perfis experimentais de temperatura em secadores operando em condições industriais, a estratégia alternativa de um controle inferencial, baseada em medidas de temperatura do sólido, foi abandonada. Este comportamento é atribuído a elevada espessura da camada de folhas (espessura do leito) utilizadas na indústria, o que resulta em taxas de transferência de calor muito menores do que as estimadas pelo coeficiente obtido a partir da Equação (2.8).

Como mencionado anteriormente, alguns dados adicionais de umidade foram requeridos na validação do modelo de secagem em um secador contínuo de esteira para folhas de mate operando em escala comercial. Obviamente, estas medidas de umidade foram feitas em circunstâncias totalmente diferentes dos procedimentos usados para eleger a Equação (2.6) como a melhor entre os modelos empíricos para fornecer o coeficiente de transferência de massa. Cada estágio no secador contínuo foi simulado individualmente devido as diferentes temperaturas encontradas nestas esteiras. O bom ajuste dos valores calculados em relação às medidas reais, relatados na Figura 4.5, evidencia que a Equação (3.32), modelo proposto, é apropriado para reproduzir o processo de secagem do mate em escala real de produção. Apesar do modelo ser aplicado individualmente em cada esteira, ele é capaz de reproduzir o comportamento de secagem em qualquer estágio, desde que seja considerada a variação de temperatura do ar entre os estágios e a diferença de umidade na carga inicial. Vale a pena mencionar que os resultados expostos foram obtidos empregando-se os valores de C_s da Equação (2.6). Apesar das inúmeras medidas em uma posição fixa do secador, a incerteza elevada dos valores médios de umidade representados pelos desvios padrão da amostra é conseqüência de uma condição pseudo-estacionária, onde elevadas flutuações aleatórias das condições de operação de secagem em função do tempo são evidenciadas.



(a1)



(a2)

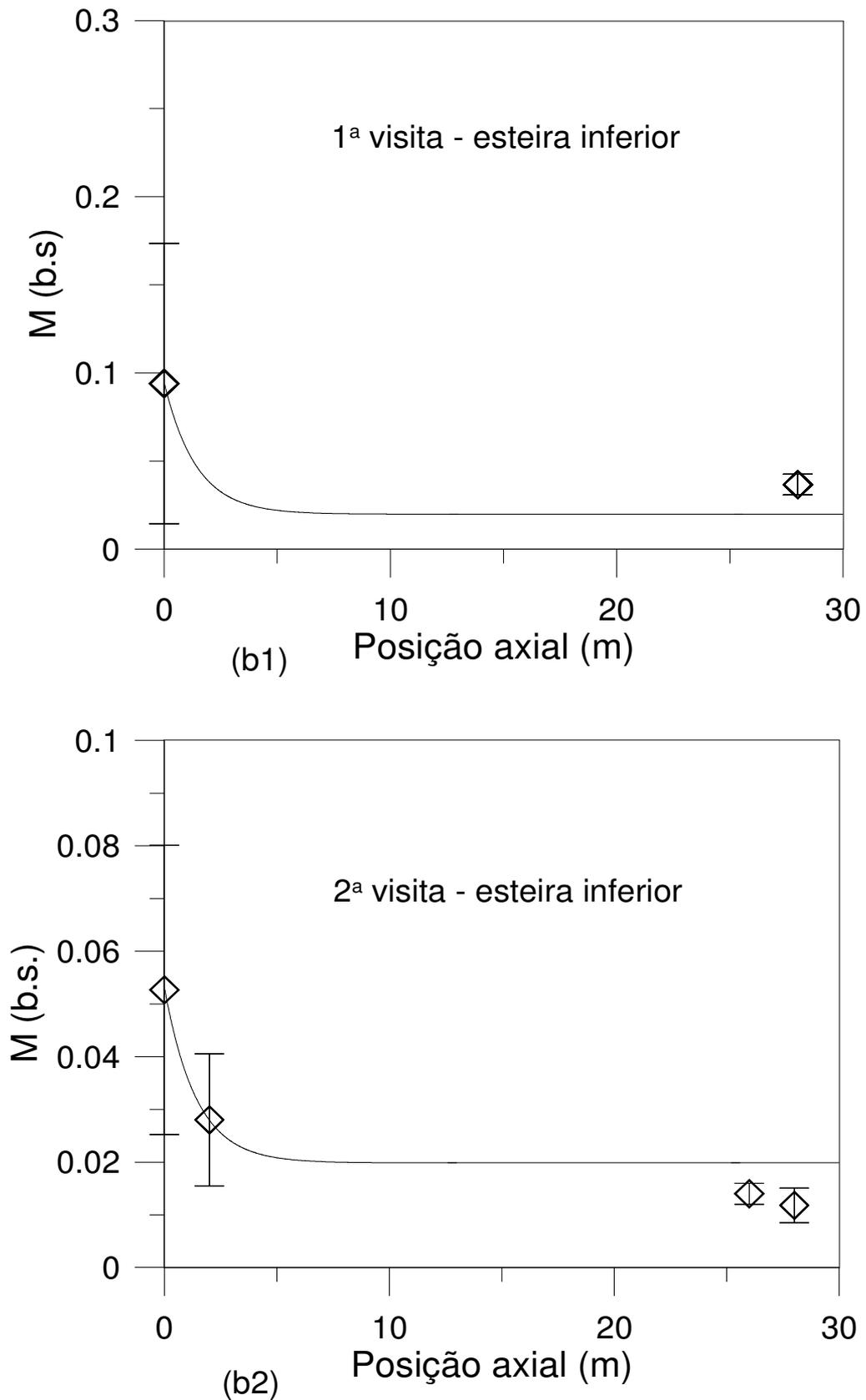


Figura 4.5- Comparação entre perfis axiais experimentais (símbolos) e calculados (linhas) de umidade ao longo de um secador industrial de esteira com dois estágios para folhas de mate.

Apesar da importância da temperatura do ar no cálculo do coeficiente efetivo de transferência de massa, a amplitude baixa das mudanças neste fator, não mais do que 7 % ($59 \pm 4^\circ\text{C}$), reduz significativamente seu efeito na variação de umidade. Conseqüentemente, os principais responsáveis pelo comportamento pseudo-estacionário são as oscilações de umidade na alimentação e velocidade do ar sobre a taxa de secagem (C_s). As variações destes parâmetros no tempo são da ordem de 33 % ($0,33 \pm 0,11$ b.s.) e ± 75 % ($0,21 \pm 0,16 \text{ m s}^{-1}$), respectivamente. A turbulência do fluxo no secador de esteira é a causa desta amplitude tão elevada de mudanças na velocidade do ar, sendo que as perturbações na umidade de alimentação são creditadas à maneira atual descontrolada de se fazer o estágio de desativação enzimática, o qual precede a etapa final de secagem.

Para os propósitos desta investigação é importante ressaltar que quando o tempo de residência no secador de esteira é aumentado reduzem-se os desvios padrões dos valores experimentais reportados na Figura 4.5. Este é um aspecto relevante visto que o principal objetivo desta investigação é o controle da umidade na descarga dos secadores contínuos industriais, onde o modelo reproduz corretamente os resultados experimentais.

4.3 - DESEMPENHO DO CONTROLADOR

A soma das diferenças ao quadrado (ISE) entre o “set-point” (3% b.u.) e os perfis transientes de umidade na descarga, frente a uma perturbação no “set-point” de 25% para 3% em base seca, foi minimizada aplicando-se o método simplex de otimização (Seborg *et al*, 1989). Um conjunto de parâmetros para o qual o controlador PID é estável foi obtido envolvendo este procedimento de ajuste. Em particular, encontrou-se um ganho proporcional de 1,16 e, constantes de tempo integral e derivativa iguais a aproximadamente 761,0 s e 0,2 s, respectivamente.

O desempenho do controlador PID foi avaliado em um intervalo de condições de operação caracterizadas por variações no tempo das principais variáveis que perturbam o sistema. Em particular, os tipos de variáveis que perturbam o sistema e a escala de variação são apresentados na Figura 4.6. Respostas em malha aberta e fechada de umidade na descarga de um secador da esteira frente a estas variações estão ilustradas na Figura 4.7a e 4.7c, respectivamente. A Figura 4.7b apresenta as ações de controle em malha fechada.

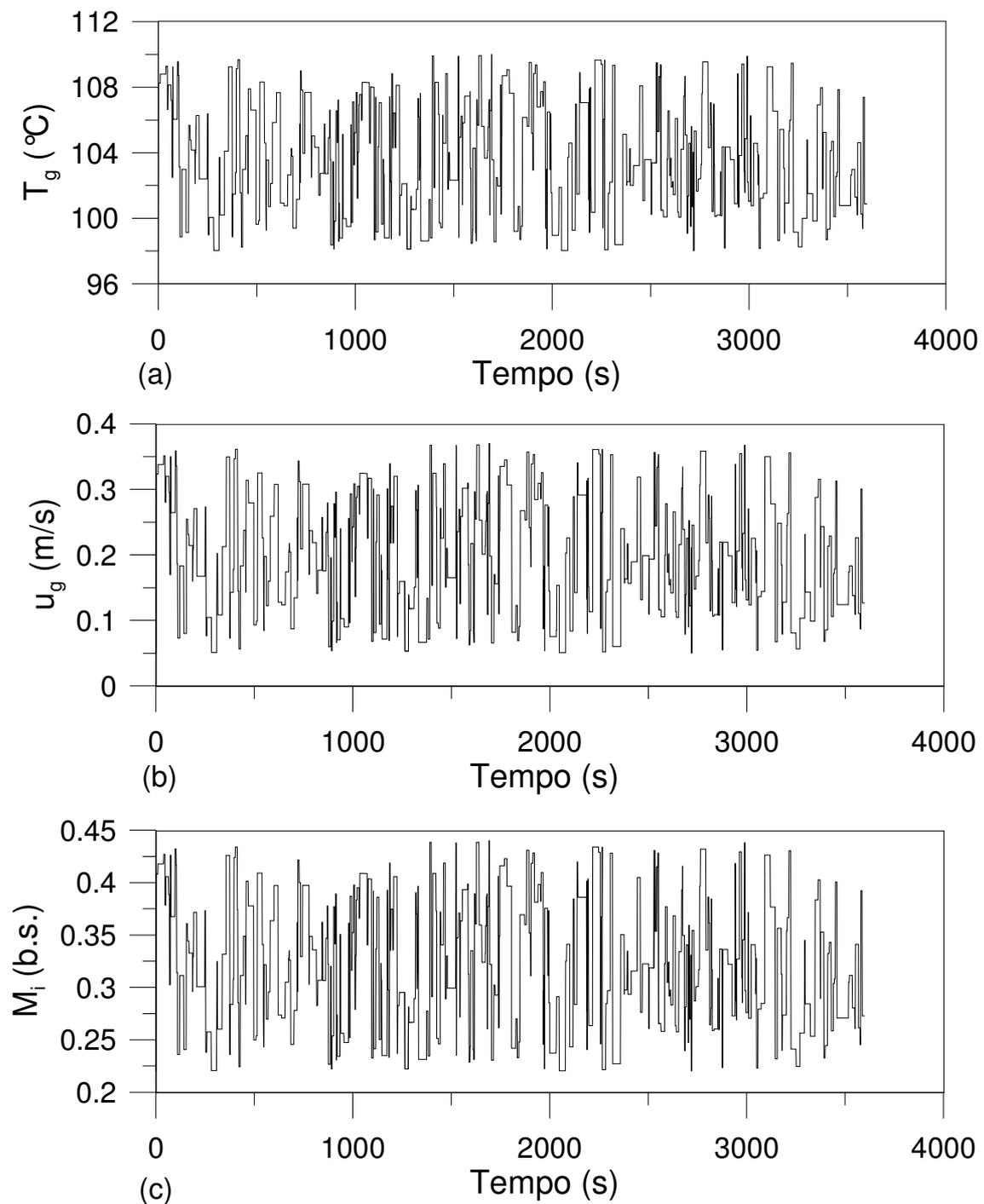


Figura 4.6. Perturbações aleatórias nas condições operacionais.

Os resultados apresentados na Figura 4.7c evidenciam um controle rigoroso da umidade na descarga dentro da escala de 2,4 a 3,4 % (b.s.), enquanto que na situação em que o sistema de controle não é atuante, apresentada na Figura 4.7a, a umidade passa a

flutuar entre 19% e 32% (b.s.) para as mesmas perturbações, o que são valores inaceitáveis.

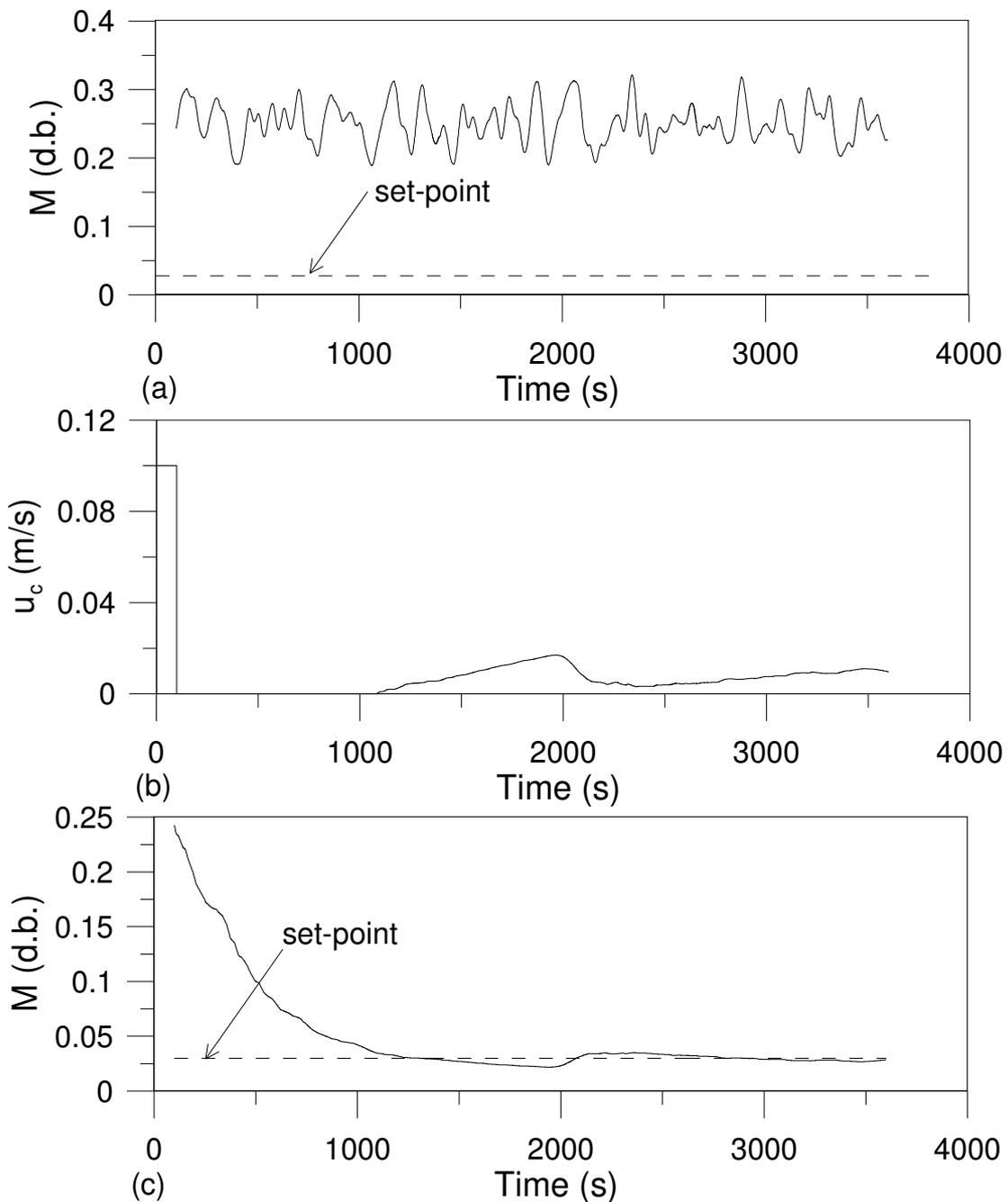


Figura 4.7. Controle feedback de umidade na descarga de um secador de esteira para folhas de mate, afetadas por variações aleatórias em circunstâncias operacionais, conforme relatado na Figura 4.6. (a) respostas em malha aberta de umidade na descarga; (b) variável manipulada do sistema em malha fechada; (c) respostas em malha fechada de umidade na descarga.

Na Figura 4.7 observa-se que nenhum valor de umidade foi medido até 100 s porque o secador inicia a operação com o leito vazio e este é o tempo necessário para o material percorrer a esteira de 10 m movendo-se a uma velocidade de $0,1 \text{ m s}^{-1}$. Visto que neste período o controlador não atua no sistema porque a umidade na descarga não é medida, um valor constante da variável manipulada é observado. Tão logo os 100 segundos iniciais tenham sido transcorridos, faz-se a primeira leitura de umidade na descarga, o que provoca a imediata paralisação da esteira já que a umidade na saída do secador apresenta valores muito acima do desejado. Quando o set-point de 3 % (b.s.) é alcançado, a 1100s, a velocidade da esteira é aumentada para permitir a secagem contínua das folhas de erva-mate, ou seja, durante 1000s a esteira opera em batelada. A partir deste instante, a variável manipulada é ajustada automaticamente para compensar perturbações na umidade de alimentação, bem como na temperatura e na velocidade do ar.

A Figura 4.8 apresenta perfis axiais de umidade das folhas de erva-mate ao longo da esteira após 3600 segundos de operação. As flutuações observadas na curva de secagem são atribuídas às condições operacionais diferentes ao longo do secador entre 3500 e 3600 s. Apesar deste comportamento proporcional, pode-se observar que o valor desejado (3 % b.s.) de umidade na descarga é mantido.

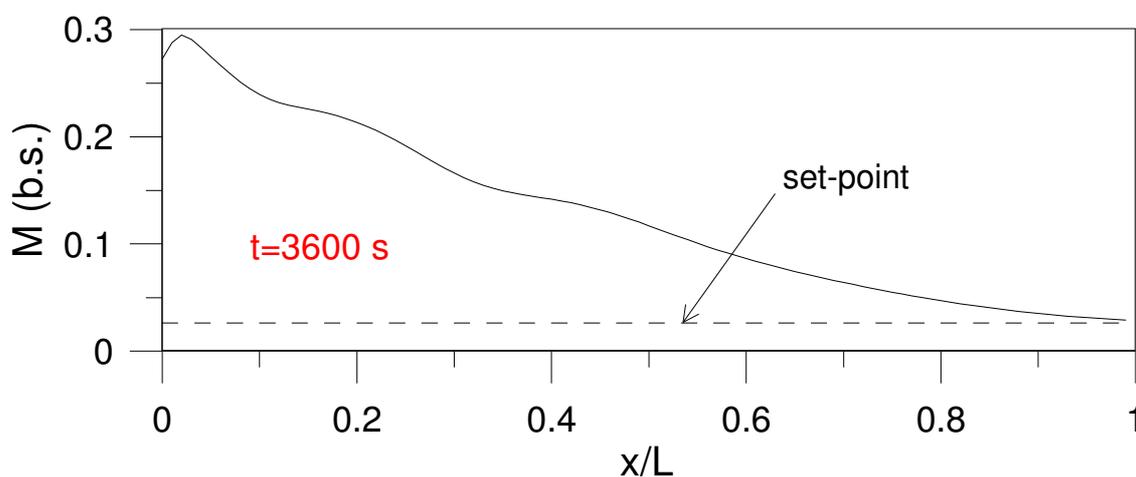


Figura 4.8. Perfil axial de umidade ao longo do secador de esteira após 3600 segundos de operação de secagem.

O controlador PID, ajustado pela minimização do somatório dos desvios ao quadrado (ISE), mostrou-se ideal para o controle do processo de secagem da erva-mate em secadores de esteira por dois motivos principais. O primeiro e mais óbvio é a rapidez

com que trouxe a variável controlada ao *set-point* e a estabilidade conferida ao sistema, praticamente não excedendo o limite máximo de 3,5 % (b.u) aceito para folhas de erva na saída do secador. Paralelamente, em segundo plano, a estabilidade conferida na variável manipulada do processo evita problemas mecânicos futuros, já que variações constantes na velocidade da esteira podem danificar algumas peças, preservando assim os equipamentos já utilizados pela indústria na manufatura da erva-mate.

CAPÍTULO 5 - CONCLUSÃO

Um modelo de secagem dinâmico representado por uma equação diferencial parcial da primeira ordem foi obtido através de um balanço de massa de água na fase sólida de um secador de esteira de camada delgada. Uma fórmula implícita de diferenças finitas de primeira ordem (BDF), foi aplicada para aproximar as derivadas no espaço e no tempo. O método das linhas foi utilizado para resolver numericamente este modelo matemático. Quatro diferentes equações empíricas para cálculo do coeficiente efetivo de transferência massa foram verificadas a fim de reproduzir as curvas de secagem experimentais para folhas de mate em um secador de bandeja de laboratório em três diferentes temperaturas. A expressão empírica proposta por Pancharyia *et al.* (2002), em termos de velocidade do ar e de temperatura, foi eleita para reproduzir a resistência total a transferência de água das folhas do mate ao meio de secagem. O modelo de secagem proposto e o coeficiente de transferência de massa, representado pela constante do modelo de Lewis, são válidos, como pode ser verificado na comparação efetuada entre resultados experimentais e aqueles calculados de umidade em um secador de esteira operando em condições industriais típicas. As variações de umidade na alimentação, temperatura de secagem e velocidade do ar foram consideradas responsáveis pelas alterações de regime. Um controlador PID foi proposto para manter a umidade na descarga dentro do intervalo aceitável de 2,4 a 3,4 % (base seca), por meio de ajustes na velocidade da esteira para compensar perturbações nas condições operacionais. Uma comparação entre valores de umidade na descarga, em malha aberta e fechada, frente a mudanças aleatórias em termos de frequência e magnitude nas variáveis que perturbam o sistema, evidenciou o bom desempenho neste caso do controlador PID.

CAPÍTULO 6 – SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Para trabalhos futuros é sugerido que controladores PID e medidores que usam tecnologia de raios infravermelhos para medidas rápidas de umidade, sejam montados e testados em unidade industrial de beneficiamento de erva-mate, pois o setor carece de tecnologia.

Propõe-se que estudos semelhantes a este sejam direcionados a etapa inicial do ciclo de cancheamento da erva-mate, automatizando por completo o processo de beneficiamento, garantindo produtos de alto valor e qualidade, pois não podemos esquecer que a erva-mate é um produto alimentício, e tem, por exemplo, grande capacidade de adquirir os odores das madeiras utilizadas no sapecador, portanto a etapa de desativação enzimática apresenta-se também como um ponto crítico para a boa qualidade da erva.

Para aumentar a funcionalidade dos modelos propostos, é sugerido testar mudanças nas técnicas de secagem empregadas na indústria. Novos métodos de secagem, aliando leitos mais finos à velocidades maiores da esteira, ajustando-se o modelo e os coeficientes de transporte de massa, após investigações maiores nestes dois, podem contribuir positivamente para o processo; neste contexto novos processos de beneficiamento da erva-mate devem ser pesquisados, menos poluentes e mais econômicos, extinguindo o uso de lenha.

REFERÊNCIAS

- ANVISA, Agência Nacional de Vigilância Sanitária. Resolução de Diretoria Colegiada – RDC nº 277, de 22 setembro 2005.
- CHEFTEL J.C., CHEFTEL H. *Introducción a la Bioquímica y Tecnología de Los Alimentos*. Vol. 1, Acribia Ed., Zaragoza, Spain, 1992.
- CUÈNOUD P., MARTINEZ. M.A.P, LOIZEAU P.A., SPICHIGER R., ANDREWS S. e MANEN, J.F. Molecular Phylogeny and Biogeography of the Genus *Ilex* L. (Aquifoliaceae), *Annals of Botany*, 85, 111-122, 2000.
- DA ROCHA Jr., Weimar. Análise do Agronegócio da Erva-mate com o enfoque da nova Economia Institucional e o uso da Matriz Estrutural Prospectiva, Tese de Doutorado, UFSC, 2001.
- ESMELINDRO M.C., TONIAZZO G., WACZUK A., DARIVA C., OLIVEIRA D. Caracterização Físico-Química da Erva-Mate: Influência das Etapas do Processamento Industrial, *Ciência e Tecnologia de Alimentos*, 22 (2), 193-204, 2002.
- GOLDENBERG D. Mate: a risk factor for oral and oropharyngeal cancer. *Oral Oncology*, 38, 646-649, 2002.
- GÖRGEN M., TURATTI K., MEDEIROS A.R., BUFFON A., BONA C.D., SARKIS J.J.F., PEREIRA G.S. Aqueous extract of *Ilex paraguariensis* decreases nucleotide hydrolysis in rat blood serum, *Journal of Ethnopharmacology*, 97(1), 2005.
- GRATZEK J.P. E TOLEDO, R.T. Solid food thermal conductivity determination at high temperatures. *Journal of Food Science*, 58, 908, 1993.
- HALL M.N., ROBERTSON A., SCOTTER C.N.G. Near-infrared reflectance prediction of quality, the aflavin content and moisture content of black tea. *Food Chemistry*, 27, 61-75, 1988.
- HOLMAN J.P., *Heat Transfer*, Mcgraw-Hill Inc., 1983.
- INYM, Instituto Nacional Yerba Mate, Resolução 49/02, Argentina, 25 de novembro de 2002.
- INTERNATIONAL STANDARDS ORGANIZATION. Tea – determination of loss in mass at 103°C. ISO Standard 1573, Geneva, 1980.
- INTERNATIONAL TEA COUNCIL. Annual Bulletin of Statistics, International Tea Council, London, 1997.

- JAYARATNAM S., KIRTISINGHE D. The effect of relative humidity and temperature on moisture sorption by black tea. *Tea Quarterly*, 44(4), 164-169, 1974.
- JAYAS D.S., CENKOWSKI S., PABIS S., MUIR W.E. Review of thin-layer drying and wetting equations. *Drying Technology*, 9(3), 551-588, 1991.
- KAWAKAMI M., KOBAYASHI A. Volatile constituents of green mate and roasted mate. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 39, 1275-1279, 1991.
- KUNII B., LEVENSPIEL O. *Fluidization Engineering*. Butterworth-Heinemann, Boston, M.A., USA, 1991.
- LOURENÇO, R.S., MEDRADO, M.J., FOWLER, J.A.P., MOSELE, S.H. Influência do substrato no desenvolvimento de mudas de erva-mate (*Ilex paraguariensis* St. Hil. *Revista Perspectiva* 24(88), 81–99, 2000.
- MAROULIS Z.B., SHAH K.K. E SARAVACOS, G.D. Thermal conductivity of gelatinized starches. *J. Food Sci.*, 56, 773, 1991.
- MATTEA M., URBICAIN, M.J., ROTSTEIN, E. Prediction of thermal conductivity of vegetable foods by effective medium theory. *J. Food Sci.*, 51, 113, 1986.
- MATTEA M., URBICAIN M.J., ROTSTEIN, E. Effective thermal conductivity of cellular tissues during drying: prediction by a computer assisted model. *Journal of Food Science*, 54, 194, 1989.
- MIZUKAMI Y, SAWAI Y, YAMAGUCHI Y. Moisture content measurements of tea leaves electrical impedance and capacitance. *Biosystems Engineering*, 93(3), 293-299, 2006.
- PANCHARIYA P.C., POPOVIC D., SHARMA A.L. Thin-layer modelling of black tea drying process. *Journal of Food Engineering*, 52, 349-357, 2002.
- PAZ, A. R. A. Implementação de um Simulador Numérico Num Programa Computacional de Estabilidade, Dissertação de Mestrado, CPGEE, UFMA, 2004.
- POWELL M., SAVOLAINEN V., CUÉNOD P., MANEN J. F., ANDREWS, S. The mountain holly (*Nemopanthus mucronatus*: Aquifoliaceae) revisited with molecular data. *Kew Bulletin* 55: 341-347, 2000.
- RANZ W.E., MARSHALL W. Evaporation from drops. *Chem. Eng. Prog.* 48 764 141–146, 1952.
- RYWOTYCKI R. Electric sensor for prompt measurement of moisture content in solid food products. *Journal of Food Process Engineering*, 25, 473-483, 2003.

- SCHMALKO M.E., MORAWICKI R.O., RAMALLO, L.A. Simultaneous Determination of Specific Heat Capacity and Thermal Conductivity Using the Finite-difference Method, *Journal of Food Engineering*, 31, 531-540, 1997.
- SCIPIONI G.P., MEZA B.E., PRAT KRIKUM S.D., ARGÜELLO B. Comparacion de las isotermas de desorción de *Ilex dumosa* e *Ilex paraguariensis* A. St. Hill. Proceedings of the 2nd South American Congress of Mate and 3rd Technical Meeting of South Cone Countries on Mate Crop, Encantado, RS, 359-362, 2000.
- SEAB Paraná. Diagnóstico e Alternativas para a Erva-mate *Ilex paraguariensis*. Curitiba, 141 p., 1993
- SEAB Paraná. Erva-mate – Prospecção Tecnológica da Cadeia Produtiva. Documento Executivo. Curitiba, 27 p., 1997.
- SEBORG, D. E., EDGAR, T. F. and MELLICHAMP, D. A.. *Processos, Dynamics and Control*, Wiley, N. Y., 1989.
- SIMEPAR. Instituto Tecnológico de Meteorologia do Paraná – Centro Politécnico – Curitiba / PR.
- TANG Z., CENKOWSKI S., IZYDORCZYK M. Thin-layer drying of spent grains in superheated steam, *Journal of Food Engineering*, 67, 457–465, 2005.
- TEMPLE S.J., VAN BOXTEL A.J.B. Modelling of fluidized bed drying of black tea. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(2), 203-212, 1999a.
- TEMPLE S.J., VAN BOXTEL A.J.B. Equilibrium moisture of tea. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 74(1), 83-89, 1999b.
- TEMPLE S.J., VAN BOXTEL A.J.B. Control of fluid bed tea dryers: Controller design and tuning. *Computers and Eletronics in Agriculture*, 26(2), 159-170, 2000.
- TEMPLE S.J. Control of Fluidized Bed Tea Drying. PhD. Thesis, Wageningen University, 2000.
- VALDUGA E. Caracterização Química e Anatômica da folha de *Ilex paraguariensis* ST. Hil. e de algumas espécies utilizadas na adulteração do Mate. Dissertação de Mestrado. UFPR, 1994.
- VILCAHUAMAN L.J.M. Caracterizacion y evaluacion economica del sistema agroflorestal yerba mate en el sur de Brasil: un enfoque financeiro, de optimización y de riesgo. PhD Thesis, Institucion de Ensenanza e Investigaciomen Ciencias Agrícolas, México, 1999.

- WIRIYAUMPAIWONG S., SOPONRONNARIT S., PRACHAYAWARAKORN S.
Comparative study of heating processes for full-fat soybeans, *Journal of Food Engineering*, 65, 371–382, 2004.
- YOSHITOMI H. Drying characteristics of tea leaves. *Japan Agricultural Research Quarterly*, 22(4), 302-309, 1989.
- YOSHITOMI H. Drying characteristics of tea leaves (III) Effect of primary drying conditions on tea drying. *Journal of the Japanese Society of Agricultural Machinery*, 49(3), 197-206, 1987.
- YIN H. Thermal and physical properties of tea. *Journal of Tea Science*, 5(1), 1-6, 1985.
- ZANOELO E.F. Equilibrium Moisture Isotherms for Mate Leaves, *Biosystems Engineering*, 92(4), 445-452, 2005.
- ZANOELO E.F., CARDOZO FILHO L., NASCIMENTO FILHO I., CARDOZO JÚNIOR E.L. Um Novo Conceito de Processo para a Indústria Ervateira. 3º CONGRESSO SUL AMERICANO DE ERVA-MATE, Chapecó, v. 6, 1-6, 2003.
- ZANOELO E.F., CARDOZO FILHO L., CARDOZO JÚNIOR, E.L. Superheated Steam Drying of Mate Leaves and Effect of Drying Conditions on the Phenol Content. *Journal of Food Process Engineering*, v. 29, n. 3, p. 253-268, 2006.
- ZANOELO E.F., DI CELSO G.M., KASKANTZIS G. Drying kinetics of Mate Leaves in a Packed Bed Dryer, *Biosystems Engineering*, 2007, em impressão.
- ZANOELO E.F. A Theoretical and Experimental Study of Simultaneous Heat and Mass Transport Resistances in a Shallow Fluidized Bed Dryer of Mate Leaves, *Engineering and Processing*, 2007, em impressão.