

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**João Paulo Taveira**

**SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE  
TEMPERATURA E UMIDADE NA SECAGEM DE GRÃOS  
E SIMULAÇÃO PARA O MILHO EM SECADOR DE  
CONTRA-FLUXO**

**Taubaté - SP**

**2005**

**UNIVERSIDADE DE TAUBATÉ**

**João Paulo Taveira**

**SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE  
TEMPERATURA E UMIDADE NA SECAGEM DE GRÃOS  
E SIMULAÇÃO PARA O MILHO EM SECADOR DE  
CONTRA-FLUXO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de Mestrado pelo Curso de Automação e Controle Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Taubaté.

Área de Concentração: Automação e Controle Industrial.

Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo.

**Taubaté - SP**

**2005**

TAVEIRA, João Paulo.  
T232s           **Sistema de automação e controle de temperatura e  
umidade na secagem de grãos e simulação para o milho em  
secador de contra-fluxo./** João Paulo Taveira.—São Paulo:  
UNITAU, 2005.  
79fl.: il.; 30 cm.

Dissertação (mestrado) – UNITAU – Universidade de  
Taubaté. Departamento de Engenharia Mecânica. 2005.  
Orientador: Prof. Dr. José Rui Camargo.

Palavra-chave: automação – secador – controle industrial.  
I. Camargo, José Rui. II. UNITAU – Universidade de Taubaté.  
Departamento de Engenharia Mecânica. III. Título.

CDD21 - 670.427

**João Paulo Taveira**

**SISTEMA DE AUTOMAÇÃO E CONTROLE DE TEMPERATURA E  
UMIDADE NA SECAGEM DE GRÃOS E SIMULAÇÃO PARA O MILHO EM  
SECADOR DE CONTRA-FLUXO**

Dissertação apresentada para obtenção do Título de  
Mestrado pelo Curso de Automação e Controle  
Industrial do Departamento de Engenharia Mecânica  
da Universidade de Taubaté.  
Área de Concentração: Automação e Controle  
Industrial.

Data: 09 / 09 / 2005

Resultado: \_\_\_\_\_

**BANCA EXAMINADORA**

Prof. Dr. José Rui Camargo

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Sebastião Cardoso

Universidade de Taubaté

Assinatura \_\_\_\_\_

Prof. Dr. Carlos Daniel Ebinuma

FEG / UNESP

Assinatura \_\_\_\_\_

A todos os meus familiares, em particular a minha esposa Néia, pelo carinho e dedicação, aos meus professores desde a infância, aos colegas, e especialmente ao meu querido pai Manoel Paulo (em memória) e minha mãe Purcina pelo afeto que me dedicaram.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Prof. Dr. José Rui Camargo, orientador deste trabalho, aos Professores Dr. Sebastião Cardoso, Dr. Carlos Daniel Ebinuma, membros da banca examinadora deste exame para obtenção do título de Mestre em Engenharia Mecânica e a empresa Vetcogray Óleo e Gás Ltda. pelo acesso aos programas de informática (Mathcad).

TAVEIRA, JOÃO P. **Sistema de automação e controle de temperatura e umidade na secagem de grão e simulação para o milho em secador de contra-fluxo.** 2005. 79 fl. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté – UNITAU, Taubaté-SP.

### **RESUMO**

A redução das perdas dos produtos alimentícios tem como fator principal o controle eficiente do nível de umidade na sua estocagem. Este trabalho apresenta um sistema de análise do controle da temperatura e da umidade num secador de contra fluxo de grãos, e proporciona uma visão sobre o processo básico da secagem. O sistema propõe uma monitoração contínua dos parâmetros termodinâmicos de entrada e saída no processo para o ar e o produto, proporcionando por sensores interligados ao sistema de controle. O modelo matemático baseado no modelo de Michigan utiliza uma camada elementar de grãos como volume de controle, e depois, aplica a função de transferência na simulação do programa computacional. A simulação do calor e massa transferida entre o ar e os grãos, no secador é baseada na aplicação do modelo do fenômeno de transporte entre as fases fluida e sólida. O resultado para várias condições operacionais são usados para avaliar a influência das variáveis de secagem e para conseguir subsídios dos elementos do sistema, tendo em mente a otimização da qualidade do produto final.

**PALAVRAS CHAVE:** Secador de Contra Fluxo, Secagem de Grãos, Automação de Processo de Secagem.

TAVEIRA, JOÃO P. **Automation and control system of umidity and temperature on drying of grains and simulation for corn at counter-flow dryer.** 2005. 79 fl. Dissertatiton (Master's degree of Mechanical Engineering) – University of Taubaté – UNITAU, Taubaté-SP.

### **ABSTRACT**

The reduction of the food products losses has as main factor the efficient control of the humidity level of the storage food. This paper presents an analysis of a temperature and humidity control system in a counter-flow drier of corn grains and provides an overview of the basic process. The system proposes a continuous monitoring of the thermodynamic parameters of inlet and outlet process air and product, what is done by means of sensors that get a feedback to the control elements. The mathematical model based on the Michigan model uses an elementary layer of grains as a control volume been, after, the transfer functions applied to a simulation computational program. The simulation of the heat and mass transfer between air and grains in the drier is based on the application of a transport phenomena model to the fluid and solid phases. The results for several operational conditions are used to evaluate the influence of the drying variables and to get the improvement of the system elements, having in mind the better quality of the final product.

**KEY-WORDS:** Counter-Flow Dryer, Drying of Grains, Automation of Process of Drying.

TAVEIRA, JOÃO P. **Système d'automatisation et contrôle de température et humidité dans la séchage de grain et simulation pour le maïs dans le séchoir de contre-flux.** 2005. 79 fl. Dissertation (Maître en Ingénierie Mécanique) – Université de Taubaté – UNITAU, Taubaté-SP.

## RÉSUMÉ

Le principal facteur pour la réduction de perte des produits pour alimentation est le contrôle efficace du niveau d'humidité dans le stockage. Ce travail présente un système d'analyse pour le contrôle de la température et de l'humidité dans un séchoir de contre-flux pour des grains, et propose un point de vue sur la procédure fondamentale de la séchage. Le système propose le monitoring continu des paramètres thermodynamiques d'entrée et de sortie de l'air et du grain à partir des moniteurs connectés au système de contrôle. Le modèle mathématique suivi a soutenance dans le modèle de Michigan et utilise une couche élémentaire de grains comme volume de contrôle et ensuite applique la fonction de transfert dans la simulation du programme d'ordinateur. La simulation de chaleur et masse transférée parmi de l'air et des grains dans le séchoir a soutenance dans le modèle du phénomène de transport entre des phases fluide et solide. Des résultats des plusieurs conditions opérationnelles sont utilisés pour évaluer l'influence des variables de séchage et pour obtenir des subsides à partir des éléments du système, avec le but de optimiser la qualité du produit final.

**MOTS CLÉS:** Séchoir de Contre-flux, Séchage de Grains, Automatisation du Procédure de Séchage.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Fluxo do ar e do produto .....	22
Figura 2 - Esquema da Monitoração .....	22
Figura 3 - Volume de controle elementar da camada de grãos .....	30
Figura 4 - Conversor de dados de entrada e saída.....	43
Figura 5 - Conversor analógico digital.....	44
Figura 6 - Fluxograma da automação do secador.....	48
Figura 7 - Sensor de altura.....	50
Figura 8 - Sensor de umidade do ar.....	50
Figura 9 - Sensor de umidade do produto.....	51
Figura 10 - Proteção do sensor de umidade do produto.....	51
Figura 11 - Sensor de temperatura.....	52
Figura 12 - Sensor de vazão de ar.....	53
Figura 13 - Esquema de camadas e secagem.....	55
Figura 14 - Lógica da automação de carga e descarga do secador-portas E.....	57
Figura 15 - Esquema do sistema de controle.....	58

Figura 16 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas.....	62
Figura 17 - Umidade do ar nas camadas em 1 hora.....	63
Figura 18 - Temperatura do ar nas camadas em 1 hora.....	63
Figura 19 - Temperatura do produto nas camadas.....	64
Figura 20 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas.....	65
Figura 21 - Temperatura do ar em 1 hora nas camadas.....	66
Figura 22 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas.....	67
Figura 23 - Temperatura do ar em 1 hora nas camadas .....	68
Figura 24 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas.....	69

## LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Parâmetros da equação de Henderson.....	42
Tabela 2.2 - Tabela Verdade.....	56

## LISTA DE SÍMBOLOS

A	área de passagem do ar de secagem	(m <sup>2</sup> )
A <sub>w</sub>	atividade de água	(1)
a	área específica	(m <sup>2</sup> . m <sup>-3</sup> )
C	parâmetro da equação de Henderson	(1)
c <sub>p</sub>	calor específico do produto	(k J.kg <sup>-1</sup> . ° C <sup>-1</sup> )
c <sub>v</sub>	calor específico do vapor d' água	(k J.kg <sup>-1</sup> . ° C <sup>-1</sup> )
c <sub>w</sub>	calor específico d' água no estado líquido	(k J.kg <sup>-1</sup> . ° C <sup>-1</sup> )
c <sub>a</sub>	calor específico do ar	(k J.kg <sup>-1</sup> . ° C <sup>-1</sup> )
D	adimensional de profundidade	(1)
D <sub>p</sub>	diâmetro equivalente da partícula	(m)
E <sub>a</sub>	energia específica por unidade de massa	(k J . kg <sup>-1</sup> )
E <sub>e</sub>	energia específica do ar que entra no volume de controle	(k J . kg <sup>-1</sup> )
E <sub>g</sub>	energia específica do produto no volume de controle no tempo t	(k J . kg <sup>-1</sup> )
E <sub>p</sub>	energia específica do produto no volume de controle no tempo t + Δt	(k J . kg <sup>-1</sup> )
E <sub>r</sub>	energia específica requerida para a evaporação de umidade	(k J . kg <sup>-1</sup> )
E <sub>s</sub>	energia específica do ar que sai do volume de controle	(k J . kg <sup>-1</sup> )
G <sub>a</sub>	vazão mássica de ar por unidade de área	(kg ar seco . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> )
h	coeficiente de transferência de calor por convecção	(k J . m <sup>-2</sup> . s <sup>-1</sup> . ° C <sup>-1</sup> )
K	parâmetro da equação de Henderson	(1)
kar	condutividade térmica do ar	(kJ . m <sup>-1</sup> . s <sup>-1</sup> . ° C <sup>-1</sup> )
ks	constante de secagem	(1)
Lv	calor específico de vaporização d' água	(k J . kg <sup>-1</sup> )

$m_a$	massa de ar que entra no volume de controle	(kg)
$m_e$	massa de umidade evaporada	(kg)
$m_{u1}$	massa de vapor do ar que passa pela posição $x$ no intervalo de tempo $dt$	(kg)
$m_{u2}$	massa de vapor do ar que passa pela posição $x + dx$ no intervalo de tempo $dt$	(kg)
$m$	vazão mássica de ar seco por unidade de área	(kg . m <sup>-2</sup> . h <sup>-1</sup> )
$N$	parâmetro da equação de Henderson	(1)
$n$	quantidade teórica de camadas na camada total de grãos	(1)
$Nu$	número de Nusselt	(1)
$P$	massa específica do produto	(kg . m <sup>-3</sup> )
$Pr$	número de Prandtl	(1)
$Q$	vazão volumétrica de ar nas condições ambientes	(m <sup>3</sup> . min <sup>-1</sup> )
$q$	energia transferida por convecção do ar para o produto	(kJ)
$Re$	número de Reynolds	(1)
$RU$	razão de umidade do produto	(1)
$t$	tempo de secagem	(s)
$t_{1/2}$	tempo de meia resposta	(h)
$T_e$	temperatura de equilíbrio	(°C)
$T_o$	temperatura do ar de secagem	(°C)
$T$	temperatura do ar seco	(°C)
$U$	teor de umidade do grão	(%)
$U_{bs}$	teor de umidade em base seca	(1)
$U_{bu}$	umidade relativa de equilíbrio ar-grão em base úmida	(1)
$U_e$	teor de umidade de equilíbrio para as condições do ar de secagem	(1)
$U_o$	teor de umidade inicial do grão	(1)
$UR$	umidade relativa do ar ambiente	(%)
$URE$	umidade relativa de equilíbrio ar-grão	(%)
$V_a$	fluxo de ar por unidade de área	(m <sup>3</sup> . s <sup>-1</sup> . m <sup>-2</sup> )
$w$	massa específica expressa em matéria seca	(kg . m <sup>-3</sup> )
$W$	razão de mistura de ar	(kg água / kg ar seco)

x	distância	(m)
x <sub>total</sub>	altura total da camada de grãos	(m)
y	distância	(m)
Y	adimensional de tempo	(1)
$\Delta E_1$	variação da energia específica do ar ao passar pelo volume de controle	(k J . kg <sup>-1</sup> )
$\Delta E_2$	variação do calor sensível por unidade de massa do ar no volume de controle	(k J . kg <sup>-1</sup> )
$\Delta E_a$	variação global do calor sensível por unidade de massa	(k J . kg <sup>-1</sup> )
$\Delta m_a$	variação da massa de água do produto	(kg)
$\Delta m_g$	variação da massa de água do ar no volume de controle	(kg)
$\Delta m_u$	variação da massa de vapor d'água do ar	(kg)

## LETRAS GREGAS

$\varepsilon$	porosidade do produto	(1)
$\theta$	temperatura do produto	( °C)
$\mu$	viscosidade dinâmica do ar	(N.s. m <sup>-2</sup> )
$\rho_a$	massa específica do ar	(kg . m <sup>-3</sup> )
$\rho_p$	massa específica do produto	(kg . m <sup>-3</sup> )

## SUB-ÍNDICES

a	ar , área , água
bs	base seca
bu	base úmida
e	equilíbrio , evaporada

g	massa d'água
o	entrada inicial
p	produto
r	requerida
s	saída
u	vapor d'água do ar
u1	indicador da posição $x$ , na altura da camada
u2	indicador da posição $x + dx$ , na altura da camada
v	vapor d'água
w	água no estado líquido

## SUMÁRIO

Resumo.....	06
Abstract.....	07
Résumé.....	08
Lista de Figuras.....	09
Lista de Tabelas.....	11
Lista de Símbolos.....	12
Capítulo 1 Introdução .....	18
1.1 Principal objetivo.....	18
1.1.1 Objetivos Complementares .....	19
1.2 Justificativa .....	20
1.3 Metodologia .....	21
1.4 Revisão Bibliográfica .....	23
Capítulo 2 Desenvolvimento Matemático .....	29
2.1 Modelo de Michigan.....	29
2.1.1 Descrição do Modelo .....	29
2.1.2 Simulação de Secagem em Leito Fixo .....	31
2.1.3 Simulação de Secagem em Fluxo Contracorrente .....	38
2.2 Modelo de Hukill.....	40
2.2.1 Parâmetros da Equação de Henderson.....	42
Capítulo 3 Automação e Controle.....	43
3.1 Descrição do Sistema de Automação.....	46

3.2 Otimização da Secagem.....	46
3.3 Sistema de Automação Aplicado ao Secador.....	47
3.4 Sensores Utilizados.....	49
3.4.1 Sensores .....	49
3.5 Programação Lógica do Sistema de Automação.....	54
Capítulo 4 Simulação do Processo de Secagem.....	59
4.1 Dados de entrada da Simulação.....	59
4.2 Parâmetros da Simulação.....	60
4.3 Resultados da Simulação.....	62
4.4 Verificação dos Resultados da Simulação.....	70
4.5 Discussões sobre os Resultados da Simulação.....	70
Capítulo 5 Conclusões.....	72
Referências.....	73
Apêndice.....	78

## **CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO**

A posição brasileira na produção de alimentos, é sem duvida, de suma importância dentro do contexto mundial. A qualidade dos grãos de cereais produzidos deve ser sempre o principal objetivo a ser alcançado, e a sua estocagem deve respeitar as características essenciais para a conservação e o consumo. Dentre as várias características tem-se como principal parâmetro de controle a umidade dos grãos.

Este trabalho tem como meta a automação de um secador de grãos. Escolheu-se o secador tipo contra fluxo de ar e adota-se o milho como produto para simulação dos cálculos. Mostram-se, então, vantagens e desvantagens nas variações dos parâmetros de controle e conclui-se que uma parte desses parâmetros devem ser customizados em funções das condições climáticas, do teor de umidade inicial dos grãos e da velocidade de produção necessária para evitar seu início de deterioração.

A automação apresentada mostra o controle de carga e descarga do produto no secador e trata a otimização de tal forma que esta possa ser customizada.

Logicamente que para possibilitar um melhor entendimento deste assunto, torna-se necessário abordar os principais aspectos dos fenômenos de secagem aqui aplicados.

### **1.1 Principal Objetivo:**

O trabalho proposto tem por objetivo fornecer os subsídios de automação e de controle que permitam monitorar de forma eficaz a secagem de grãos de alimentos.

O monitoramento de carga e descarga é comandado automaticamente pelo sistema de controle.

### **1.1.1 Objetivos Complementares:**

Para uma compreensão mais clara do processo de conservação dos grãos, é fundamental apresentar os esclarecimentos a respeito da questão biológica envolvida na manutenção dos mesmos por períodos mais longos, livres de deterioração ou contaminação por bactérias e fungos.

Estudando-se a respeito da respiração dos grãos, considerados como sementes, ou seja, com o poder de germinação (assuntos de outros ramos da ciência, como a Agronomia e Tecnologia de Alimentos), este trabalho irá limitar-se a uma abordagem baseada em dados colhidos pelos pesquisadores destas áreas.

Considerando-se a movimentação relativa entre ar e produto esta pode ser definida de duas maneiras (PEREIRA, 1991): a primeira é a transilagem; movimentação dos produtos estocados de um silo para outro, melhorado através de várias transilagens (por meio de dutos elevadores de transporte por massa de ar) o que apresenta certas restrições devido à quebra dos grãos e a segunda é a aeração dos grãos armazenados utilizando-se a sucção de ar.

Há de ser considerada, para a germinação, a casca, pele protetora do grão, principalmente no caso das sementes. Esta permite a movimentação da umidade interna por capilaridade e por respiração. Leva-se em consideração ainda alguns detalhes que são de vital importância para os parâmetros, que estão mostrados no apêndice A.

## 1.2. Justificativa:

O presente tema foi escolhido por motivos de experiência anterior acumulada na área de secagem de rações animais peletizadas, e no sentido de complementar o sistema de automação e controle.

Na secagem dos peletes não existe a casca biológica de proteção como nos grãos, que também é uma barreira à transferência de calor, pois nas rações animais (peletes) os cereais já estão moídos e misturados a outros produtos, inclusive inorgânicos. Outro aspecto é que, no processo de peletização, o produto entra para a secagem com temperatura alta, por volta de 80°C, pois sai da prensa rotativa com temperatura mais elevada, devido ao atrito na passagem pelos furos do anel da matriz compactadora sendo comprimido pelos rolos.

Devido a esta característica estes secadores de peletes são simplesmente conhecidos como resfriadores. Com o resfriamento ocorre a secagem num processo muito mais rápido, de tal forma que o produto já sai do secador pronto para embalagem.

Assim, no período de 1989 – 1990 a Companhia CPM – (Califórnia Pellet Mill) fez a solicitação do desenvolvimento de um sistema no secador que permitisse um melhor controle na saída do resfriador de contra-fluxo para atender uma encomenda especial, pois os resfriadores de linha do tipo contra-fluxo existentes, não possuíam nenhum sistema de controle de umidade, o que se tornava motivo de uma certa restrição para a venda dos mesmos.

Desta forma, a solução adotada foi um sistema de balança na base do resfriador, onde o controle é feito com base no volume (ocupado) e no peso do produto, podendo-se detectar a média de sua umidade. Este controle é transferido ao moto-variador de acionamento da grelha oscilante que controla a vazão de saída do produto. Assim, o produto mais úmido (fora dos

padrões aceitáveis) faz com que o acionamento não libere a saída do produto. Neste procedimento é feito um controle contínuo da umidade de saída do produto para calibração ideal do secador.

A companhia então, patenteou este resfriador (secador de contra-fluxo) nos E.U.A, com este sistema, que permite um controle de umidade de saída.

### **1.3 Metodologia:**

Para a consecução deste trabalho foram desenvolvidos os seguintes itens:

- Revisão bibliográfica atualizada de trabalhos científicos da área em questão;
- Modelagem matemática de processo de secagem de grãos;
- Estudos dos sistemas de automação;
- Simulação através do modelo matemático;
- Conclusões.

A Figura 1 apresenta um esquema básico da entrada e saída do ar e do produto. Na Figura 2 mostra-se o esquema de monitoração da secagem.

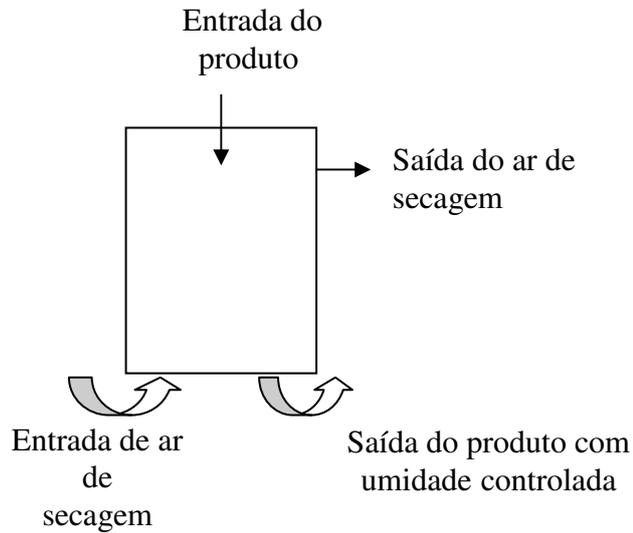


Figura 1 - Fluxo do ar e do produto

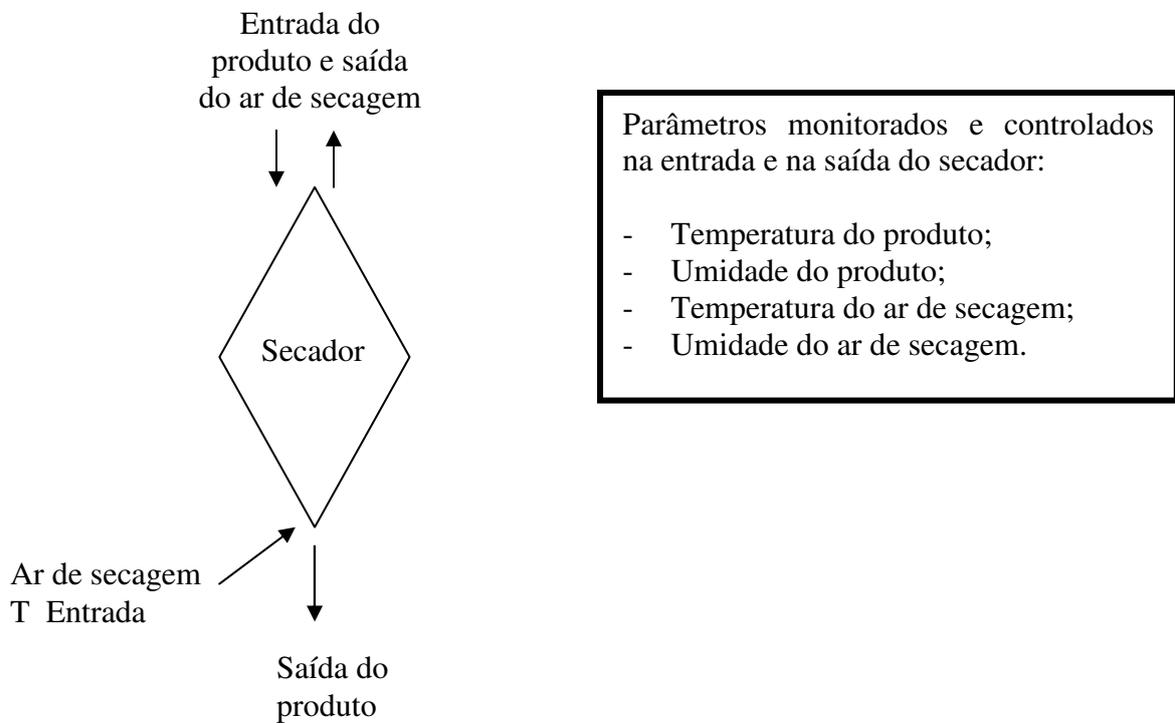


Figura 2 - Esquema da Monitoração

#### 1.4 Revisão Bibliográfica:

Inúmeros pesquisadores apresentam trabalhos na área de secagem de grãos tais como:

SAVARESI et al (2000) argumentam que de acordo com o problema de ajustamento, num conjunto de dados coletados de um secador de açúcar rotativo, por avaliações de um primeiro princípio de modelo matemático é que este deve ser construído sob uma estrutura do modelo. Com isto percebeu-se que o secador de açúcar apresenta duas condições diferentes de trabalhos: o “modelo-padrão” (caracterizado por conter umidade zero), e o “modo sempre-seco”. Baseado nestes dois modelos um ajuste exato entre o modelo e a medida dos dados pode ser concluído, e uma inovação estratégica no controle pode ser aproveitada.

TEMPLE et al (2000) apresentam um modelo simulado de um secador contínuo de chá, de camada, anteriormente validado, que foi usado para investigar as opções de controle do secador. O desempenho máximo não teve controle de parâmetro adequado, e deveria ser mantido até 50 mm de altura de camada. A variação no calor disponível provou limitar as disponibilidades de compensações para variações na taxa de alimentação em secadores reais. Se secadores operam abaixo do poder de controle limitado pela temperatura do ar, é recomendado controlar a taxa de alimentação dentro do sistema em processo contínuo, tão rigorosamente quanto possível, e corrigir esta distorção por outras variações nos sistemas de umidade contida em cada produto.

QIANG e BAKKER-ARKEMA (2001 a) desenvolveram pesquisas sobre secagem de grãos em fluxo cruzado e constataram que este é um processo não linear com um longo atraso, difícil de ser controlado. Este modelo controla sistema para fluxo cruzado. Testes simulados

num secador virtual mostraram que o controle é bem executado mesmo acima de uma larga faixa de variação das condições de secagem. Isto foi testado num secador comercial de fluxo cruzado mostrando excelente precisão e estabilidade.

QIANG e BAKKER-ARKEMA (2001 b) discutem que secadores de grãos de fluxo contínuo apresentam processos não-lineares em um longo período, e isso, muitas vezes, acarreta grandes perturbações, por essa razão, são difíceis de controlar. Neste trabalho um novo modelo-protótipo de sistema de controle para secadores de fluxo-cruzado está presente. A simulação de testes em secadores virtuais, mostra que o controle abrangerá uma larga faixa de condições de secagem. Na terceira parte deste trabalho QIANG et al (2000 a) apresentam um sistema de controle automático de secadores de grãos de fluxo-cruzado. O sistema mostra-se excelente em exatidão, estabilidade e robustez. A umidade contida do milho foi controlada na faixa de 21 a 32 %, com secagem a ar e com temperaturas de 85°C a 120 °C.

MANCINI et al (2002 a), desenvolveram um equipamento experimental, com a finalidade de determinar uma correlação linear para o coeficiente de transferência de massa global volumétrica. A comparação entre o resultado experimental e o simulado permite concluir que a correlação descreve satisfatoriamente as variações do coeficiente da massa transferida, uma vez que os desvios médios foram menores que 15% em todos os casos.

MARTINS et al (2002 a), pesquisaram um conjunto de camadas fixas experimentais realizando testes em 50 cm de altura e 8 cm de diâmetro na coluna da camada fixa seca. O resultado experimental foi comparado com os valores simulados para validar a correlação linear proposta para o coeficiente de transferência da massa global volumétrica. Todos os

experimentos foram realizados em condições agrícolas normais de grãos secos que são: temperatura do gás abaixo de 70°C e umidade inicial satisfatória entre 0,25 e 0,35 bases secas. As análises dos resultados obtidos levam a concluir que o modelo matemático descreve satisfatoriamente as variações dos coeficientes da massa transferida, uma vez que desvios entre os resultados experimental e o simulado foram menores que 18% em todos os casos, embora tenha sido observada a redução de 15% no volume da camada, a qual poderia causar tais desvios, uma vez que o modelo não prevê contrações nas camadas.

MANCINI et al (2002 b), utilizaram um conjunto de 32 camadas densas de grãos de feijão secos experimentais para estimar os parâmetros de uma correlação linear para o coeficiente de transferência da massa global volumétrica. A correlação para o coeficiente de transferência da massa foi implementada em um programa simulador para camada fixa densa. O resultado simulado foi comparado com aqueles obtidos em 30 cm de altura no protótipo. Os desvios médios entre o resultado experimental e o simulado foram menores que 10% em todos os casos, o qual permitiu concluir que a correlação empírica obtida para o coeficiente de transferência da massa global volumétrica é válida nas condições operacionais consideradas nesta pesquisa.

MARTINS et al (2002 b), adaptaram um umidificador em um secador de camada fina de modo a determinar o conteúdo de umidade de equilíbrio e as correspondentes curvas isotérmicas de sorção. A técnica mistura a estabilidade de métodos estáticos e a velocidade dos métodos dinâmicos para a determinação de conteúdo da umidade de equilíbrio. Os experimentos de secagem foram realizados em grandes faixas de temperatura (30 até 60 °C) e umidade relativa (8 até 65%). A mais importante característica do novo método foi a

simplicidade, uma vez que utiliza somente em uma fase de 18 horas de pré-secagem e uma fase de 6 horas de secagem para obter os valores de conteúdo da umidade de equilíbrio experimental. A comparação entre os resultados experimentais e aqueles calculados através das curvas isotérmicas de sorção, levam a conclusão de que o equipamento adaptado, pode ser usado para outras determinações similares, uma vez que, o máximo de desvios entre os valores experimentais e calculados foram menores que 6%.

MARTINS et al (2002 c), estudaram três modelos matemáticos baseados nas curvas de secagem de camada fina de feijão. Dos parâmetros de modelos conhecidos, o modelo Overhults e o modelo de coeficiente global, foram estimados para cada curva de secagem. A comparação entre os resultados calculados e experimentais levam a concluir que os três modelos são equivalentes para descrever a taxa de secagem dos materiais, pois os desvios médios foram menores que 6% e os desvios máximos foram menores que 15% em todos os casos considerados.

ELIAS et al (2002) estudaram um conjunto experimental de grãos de secagem em camada fina. Foram realizadas pesquisas para permitir a determinação da correlação linear para o coeficiente de transferência de massa global volumétrica. Além disso, o método estatístico foi aplicado para avaliar o equilíbrio contido na umidade dos grãos e as curvas isotérmicas. As correlações obtidas para o coeficiente de massa transferida, para as curvas isotérmicas, foram implementados num programa de simulação. A comparação entre os resultados simulado e experimental permitiu concluir que esta correlação descreve satisfatoriamente a variação do coeficiente de massa transferida e o equilíbrio contido na umidade dentro da faixa de variação das condições operacionais consideradas.

FERREIRA et al (2002), apresentam um secador de camada de jorro bidimensional que foi aplicado para avaliar a produção de feijão preto moído concentrado para alimentação. O secador de jorro foi completado com 3,5 kg de partículas inertes de polipropileno e a secagem de gás sobe a taxa que foi ajustada para 1,4 vezes o mínimo com taxa crescente. Os grãos de feijão preto foram embebidos em água fresca por 18 horas e então moídos num processador de alimentos. A suspensão obtida foi mantida em contínua agitação sendo então manualmente e vagarosamente injetada no secador. O foco desta pesquisa foi a influência da temperatura no secador de gás e a concentração da suspensão, com injeção da taxa acima e com o conteúdo de final, mantendo-se a umidade e o tamanho da partícula da moagem. Dos resultados obtidos foi possível concluir que as variações nas condições operacionais, não são afetadas significativamente pelo tamanho das partículas de moagem. Embora a umidade final tenha sido fortemente afetada pela temperatura do gás, alcançando valores em torno de 0,055 em bases secas para temperaturas maiores que 60°C. Ainda foi possível verificar também que, em torno de 1,00 g/ml, o pó recuperado teve a sua eficiência drasticamente reduzida.

YUTTHANA et al (2003), apresentam resultados de experiências de estocagem técnica com secagem de arroz usando ar ambiente. Os resultados da simulação indicam que o grau de brancura do grão de arroz depende da temperatura, da umidade relativa, da capacidade de carga e da velocidade do fluxo de ar.

CHUA et al (2003) acrescentam o estudo sobre o suprimento de energia para o processo de fornada seca numa taxa constante, recentemente desenvolvido como intermitente, onde o processo de secagem ocupa um tempo variável e o calor é usado para a secagem cinética do material inicialmente desidratado. A energia requerida deve ser suprida por

combinação de diferentes modos de transferência de calor (convecção acoplada com condução ou radiação, ou efeito dielétrico com aquecimento simultâneo, ou outra seqüência pré selecionada) com tempo variável, para suprir a secagem cinética otimizada. Isto é especialmente importante para a secagem de materiais sensíveis aquecidos (alimentos, fármacos, substâncias naturais e ervas medicinais). O suprimento intermitente de calor é benéfico somente para certos materiais, principalmente aqueles secos no período da queda de taxa de secagem, onde a difusão interna de calor e umidade controlam esta taxa de secagem. Em períodos que pouco ou nenhum calor é suprido para a secagem permite-se um período necessário para a umidade e o calor poder se difundir no material. Este trabalho fornece uma visão geral do processo básico, resultados selecionados de experimentos e modelos matemáticos para uma variedade de biomateriais secos, num amplo sortimento de secagens. Começa-se assim com a classificação de processos intermitentes de secagem que podem ser aplicados em temperaturas variáveis, taxa instantânea de temperatura do ar, operando a pressão e o calor introduzido por diferentes modos e com diferentes variações de tempo.

## **CAPÍTULO 2 DESENVOLVIMENTO MATEMÁTICO**

Neste capítulo mostram-se os modelos matemáticos mais utilizados na simulação de secagem de grãos (Michigan e Hukill), que são complementares. Tais modelos servem como base para programação em computadores.

Todo modelo matemático necessita ser validado (QUEIROZ, 1990). Essa validação é realizada comparando-se resultados obtidos utilizando-se o modelo matemático com resultados obtidos experimentalmente. Uma série de trabalhos vem sendo conduzidos na Universidade Federal de Viçosa – MG procurando-se validar esses modelos para as condições brasileiras, atualmente os modelos apresentados neste trabalho já se encontram validados.

- Modelo de Michigan (variação da umidade do ar, umidade do produto e temperatura do ar).
- Modelo de Hukill (variação da umidade do produto em função do tempo e profundidade).

Apesar do fato deste trabalho ser da área de concentração de controle automação industrial as bases matemáticas estão sendo aqui tratadas e referenciadas para melhor compreensão do mesmo.

### **2.1 Modelo de Michigan:**

#### **2.1.1 Descrição do Modelo:**

O modelo de Michigan é utilizado para simular a secagem em secadores do tipo camada fixa, fluxos cruzados, fluxos concorrentes e fluxos contracorrentes (QUEIROZ, 1990). Esse modelo foi desenvolvido especificamente para simular a secagem de milho, mas

pode ser aplicado para outros tipos de grãos, cujo modelo apresenta balanços de energia e de massas aplicados a um volume diferencial ( $A \cdot dx$ ), para uma posição arbitrária da camada de grãos, conforme a Figura 3.

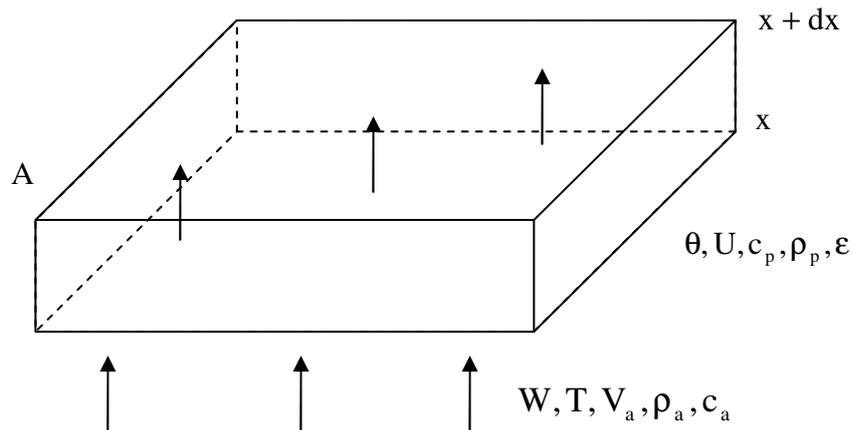


Figura 3 - Volume de controle elementar da camada de grãos

No desenvolvimento do modelo foram usadas as seguintes suposições:

- a) a redução de volume durante a secagem é desprezível;
- b) o gradiente de temperatura no interior dos grãos é desprezível;
- c) a condução de calor de partícula para partícula é desprezível;
- d) a distribuição do ar na massa de grãos é uniforme;
- e) as paredes do silo são adiabáticas, com capacidades caloríficas desprezíveis;
- f) as capacidades caloríficas do ar e do grão são constantes durante pequenos intervalos de tempo;
- g) as variações da temperatura e da razão da mistura do ar com respeito ao tempo  $\left(\frac{\partial T}{\partial t}\right)$  e  $\left(\frac{\partial W}{\partial t}\right)$ , são desprezíveis quando comparada com a variação da temperatura e da razão de mistura com respeito à posição  $\left(\frac{\partial T}{\partial x}\right)$  e  $\left(\frac{\partial W}{\partial x}\right)$ ;

h) há uma equação capaz de prever a perda de umidade em uma camada delgada de produto, de acordo com os parâmetros de secagem, e uma equação para as isotermas de umidade de equilíbrio.

A primeira suposição é a mais crítica, uma vez que, durante o processo de secagem em camada espessa, os grãos sofrem uma redução de volume, o que resulta no decréscimo da altura da camada. Esse decréscimo de volume não é tão significativo na maioria dos produtos cereais, especialmente nos secadores de fluxo contínuo, nos quais, não mais do que seis a oito pontos percentuais de umidade, são removidos em cada passagem pelo secador.

### 2.1.2 Simulação de Secagem em Leito Fixo:

Para realizar a simulação de secagem em leito fixo por meio do modelo de Michigan, é necessário realizar quatro balanços, que são os seguintes:

#### a) Balanço de energia para o ar

A energia específica transferida por convecção é igual à diferença entre a energia específica do ar que entra e a energia específica do ar que sai do volume de controle ( $A \cdot dx$ ), mais a variação da energia específica do ar contido nos espaços vazios com respeito ao tempo. A quantidade de ar que passa pelo plano  $x$  para o volume ( $A \cdot dx$ ) no intervalo de tempo  $dt$  é igual a:

$$m_a = (\rho_a \cdot V_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W) \cdot A \cdot dt \quad (1)$$

A energia específica do ar que entra no volume de controle ( $A \cdot dx$ ) no intervalo de tempo  $dt$  é:

$$E_e = (\rho_a \cdot V_a \cdot c_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W \cdot c_v) \cdot A \cdot T \cdot dt \quad (2)$$

A energia específica do ar que sai do volume de controle ( $A \cdot dx$ ) no intervalo de tempo  $dt$  é:

$$E_s = (\rho_a \cdot V_a \cdot c_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W \cdot c_v) \cdot \left( T + \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \right) \cdot A \cdot dt \quad (3)$$

A variação da energia específica do ar, em relação à posição vertical, dentro da camada de grãos, no intervalo de tempo  $dt$ , é:

$$\Delta E_1 = E_s - E_e = (\rho_a \cdot V_a \cdot c_a + \rho_a \cdot V_a \cdot W \cdot c_v) \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \cdot dx \cdot A \cdot dt \quad (4)$$

A variação da energia específica do ar dentro do volume de controle com respeito ao tempo é igual a:

$$\Delta E_2 = (\rho_a \cdot c_a + \rho_a \cdot W \cdot c_v) \cdot \epsilon \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial T}{\partial t} \cdot dt \quad (5)$$

Portanto, a variação total na energia específica do ar no intervalo de tempo  $dt$  é:

$$\Delta E_a = (\rho_a \cdot c_a + \rho_a \cdot W \cdot c_v) \cdot A \cdot dx \cdot \left( V_a \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\epsilon \partial T}{\partial t} \right) \cdot dt \quad (6)$$

Com a passagem do ar através do produto, há troca de calor por convecção. A variação da energia específica do ar no intervalo de tempo,  $dt$ , resultante desta transferência de calor é igual a:

$$q = h \cdot a \cdot (T - \theta) \cdot A \cdot dx \cdot dt \quad (7)$$

Assim, o balanço completo de energia específica do ar fica definido por:

$$V_a \cdot \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\epsilon \partial T}{\partial t} = \frac{-h \cdot a \cdot (T - \theta)}{(\rho_a \cdot c_a + \rho_a \cdot W \cdot c_v)} \quad (8)$$

O valor de  $\frac{\partial}{\partial t}$  pode ser desprezado, quando comparado a  $V_a \cdot \frac{\partial T}{\partial x}$ . Fazendo-se

$$V_a \cdot \rho_a = G_a$$

obtém-se:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{-h \cdot a \cdot (T - \theta)}{G_a \cdot c_a + G_a \cdot c_v \cdot W} \quad (9)$$

### b) Balanço de energia para o produto

A energia específica transferida por convecção do ar para o leito de grãos é igual à soma das energias específicas requeridas para o aquecimento do produto, para a evaporação da umidade dos grãos e para o aquecimento do vapor de água dos grãos. Em qualquer tempo,  $t$ , a energia específica dos grãos no volume  $(A \cdot dx)$  é:

$$E_g = A \cdot dx \cdot (\rho_p \cdot c_p + \rho_p \cdot c_w \cdot U) \cdot \theta \quad (10)$$

No tempo  $(t + dt)$ , a energia específica é:

$$E_p = A \cdot dx \cdot (\rho_p \cdot c_p + \rho_p \cdot c_w \cdot U) \cdot \left( \theta + \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dt \right) \quad (11)$$

A quantidade de umidade evaporada no intervalo de tempo  $dt$  é igual à variação da razão da mistura do ar que passa através do volume  $(A \cdot dx)$ .

$$m_e = G_a \cdot A \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \cdot dt \quad (12)$$

A energia específica requerida para evaporação de umidade no intervalo de tempo  $dt$  é:

$$E_r = L_v \cdot G_a \cdot A \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \cdot dt \quad (13)$$

A energia específica necessária para o aquecimento do vapor d'água retirado dos grãos da temperatura  $\theta$  para a temperatura do ar  $T$ , no intervalo de tempo  $dt$ , é:

$$E_a = c_v \cdot (T - \theta) \cdot A \cdot G_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \cdot dt \quad (14)$$

O balanço de energia específica para o produto resulta em:

$$h \cdot a \cdot A \cdot dx \cdot (T - \theta) dt = (\rho_p \cdot c_p + \rho_p \cdot c_w \cdot U) A \cdot dx \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \cdot dt + [L_v + c_v (T - \theta)] G_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} dx \cdot A \cdot dt \quad (15)$$

Assim, a variação da temperatura do produto com respeito ao intervalo de tempo é:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{h \cdot a \cdot (T - \theta)}{\rho_p \cdot c_p + \rho_p \cdot c_w \cdot U} - \frac{L_v + c_v (T - \theta) \cdot G_a}{\rho_p \cdot c_p + \rho_p \cdot c_w \cdot U} \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \quad (16)$$

### c) Balanço de massa para o ar

O vapor d'água contido no ar que entra no volume de controle ( $A \cdot dx$ ) menos a quantidade de vapor que sai de ( $A \cdot dx$ ), mais a variação da umidade do ar nos espaços vazios, é igual à perda de umidade do produto no volume de controle.

A quantidade de vapor que passa no intervalo de tempo  $dt$  pelo plano  $x$  e pelo plano  $(x + dx)$  é igual a:

$$m_{u1} = G_a \cdot W \cdot A \cdot dt \quad (17)$$

$$m_{u2} = G_a \left( W + \frac{\partial W}{\partial x} dx \right) A \cdot dt \quad (18)$$

Assim, a variação na quantidade de vapor d'água do ar é dada por:

$$\Delta m_u = G_a \cdot A \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx \cdot dt \quad (19)$$

A variação na quantidade de vapor do ar intergranular dentro do volume de controle é dada por:

$$\Delta m_g = \varepsilon \cdot A \cdot dx \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot dt \quad (20)$$

A variação na quantidade de água do produto no volume de controle é dada por:

$$\Delta m_a = \rho_p \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \cdot dt \quad (21)$$

Para a umidade do ar, o balanço de massa resulta em:

$$\rho_p \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \cdot dt = G_a \cdot A \cdot W \cdot dt - G_a \cdot A \cdot \left( W + \frac{\partial W}{\partial x} dx \right) dx + \varepsilon A \cdot dx \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot dt \quad (22)$$

Desprezando o termo  $\frac{\partial w}{\partial t}$ , tem-se:

$$\rho_p \cdot A \cdot dx \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \cdot dt = G_a \cdot A \cdot W \cdot dt - G_a \cdot A \cdot (W + \frac{\partial W}{\partial x}) \cdot dx + \varepsilon \cdot A \cdot dx \cdot \rho_a \cdot \frac{\partial W}{\partial t} \cdot dt$$

$$\rho_p \cdot dx \cdot \frac{\partial U}{\partial t} - (G_a \cdot W) + (G_a \cdot W) = -G_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx$$

$$-\frac{\partial W}{\partial x} \cdot dx = \frac{\rho_p \cdot dx \cdot \frac{\partial U}{\partial t}}{G_a}$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = -\frac{\rho_p}{G_a} \cdot \frac{\partial U}{\partial t} \quad (23)$$

#### d) Balanço de massa para o produto

Para o teor de umidade do produto, pode-se escrever:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \text{uma equação de secagem em camada fina apropriada} \quad (24)$$

Tem-se que:

$$\frac{\partial u}{\partial x} = \frac{\partial u}{\partial t} \frac{\partial t}{\partial x}$$

O teor de umidade pode ser obtido por meio de uma equação empírica de secagem em camada delgada, ou em um modelo teórico capaz de prever o fluxo de umidade no interior das partículas.

As três equações diferenciais, (9), (16), e (23), juntas com a equação de secagem em camada delgada, constituem o modelo de simulação de secagem para leito fixo.

### 2.1.3 Simulação de secagem em fluxos contracorrentes:

No secador de fluxos contracorrentes, o ar e o produto escoam em sentidos opostos. As equações resultantes dos balanços de energia e massa para um volume diferencial ( $A \cdot dx$ ) são as seguintes:

$$\frac{\partial T}{\partial x} = - \frac{h \cdot a \cdot (T - \theta)}{(G_a \cdot c_a + G_a \cdot c_v \cdot W)} \quad \text{Para } T > \theta \quad (25)$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial x} = \frac{h \cdot a \cdot (T - \theta)}{(G_p \cdot c_p + G_p \cdot c_w \cdot U)} - \frac{[L_v + c_v \cdot (T - \theta)]}{(G_p \cdot c_p + G_p \cdot c_w \cdot U)} \cdot G_a \cdot \frac{\partial W}{\partial x} \quad (26)$$

$$\frac{\partial W}{\partial x} = \frac{G_p}{G_a} \frac{\partial U}{\partial x} \quad (27)$$

A lei de Newton aplicada à transferência de massa é:

$$\frac{\partial U}{\partial t} = - k_s \cdot (U - U_e) \quad (28)$$

Que é uma equação genérica para secagem, a solução dessa equação é:

$$\frac{U - U_e}{U_o - U_e} = \exp(-ks \cdot t) \quad (29)$$

Para a simulação desta variação da umidade com relação ao tempo recorre-se a um modelo onde esta relação possa ser encontrada de forma direta, conforme descrito na simulação do modelo de Hukill (vide parágrafo 2.2).

Para os parâmetros do modelo de Michigan são determinados utilizando as seguintes correlações (Incropera e de Witt, 1990):

$$Nu = 1,54 Pr^{\frac{1}{3}} Re^{0,5} \quad (30)$$

$$Re = G_a \frac{D_p}{\mu} \quad (31)$$

$$h = \frac{Nu k_{ar}}{D_p} \quad (32)$$

Para resolver o modelo de simulação de secagem da Universidade de Michigan, devem-se conhecer as condições iniciais e de contorno. Essas condições são: temperatura e umidade iniciais ou de entrada do produto, temperatura e umidade do ar de secagem. Assim, as condições de contorno para a secagem em fluxos contracorrentes são:

$$T(0) = T(\text{entrada})$$

$$\theta(0) = \theta(\text{entrada})$$

$$W(0) = W(\text{entrada})$$

$$U(0) = U(\text{entrada})$$

## 2.2 Modelo de Hukill:

Equações empíricas de secagem em camada delgada, conjugadas com equações psicrométicas, balanços de energia e massa, têm sido usadas com sucesso para a simulação de secagem a temperatura ideal na faixa  $43 \leq T < 71^\circ \text{C}$ , equação utilizada por Troeger – Hukill.

Um dos primeiros trabalhos para modelar o processo de secagem de grãos em camada espessa foi desenvolvido por Hukill (QUEIROZ, 1990). O modelo se baseia numa equação que prevê o teor de umidade do produto conforme a altura da camada e tempo de secagem. O modelo despreza o calor sensível dos grãos e admite que a temperatura do ar decresce, exponencialmente, à medida que o ar vai passando pela massa de grãos.

Apesar de terem sido propostos modelos mais sofisticados, a facilidade de solução do modelo de Hukill tem contribuído para que este seja largamente utilizado na análise de problemas de secagem de grãos.

No modelo de Hukill, o teor de umidade,  $U$ , para posição  $x$  e tempo  $t$ , é obtido por meio da Equação (33):

$$RU = \frac{2^D}{2^D + 2^Y - 1} \quad (33)$$

em que

$$RU = \frac{U - U_e}{U_o - U_e} \quad (34)$$

O adimensional de profundidade é calculado por meio da Equação (35):

$$D = \frac{x \cdot w \cdot L_v (U_o - U_e)}{C_a \cdot t^{1/2} \cdot m \cdot (T_o - T_e)} \quad (35)$$

A massa específica, expressa em base seca, é definida por:

$$w = \frac{P}{1 + U_o} \quad (36)$$

O adimensional de tempo é definido por:

$$Y = \frac{t}{t^{1/2}} \quad (37)$$

O tempo de meia resposta é definido como o período de tempo necessário para que a razão de umidade do produto RU, dada pela Equação (34), seja reduzida de 1 para 0,5 em determinadas condições do ar de secagem, (QUEIROZ, 1990) mostra segundo Brooker valores de tempo de meia resposta para milho com diferentes teores de umidade inicial e diferentes temperaturas de secagem.

Esses dados podem ser representados pela Equação (38):

$$t^{1/2} = \exp \left[ 2,102 - \frac{1,27 \cdot U_o}{1 + U_o} + 0,00407 \cdot T_o - \frac{0,0769 \cdot U_o \cdot T_o}{1 + U_o} \right] \quad (38)$$

A equação do tempo de meia resposta pode ser obtida por meio das equações empíricas de secagem em camada delgada. Essas equações geralmente são definidas na forma

da Equação (39). O tempo de meia resposta é obtido fazendo  $RU = 0,5$  e explicitando o tempo  $t$  :

$$RU = f (T_o, UR, t) \quad (39)$$

A ASAE, American Society of Agricultural Engineers (QUEIROZ, 1990) apresenta os parâmetros da equação de umidade de equilíbrio de Henderson modificada, sendo o teor de umidade de equilíbrio definido pela Equação (40), cujos parâmetros são apresentados na Tabela 2.1.

$$U_e = \left[ \frac{\ln(1 - 0,01 \cdot UR)}{-K \cdot (T_o + C)} \right]^{1/N} \quad (40)$$

### 2.2.1 Parâmetros da equação de Henderson:

Os parâmetros C, K e N são definidos na Tabela 2.1 em função de cada produto.

**Tabela 2.1** - Parâmetros da equação de Henderson

<b>Produto</b>	<b>C</b>	<b>K</b>	<b>N</b>
Cevada	195,267	0,2425	2,0123
Feijão	254,23	0,1209	1,8812
<b>Milho</b>	<b>49,81</b>	<b>0,4613</b>	<b>1,8634</b>
Arroz com casca	51,161	1,4901	2,4451
Sorgo	113,725	0,7629	2,4757
Soja	134,136	0,0827	1,2164
Trigo duro	55,815	0,8576	2,2857

## CAPÍTULO 3 AUTOMAÇÃO E CONTROLE

Neste capítulo mostram-se os procedimentos básicos recomendáveis para automação e otimização do secador, objeto deste trabalho.

O esquema funcional de automação genérico é mostrado abaixo.

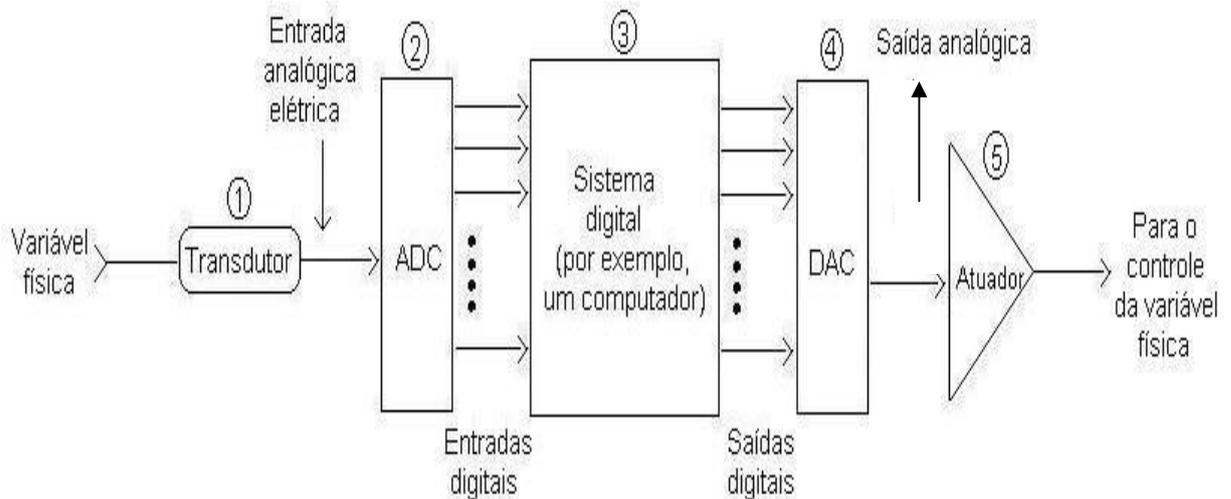


Figura 4 - Conversor de dados de entrada e saída

Um sistema de Aquisição de Dados é composto por 4 partes básicas (LYNXTEC, 2005):

- Sensores / transdutores;
- Condicionador de sinais;
- Conversor A/D e controles associados;
- Programa

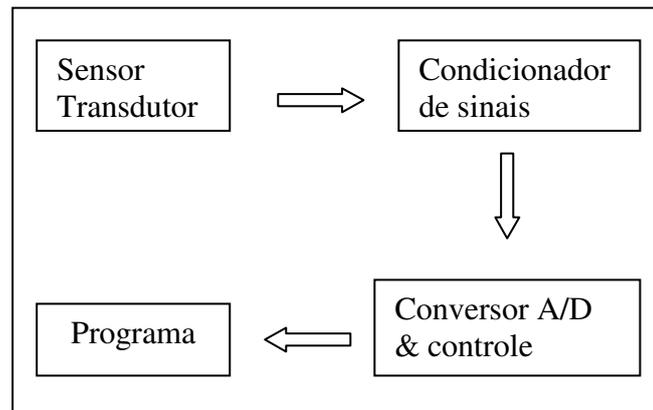


Figura 5 - Conversor analógico digital

Os sensores e transdutores são os elementos que captam variações físicas e convertem-nas em sinais e impulsos elétricos. Transdutor é um termo usado para designar alguns tipos de sensores. Em um sistema de aquisição de dados a escolha dos sensores é um passo importante para a obtenção dos resultados com a precisão adequada.

Existem vários sensores e transdutores disponíveis, tais como:

- Termopares (para medição de temperatura)
- Sensores de vazão
- Sensores de umidade, etc...

Os condicionadores de sinais são circuitos eletrônicos que adequam os sinais analógicos para a conversão digital. Os principais sub-componentes dos condicionadores são os amplificadores, filtros e isoladores. Através dos amplificadores, o sinal analógico é amplificado para ajustar-se à faixa de entrada do conversor A/D; no caso de necessidade, o amplificador responsabiliza-se também pela alimentação dos sensores. Os filtros reduzem os ruídos do sinal analógico, ou seja, diminuem eventuais interferências originadas por diversas fontes: radiofrequência, rede elétrica, aterramento, etc. Os isoladores, quando presentes, têm a

função de proteger os outros módulos contra sobrecargas de tensão e corrente, as quais podem danificar os circuitos eletrônicos digitais.

O conversor A/D (analógico para digital) é o elemento responsável por traduzir uma grandeza elétrica numa representação numérica adequada ao tratamento digital do sinal receitado. Necessita-se que o sinal proveniente do condicionador respeite algumas condições:

- O sinal não deve ultrapassar a faixa de entrada do conversor A/D;
- A taxa de variação do sinal deve respeitar a taxa de amostragem da aquisição;
- O sinal deve ser adequado a faixa de entrada do A/D, sinais muito pequenos não permitem uma boa resolução na conversão digital.

Após a conversão para digital é necessário que esta informação chegue ao computador. Tem-se inúmeras formas para isto:

- Comunicação serial RS (RS-232, RS-422, RS-485, etc);
- Comunicação USB;
- Comunicação através da porta paralela (usada normalmente pela impressora);
- Conexão ao slot (barramento interno) do computador. Existem diversos padrões de barramento, sendo na linha PC, os mais importantes os slot ISA e PCI. O slot ISA é usado na área industrial;
- Comunicação em rede Ethernet. A rede Ethernet é uma tecnologia consolidada. Esta tecnologia apresenta inúmeras vantagens para a aquisição de dados. Pode-se utilizar muitos avanços nesta tecnologia em um sistema de aquisição de dados, tais como a capacidade de conexão a longa distância seja por fio ou rádio (wireless LAN) ou fibra óptica;

O programa de Aquisição de Dados é o responsável pelo controle do sistema de um ou mais secadores simultaneamente, permitindo ao usuário parametrizar, comandar e monitorar o processo de aquisição de dados. Os programas de aquisição de dados armazenam os sinais captados na forma de arquivos que podem ser consultados posteriormente. Estes programas possibilitam a visualização e edição dos dados receptados, bem como a geração de relatórios e outras documentações impressas.

### **3.1 Descrição do Sistema de Automação:**

O monitoramento será feito de tal forma a iniciar-se a partir do princípio do carregamento da câmara de secagem. Liberar a saída dos grãos através da leitura do sensor de umidade do produto, situados próximos ao nível médio da altura da camada de grãos, liberando o acionamento da grelha de descarga sempre quando a condição de umidade máxima for atendida. Este procedimento garante a uniformidade de produto dentro das exigências de secagem nas primeiras camadas.

### **3.2 Otimização da Secagem:**

Através da monitoração da velocidade de secagem, por meio das medidas de umidade em função do tempo, é possível fazer-se o controle da vazão de ar, necessidade de atuação do sistema de desumidificação e/ou aquecimento do ar de secagem. A velocidade de secagem é definida como sendo a retirada de umidade do produto dividida pelo tempo de secagem.

### **3.3 Sistema de Automação aplicado ao Secador:**

A Figura 6 apresenta o fluxograma de automação do secador. Inicia-se o monitoramento com o recebimento dos inputs dos sensores controlados pelo programa de controle e otimização. À partir desta leitura a seqüência é a liberação do produto (descarga), se a umidade for menor que a umidade mínima, caso contrário passa pelo timer de controle e liga ventilador e na seqüência, através da monitoração da velocidade de secagem controla os demais atuadores de secagem como desumidificador, aquecedor e fluxo de ar do ventilador. O desligamento do sistema será comandado pelo timer em função do tempo máximo em que o enchimento de produto não for atuado.

### Fluxograma do Processo da Automação do Secador

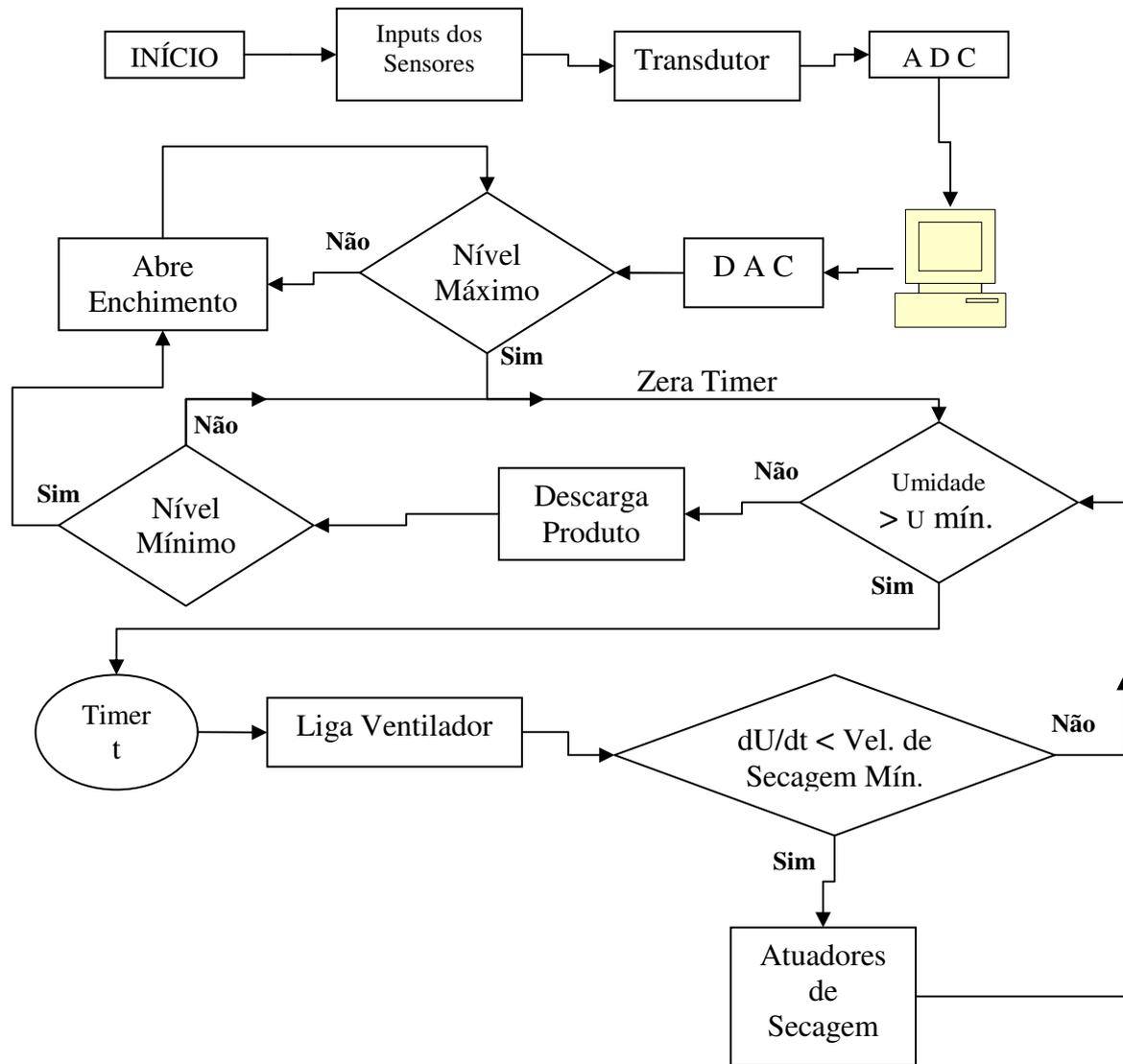


Figura 6 - Fluxograma da automação do secador

### **3.4 Sensores utilizados:** (vide localização na Figura 15):

**S1** – sensor de altura da camada (mínima).

**S2** – sensor de altura da camada (total).

**S3** – sensor de umidade do ar (entrada).

**S4** – sensor de umidade do ar (saída).

**S5** – sensor de umidade do produto (entrada).

**S5a** – sensor de umidade do produto (saída).

**S6** – sensor de temperatura do ar (entrada).

**S7** – sensor de temperatura do ar (saída).

**S8** – sensor de temperatura do produto (entrada).

**S9** – sensor de temperatura do produto (saída).

**S10** – sensor de vazão do ar (entrada).

**S11** – sensor de vazão do ar (saída).

#### **3.4.1 Sensores – S1,S2:**

**S1** – sensor de altura da camada (mínima).

**S2** – sensor de altura da camada (total).

O detector de nível infravermelho (MICROHARD, 2005) tem aplicação no controle de nível para cereais, sob forma de grãos. Funcionamento: O feixe de luz invisível é interrompido pelo material, quando o mesmo alcança o nível da posição do sensor. O dispositivo possui uma memória, que produz na saída um sinal definido, quando o sensor é encoberto ou descoberto pelo produto (Figura 7).



Figura 7 - Sensor de altura

### 3.4.2 Sensores – S3,S4:

**S3** – sensor de umidade do ar (entrada).

**S4** – sensor de umidade do ar (saída).

Estes transdutores higrotermais (DIGITROL, 2005), medem a umidade atmosférica relativa e a temperatura e, opcionalmente, podem calcular a temperatura de ponto de orvalho e a umidade absoluta, taxa de mistura, calor específico e temperatura de bulbo úmido (Figura 8).



Figura 8 - Sensor de umidade do ar

### 3.4.3 Sensores – S5, S5a :

**S5** – sensor de umidade do produto (entrada).

**S5a** – sensor umidade do produto (saída).

A Figura 9 mostra o aparelho eletrônico para medição de umidade em todas as espécies cereais (WALD-MEISTER, 2005). Alguns sensores deste tipo possuem compensação automática da influência da temperatura sobre o material a ser analisado. Não é necessário pesar ou triturar o material a ser analisado e a margem de medição entre 4 e 32% de umidade (de acordo com a espécie de cereal).



Figura 9 - Sensor de umidade do produto

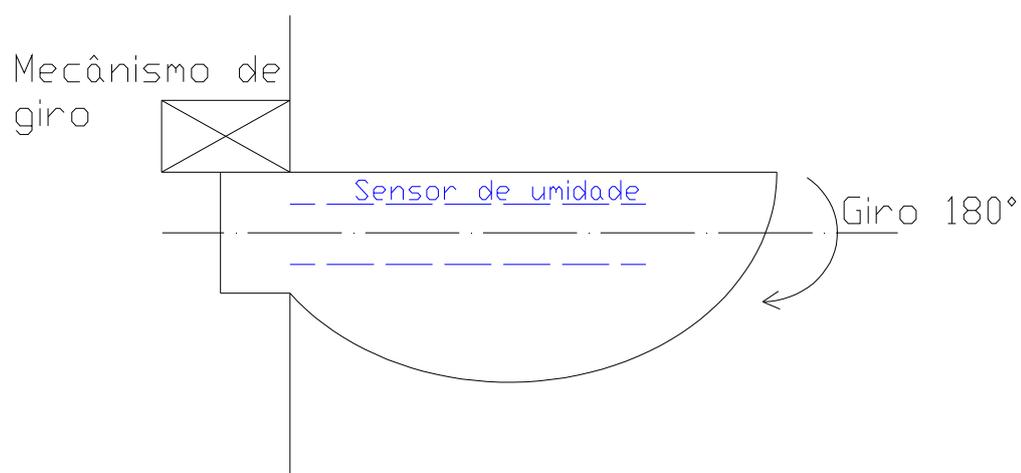


Figura 10 - Proteção do sensor de umidade do produto

Fixa-se a Figura 10, proteção do sensor de umidade do produto na parede do secador, para isolar o produto do fluxo de ar durante a medição de umidade.

#### 3.4.4 Sensores - S6, S7, S8, S9:

**S6** – sensor de temperatura do ar (entrada).

**S7** – sensor de temperatura do ar (saída).

**S8** – sensor de temperatura do produto (entrada).

**S9** – sensor de temperatura do produto (saída).

Para as medidas de temperatura serão utilizados termômetros eletrônicos dos tipos termopar (WIDITEC, 2005), projetados para indicar temperaturas em secadores de cereais (Figura 11).



Figura 11 - Sensor de temperatura

O sensor de temperatura do ar está localizado na entrada do produto acima do dispositivo de carregamento o sensor de temperatura do ar localiza-se na saída do produto.

### 3.4.5 Sensores - S10,S11:

**S10** – sensor de vazão do ar (entrada).

**S11** – sensor de vazão do ar (saída).

A Figura 12 apresenta o aparelho medidor de fluxo (UFLA, 1999), o fluxo de ar é dirigido ao componente de leitura através de um tubo, e é desenvolvida uma pressão no flutuador, que se desloca, provocando uma deflexão no ponteiro, o fluxômetro pode ser empregado no controle de fluxo de ar de secadores e aeradores.

Deve ser previsto um potenciômetro ao eixo de giro do ponteiro indicador do fluxômetro para transferir o sinal para o sistema de controle.

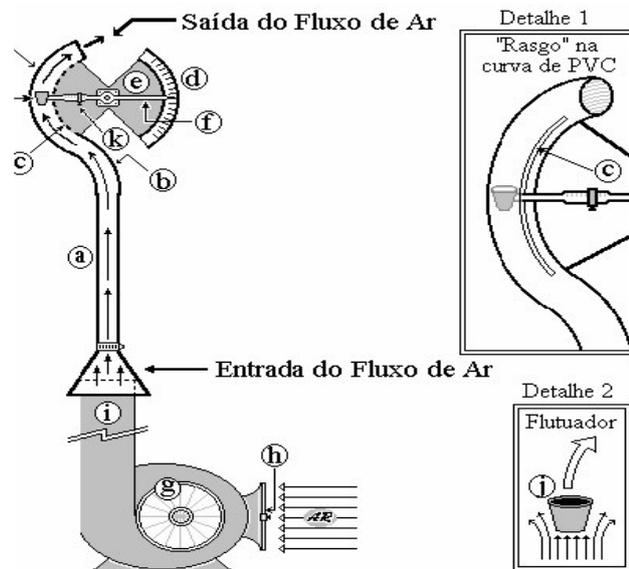


Figura 12 - Sensor de vazão de ar

### 3.5 Programação Lógica do Sistema de Automação:

As funções para o secador são mostrados abaixo e sua localização é apresenta na Figura 15.

f1 - função de entrada do produto (aberta, fechada)

f2 - função de saída do produto com grelha (ligada, desligada)

f3 - função fluxo de ar (máximo, mínimo)

f4 - função aquecimento fluxo de ar (máximo até mínimo, ligado, desligado)

f5 - função desumidificador (máximo até mínimo, ligado, desligado)

S1 - Sensor nível mínimo (nível A)

S2 - Sensor nível máximo (nível C)

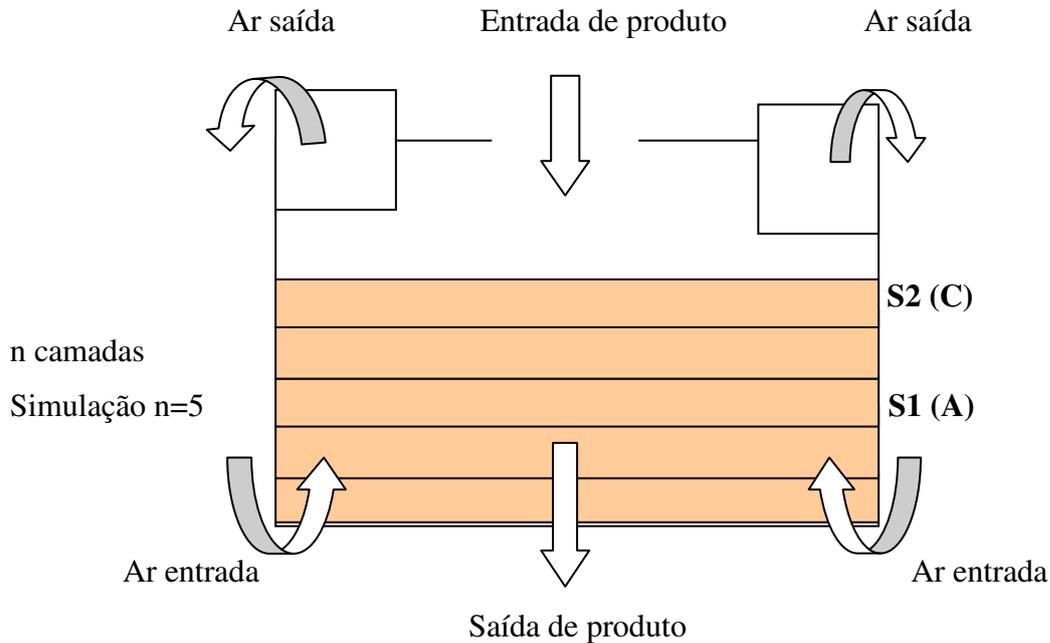


Figura 13 - Esquema de camadas e secagem

#### Observação Sobre os Programas de Automação:

- A automação de carga e descarga para liberação do produto é feita conforme a Tabela 2.2, tabela verdade e Figura 14, lógica de automação de carga e descarga do secador.
- A automação dos cálculos é feita através do programa Mathcad e a simulação mostrada através dos gráficos (vide parágrafo 4.3). Para a otimização deve-se fazer uma customização em função das necessidades circunstanciais do usuário como:
  1. Risco de deterioração do produto - atuadores de aumento de velocidade de secagem no limite máximo.
  2. Condição normal - deve-se buscar uma condição econômica, ou seja, busca-se a temperatura de equilíbrio onde existe menos desperdício de energia do sistema de aeração.
- Estes estudos devem ser efetuados caso a caso, para tanto, o programa de otimização de preferência deve ser customizado.

Tabela 2.2 - Tabela Verdade

	S1	U	S2	f1	f2	Equações Lógicas
Nível A	0	0	0	0	1	$\overline{S1.U.S2.f1.f2}$
	0	1	0	0	1	$\overline{S1.U.S2.f1.f2}$
Nível B	0	0	0	0	1	$\overline{S1.U.S2.f1.f2}$
	0	1	0	0	1	$\overline{S1.U.S2.f1.f2}$
Nível C	1	1	1	1	1	$S1.U.S2.f1.f2$
	1	0	1	1	0	$S1.U.S2.f1.f2$

“opcional”  
Programa de  
otimização e  
atuadores até  
umidade  
mínima

Volta para  
verificação  
após  
descarga

**Nota:** Controle de carga e descarga do produto no secador

U - Umidade maior que umidade mínima.

$\overline{U}$  - Umidade menor ou igual que umidade mínima.

U - 0 - Umidade menor ou igual que umidade mínima.

U - 1 - Umidade maior que umidade mínima.

S2 - Produto no nível do sensor S2C (máximo).

$\overline{S2}$  - Produto abaixo do nível do sensor S2C (máximo).

S2 - 0 - Produto abaixo do nível do sensor S2C (máximo).

S2 - 1 - Produto no nível do sensor S2C (máximo).

S1 - Produto acima do sensor S1A (mínimo).

$\overline{S1}$  - Produto no nível do sensor S1A (mínimo).

S1 - 0 - Produto no nível do sensor S1A (mínimo).

S1 - 1 - Produto acima do sensor S1A (mínimo).

f1 - Entrada de produto fechada.

$\overline{f1}$  - Entrada de produto aberta.

f1 - 0 - Entrada de produto aberta.

f1 - 1 - Entrada de produto fechada.

f2 - Saída de produto fechada

$\overline{f2}$  - Saída de produto aberta.

f2 - 0 - Saída de produto aberta.

f2 - 1 - Saída de produto fechada.

### Teste do sistema de lógica:

**Nível A – 1º Condição** ( $\overline{S1}.\overline{U}.\overline{S2}.\overline{f1}.\overline{f2}$ ) – Produto no nível mínimo ( $\overline{S1}$ ), umidade menor ou igual umidade mínima ( $\overline{U} < 13$ ), abre entrada de produto ( $\overline{f1}$ ).

**Nível A – 2º Condição** ( $\overline{S1}.\overline{U}.\overline{S2}.\overline{f1}.f2$ ) – Produto no nível mínimo ( $\overline{S1}$ ), umidade maior que umidade mínima ( $U > 13$ ), abre entrada de produto ( $\overline{f1}$ ).

**Nível C – 1º Condição** ( $S1.U.S2.f1.f2$ ) – Produto no nível máximo (S2) e umidade maior que umidade mínima ( $U > 13$ ), mantém secagem.

**Nível C – 2º Condição** ( $S1.\overline{U}.S2.f1.\overline{f2}$ ) – Produto no nível máximo (S2) e umidade menor ou igual que umidade mínima ( $\overline{U} < 13$ ), saída de produto aberta.

### Lógica da Automação do Secador

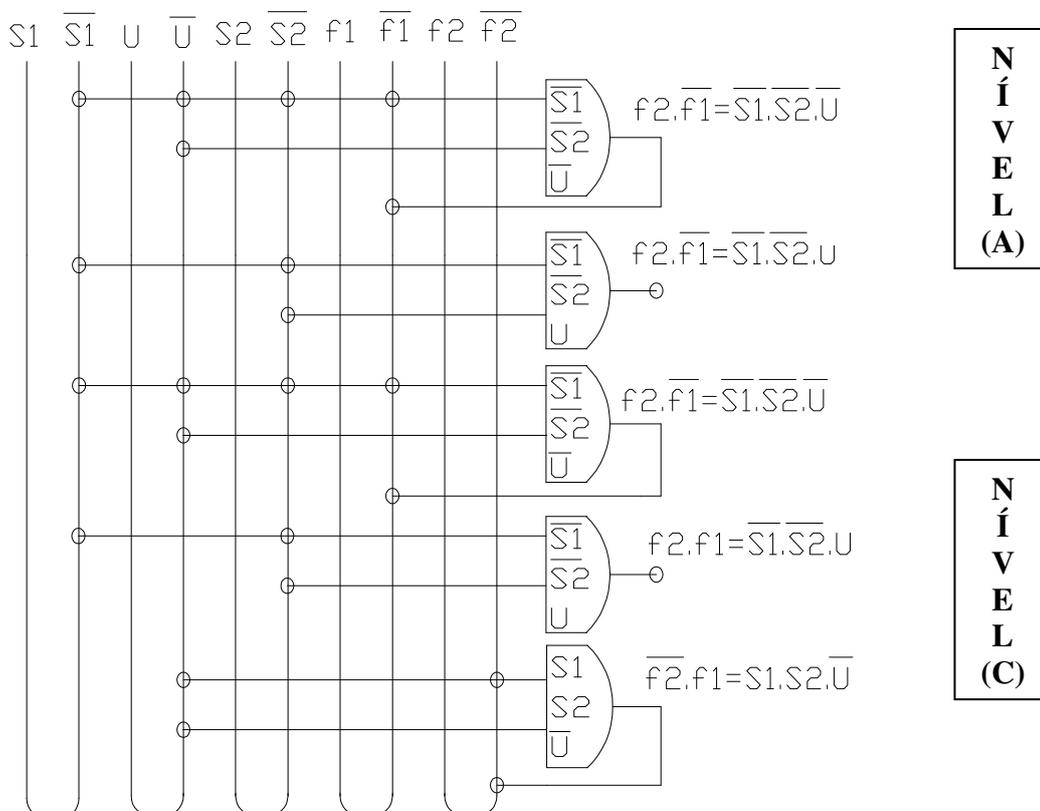


Figura 14 - Lógica da automação de carga e descarga do secador - portas E

## ESQUEMA DO SISTEMA DE CONTROLE

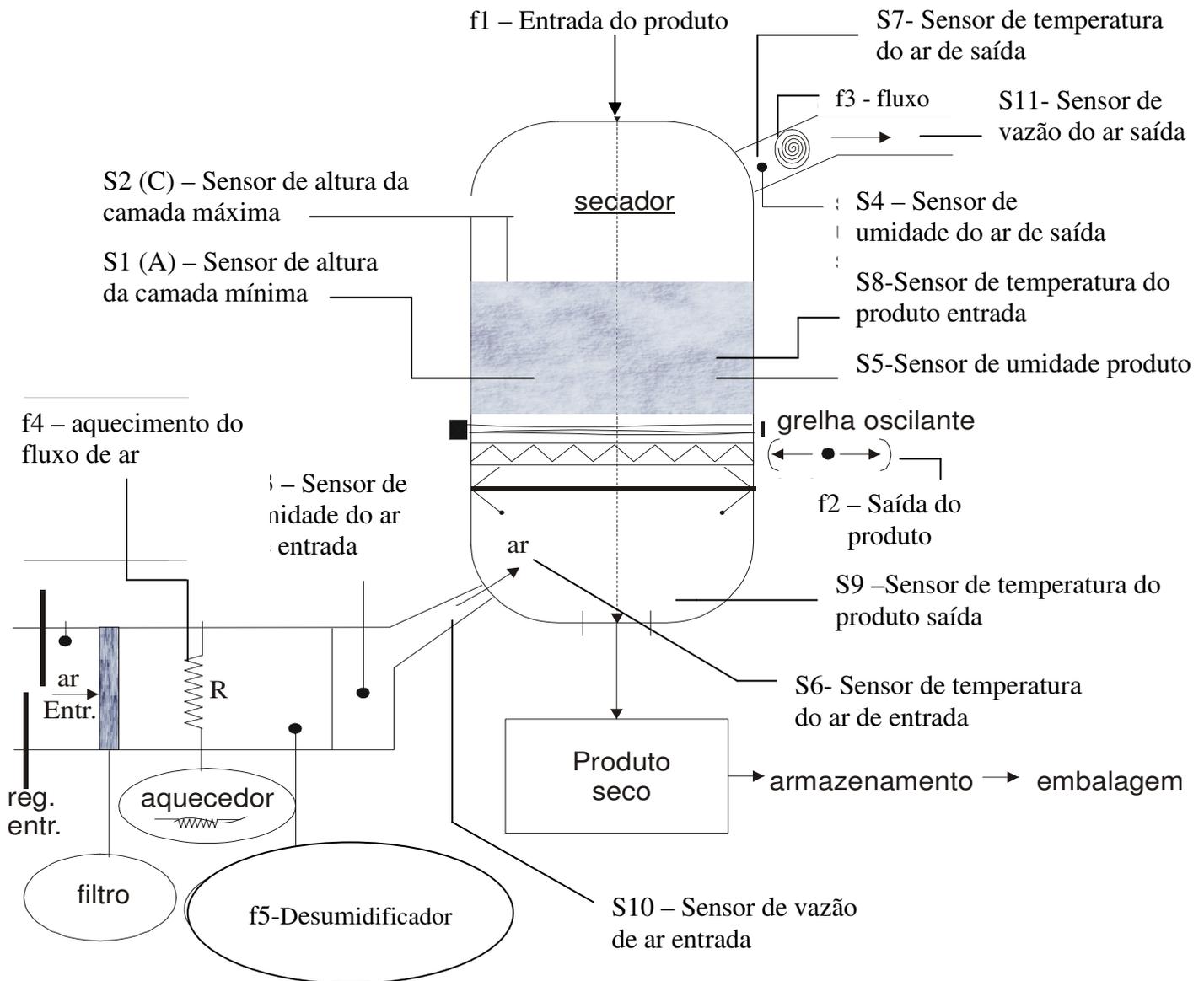


Figura 15 - Esquema do sistema de controle

## CAPÍTULO 4 SIMULAÇÃO DO PROCESSO DE SECAGEM

O processo da simulação é feito de forma iterativa e automática, camada por camada na primeira hora, segunda hora, até a ultima camada quando a umidade do produto alcance a umidade mínima requerida. Os resultados da primeira camada são transferidos para o cálculo da segunda e assim por diante.

As condições do ar de entrada são em princípio invariáveis dentro do processo de cálculo, tanto na primeira hora, segunda hora até inúmeras horas, mas varia de camada para camada, pois retira-se umidade do produto. O modelo de Hukill é utilizado para o cálculo da umidade em cada camada, de forma iterativa, nas demais determinações como umidade do ar, temperatura do produto e do ar, utiliza-se o modelo de Michigan.

Este processo de simulação é apresentado a seguir e os resultados obtidos são mostrados através de gráficos e servem para alimentar o processo de otimização de secagem. É conveniente esclarecer neste ponto que a simulação a seguir apresentada está servindo apenas como ilustração do sistema de automação apresentado.

### 4.1. Dados de Entrada da Simulação:

Os parâmetros e dados de entrada para simulação estão definidos a seguir, os quais são inseridos como *inputs* no programa de cálculo (Mathcad), os *outputs* são apresentados através dos gráficos obtidos e mostrados no parágrafo 4.3.

Para a obtenção dos valores utilizados de simulação considerou-se o que segue.

## 4.2 Parâmetros da Simulação:

### Características do secador;

Altura da camada de grãos (adotado)	0,5 (m)
Temperatura de equilíbrio (adotado)	30 (°C)
Vazão de ar nas condições ambientes (adotado)	300 (m <sup>3</sup> /min)
Área transversal do secador	30 (m <sup>2</sup> )
Volume do secador (adotado)	15 (m <sup>3</sup> )
Área específica do secador	2 (1/m)

**Nota:** Temperatura de equilíbrio é definida como a temperatura com que o ar sai da massa de grãos. Esta temperatura tende a um valor de equilíbrio durante o processo (QUEIROZ, 1990).

### Características do produto (milho);

Diâmetro equivalente da partícula de milho	0,005 (m)
Calor específico de vaporização de água contida no produto	2417,45 (kJ.kg <sup>-1</sup> )
Calor específico do produto	2,146 (kJ/kg .K)
Massa específica expressa em matéria seca (equação 36)	585 (kg.m <sup>-3</sup> )
Massa específica do produto úmido (entrada-adotado)	750 (kg.m <sup>-3</sup> )
Temperatura ambiente e de entrada do produto	20 (°C)
Teor de umidade inicial do produto, bulbo úmido	0,2821
Teor de umidade final do produto, bulbo úmido	0,1494

### Características do ar (Incropera e de Witt, 1990);

Coeficiente de transferência de calor por convecção (Eq. 32)	0,0575 (kJ.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> .° C <sup>-1</sup> )
Calor específico do ar	1,040 (kJ/kg.° C <sup>-1</sup> )

Condutividade térmica do ar	0,00003488 (kJ.m <sup>-1</sup> .s <sup>-1</sup> .° C <sup>-1</sup> )
Temperatura do ar na entrada do secador (adotado)	60 (°C)
Umidade relativa do ar ambiente (adotado)	70 %
Umidade relativa do ar de secagem (adotado)	8 %
Viscosidade dinâmica do ar	0,00002 (N.s. m <sup>-2</sup> )

**Parâmetros adimensionais (Incropera e de Witt, 1990);**

Numero de Prandtl	0,702
Numero de Reynolds (Equação 31)	49,025
Numero de Nusselt (Equação 30)	9,5832

### 4.3 Resultados da Simulação:

Os resultados apresentados nas Figuras 16, 17, 18 e 19 foram determinados utilizando-se as Equações (25), (26), (27), (33), (34), (35), (36), (37), (38), e (40) e os dados do item 4.2.

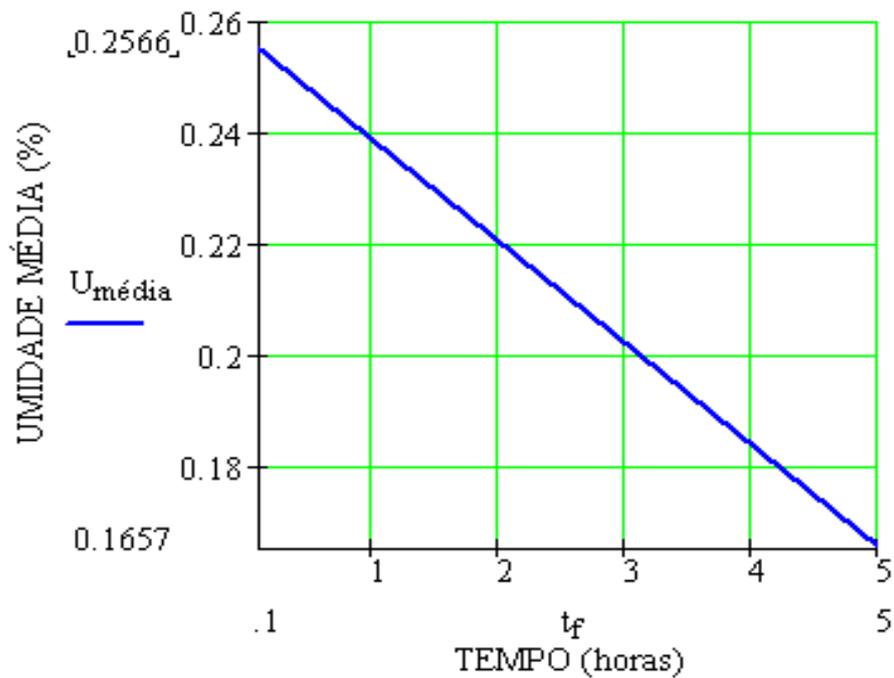


Figura 16 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas

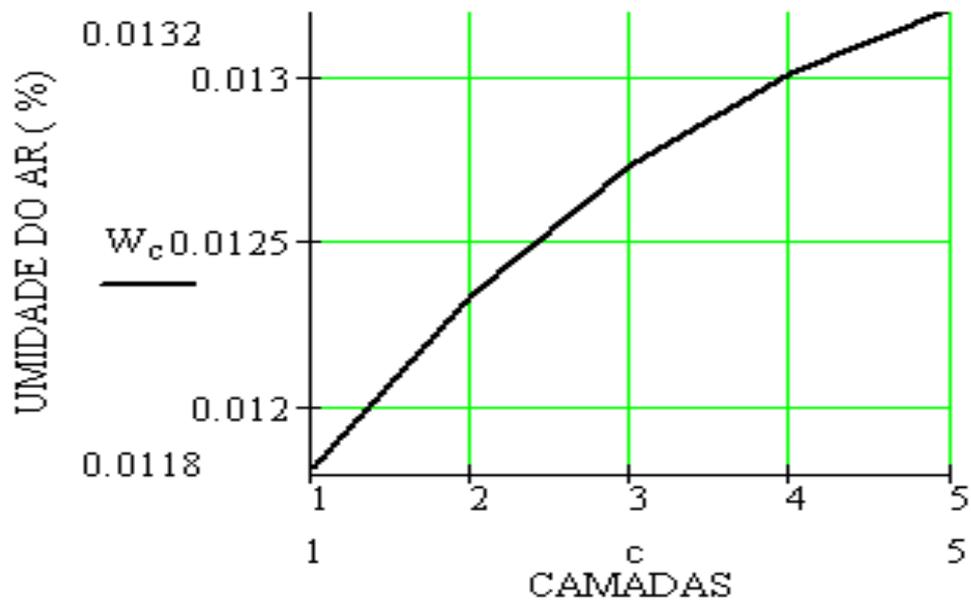


Figura 17 - Umidade do ar nas camadas em 1 hora

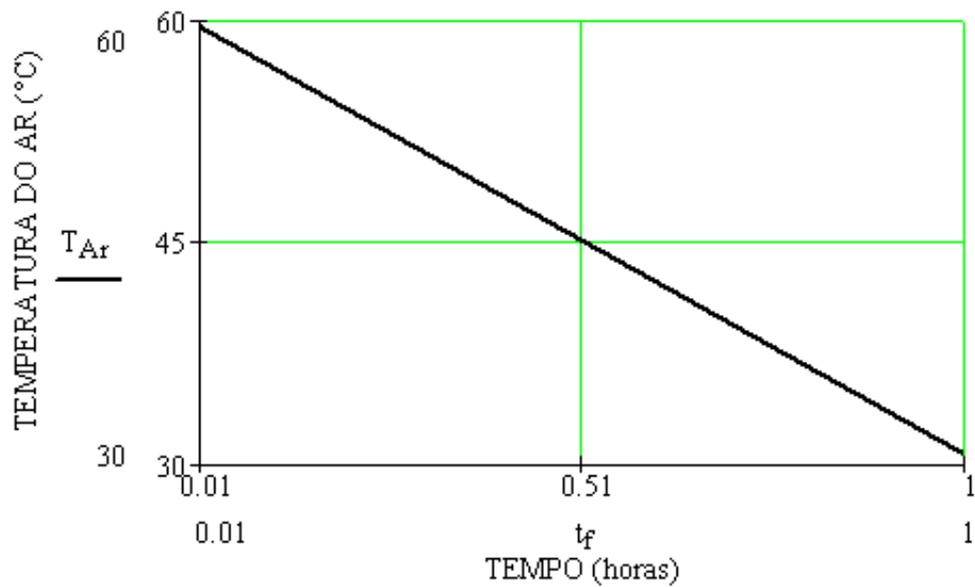


Figura 18 - Temperatura do ar nas camadas em 1 hora

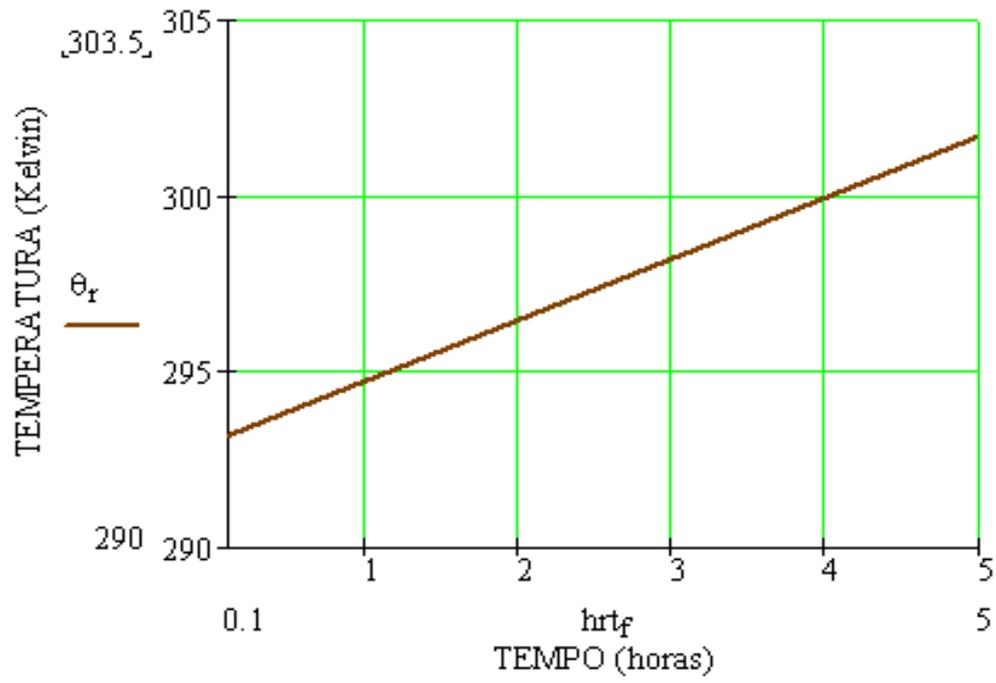


Figura 19 - Temperatura do produto nas camadas em 5 horas

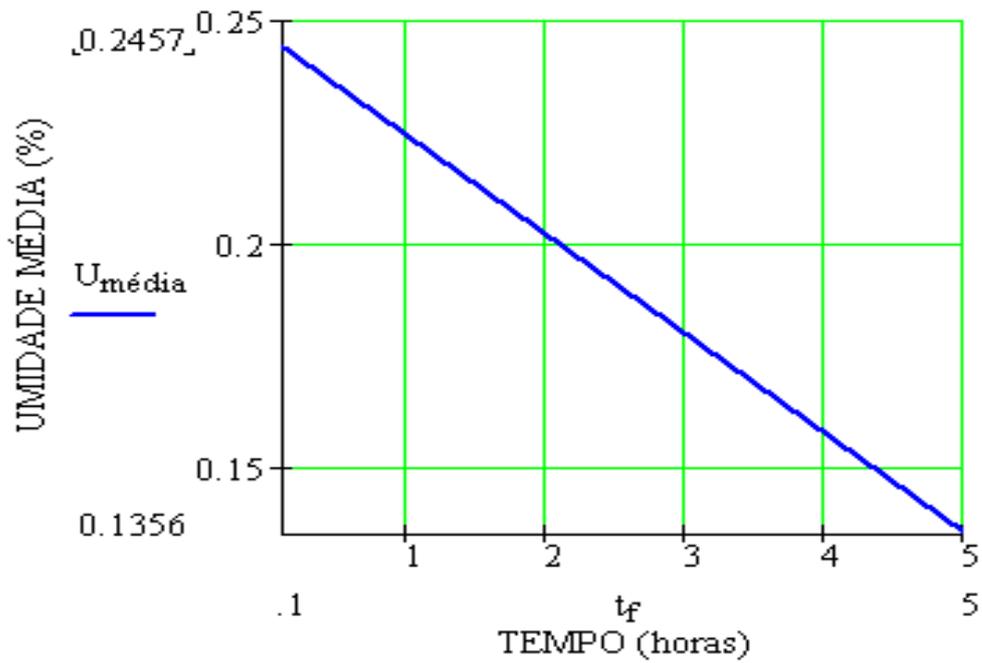


Figura 20 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas

Condição: vazão mássica de ar  $G_a=0,392$  ( $\text{kg}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$ )

**Comentários:** Observa-se, comparando as Figuras 16 e 20 que, com fator de multiplicação 2 na vazão mássica de ar ( $G_a$ ), obteve-se uma redução de 3,01% na umidade média do produto em 5 horas.

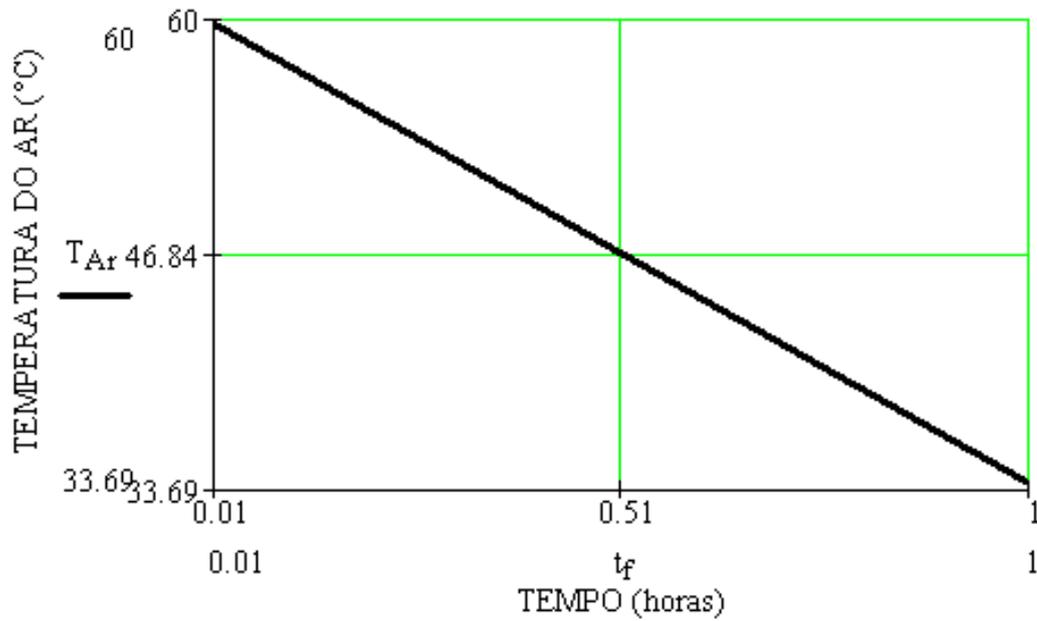


Figura 21 - Temperatura do ar em 1 hora nas camadas

Condição: vazão mássica de ar  $G_a=0,392$  (kg/ m<sup>2</sup> .s)

**Comentários:** Observa-se, comparando as Figuras 18 e 21 que, dobrando-se a vazão mássica de ar ( $G_a$ ), obteve-se um aumento de 12,3% na temperatura do ar em 1 hora nas camadas.

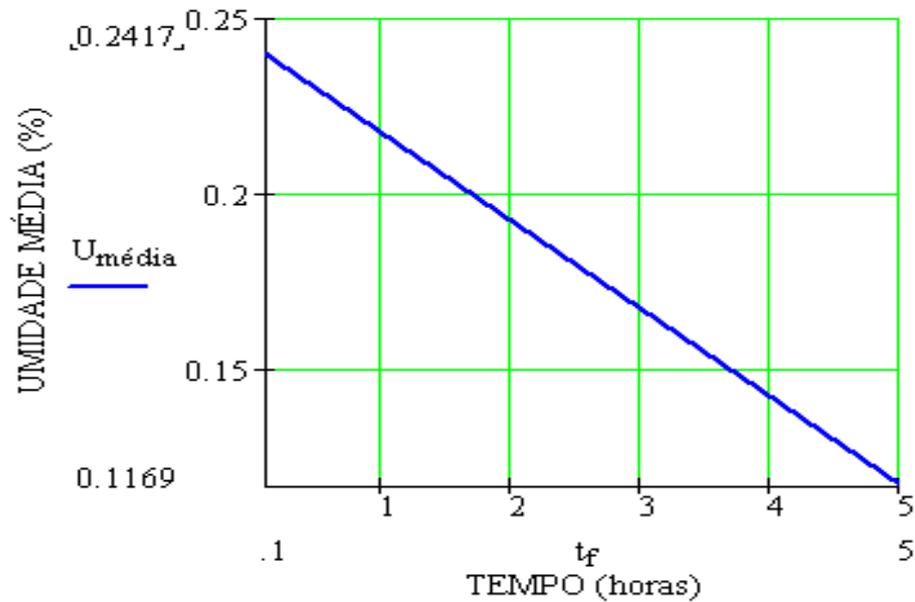


Figura 22 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas

Condição: vazão mássica de ar  $G_a=0,392$  (kg/ m<sup>2</sup> .s) e temperatura do ar 70°C

**Comentários:** Observa-se, comparando as Figuras 20 e 22 que, com aumento de 10°C na temperatura do ar ( $T_o$ ), obteve-se uma redução de 1,87 % na umidade média do produto nas camadas em 5 horas.

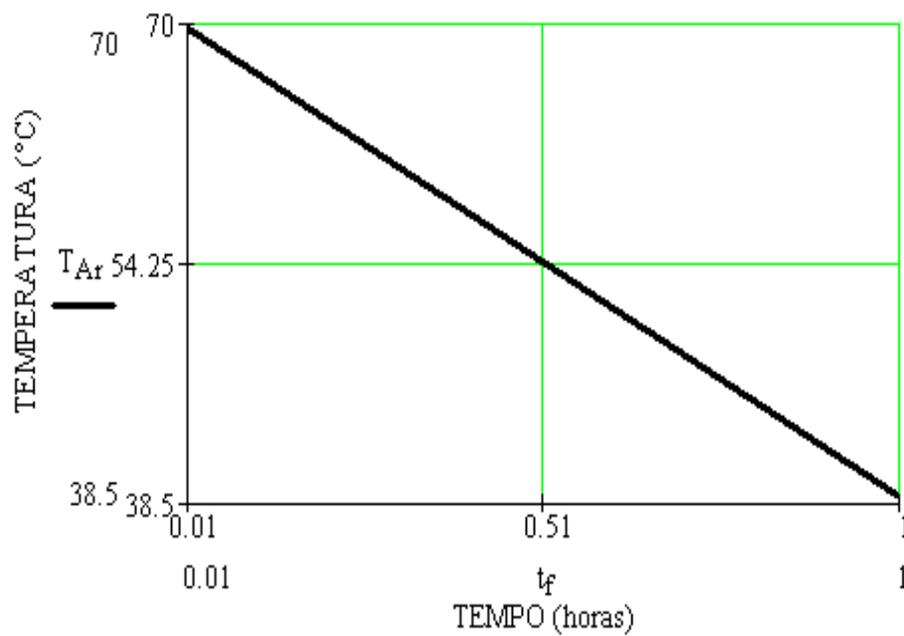


Figura 23 - Temperatura do ar em 1 hora nas camadas

Condição: vazão mássica de ar  $G_a=0,392$  (kg/ m<sup>2</sup> .s) e temperatura do ar 70°C

**Comentários:** Observa-se, comparando as Figuras 21 e 23 que, com aumento de 10°C na temperatura do ar ( $T_o$ ), obteve-se um aumento de 16,03% na temperatura do ar em 1 hora nas camadas.

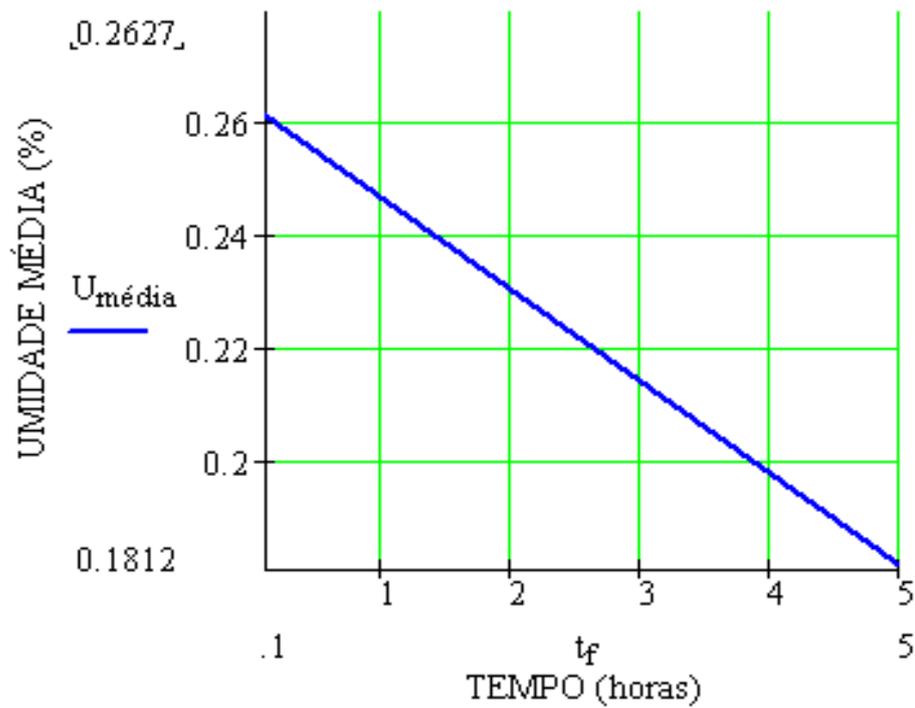


Figura 24 - Umidade média do produto nas camadas em 5 horas

Condição: vazão mássica de ar  $G_a=0,392$  (kg/ m<sup>2</sup> .s) e temperatura do ar 70°C e altura total de 1,50 metros

**Comentários:** Observa-se, comparando as Figuras 22 e 24 que, com aumento da altura total de 1,50 metros das 5 camadas, obteve-se um aumento de 6,43 % na umidade média do produto nas camadas em 5 horas.

#### 4.4 Verificações dos Resultados da Simulação:

Os resultados apresentados mostram que, dobrando-se a vazão mássica de ar ( $G_a$ ), obteve-se uma redução de 3,01% na umidade média do produto em 5 horas. Para tanto deve-se observar o gráfico da Figura 16 com o gráfico da Figura 20 ( $0,1657 - 0,1356 = 0,0301$ ), e também um aumento de 12,3% na temperatura do ar em 1 hora nas camadas, que é obtido comparando-se o gráfico da Figura 18 com o gráfico da Figura 21 [ $(33,69 - 30)/30 = 0,123$ ].

Com aumento de 10°C na temperatura do ar ( $T_o$ ), obteve-se uma redução de 1,87 % na umidade média do produto nas camadas em 5 horas, compara-se o gráfico da Figura 20 com o gráfico da Figura 22 ( $0,1356 - 0,1169 = 0,0187$ ), e também um aumento de 16,03% na temperatura do ar em 1 hora nas camadas, que é obtido comparando-se o gráfico da Figura 21 com o gráfico da Figura 23 [ $(38,5 - 33,69)/30 = 0,1603$ ].

Com aumento da altura total de 1,50 metros das 5 camadas obteve-se um aumento de 6,43 % na umidade média do produto nas camadas em 5 horas, compara-se o gráfico da Figura 22 com o gráfico da Figura 24 ( $0,1812 - 0,1169 = 0,0643$ ).

#### 4.5 Discussões sobre os Resultados da Simulação:

Através dos resultados obtidos podemos concluir que com o aumento da vazão mássica de ar (diretamente proporcional à potência requerida para o ventilador), ganhou-se apenas 20% na queda total de umidade do produto e a elevação da temperatura do ar foi cerca de 10% da temperatura do ar, (pois a temperatura do ar de entrada é 60°C e a temperatura inicial do produto é 20°C). Com este resultado conclui-se que o menor consumo de energia no sistema de ventilação para este caso, é obtido nas condições próximas a de temperatura de equilíbrio entre ar e produto ( $T_e=30^\circ\text{C}$ , dado de entrada).

O aumento da temperatura do ar mostra uma relação mais favorável para o processo de secagem do produto, pois com o acréscimo de 16% na temperatura do ar obteve-se uma retirada de umidade em torno de 12,5%, contudo é necessário observar-se os limites recomendáveis para a qualidade do grão de cereal, principalmente para sementes.

O aumento da altura total da camada de grãos implica no aumento da pressão estática na vazão mássica de ar, com fator de multiplicação em torno de 10 que é diretamente proporcional à potência requerida para o ventilador, enquanto para um aumento de produção com fator de multiplicação em torno de aproximadamente 2,5. Conclui-se assim que para este caso o consumo de energia é menor para camadas menores nos secadores de grãos.

As variações nos parâmetros de simulação (vazão mássica de ar, altura das camadas, temperatura do ar e produto, etc.) devem ser adaptadas caso a caso em função das condições climáticas, energia disponível e volume de produção necessária.

## CAPÍTULO 5 CONCLUSÕES

Há ainda muito campo de pesquisa e trabalho nesta área de secagem dos cereais, cujas perdas por deterioração continuam sempre existindo devido muitas vezes às condições atmosféricas desfavoráveis, dificuldades de transporte e outros fatores.

Os sistemas de automação de secagem estão em fases iniciais de evolução no Brasil. Com respeito aos modelos matemáticos envolvidos para secagem fica ainda bem claro que os coeficientes empíricos continuam imprescindíveis dada a alta gama de variações dos produtos, propriedades higroscópicas das cascas, limites de temperaturas máximas, tempo e umidade para evitar a contaminação e mesmo perda de capacidade de germinação. Estes aspectos não são objetivos essenciais deste trabalho que visa mostrar um método eficaz de automação da secagem, cujos parâmetros devem ser apenas dados de entrada para o sistema.

O sistema de automação aqui proposto visa garantir que o produto seja liberado somente nas condições de máxima umidade permitida, adicionalmente o sistema traz consigo a idéia de otimização relacionada às variações de vazão mássica de ar, umidade e temperatura através de equipamentos adicionais, quando a velocidade de resfriamento (perda de umidade/tempo) estiver causando tempos de secagem muito altos. A otimização aqui referida para a automação deve ser customizada uma vez que é necessário adequá-la às condições climáticas e aos riscos de perda por longo tempo de permanência dos cereais com umidade acima dos níveis aceitáveis.

Como sugestão para futuras pesquisas nesta área pode-se citar:

1. Adaptação do secador para outros tipos de produtos agrícolas.
2. Estudos econômicos das otimizações de secagem.
3. Estudos a respeito dos desumidificadores e aquecedores para secagem.
4. Adaptação desses estudos para secagem em silos de armazenagem.
5. Adaptação desses estudos para secagem durante o transporte em graneleiros.

## REFERÊNCIAS

ASAE, American Society of Agricultural Engineers. Agricultural Engineers Yearbook, 1981.

CAMPOS T. A., DE CAMPOS T. A. **Ciência e Agrotecnologia**. Lavras, v.23, n.2, p.372-376, abr./jun., 1999, 373.

CHUA K. J., MUJUMDAR A. S., CHOU S. K. **Intermittent drying of bioproduct – an overview**. Department of Mechanical Engineering National University of Singapore. Receibal 8 March 2002.

DIGITROL catálogo 2005. **Dados do sensor**. Obtido na Internet em 25/07/2005 na homepage: <http://www.digitrol.com.br/versatilidade%20catalogo%202005.pdf>

ELIAS R. N., BARBOSA A. L. S., MANCINI M. C. **Secagem de grão de bico em leito fixo**. Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro – Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 21 (1): 113-119, 2002. Suplemento.

FERREIRA J. A., ANDRADE T. C. M., MANCINI M. C., SHEID C. M., **Obtenção de concentrado de feijão em pó em Leito de forro bidimensional**. Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 22 (1): 105-112, 2002. Suplemento.

INCROPERA F. P., de Witt D. P., **Fundamentos da transferência de calor e massa**. 3ª ed. Ed. Guanabara Koogan S.A. Rio de Janeiro, 1990.

LYNXTEC. **Dados**. Obtido na Internet em 28/07/2005 na home-page : [http://www.lynxtec.com.br/tutor\\_aqd1.htm](http://www.lynxtec.com.br/tutor_aqd1.htm)

MANCINI M. C., MASSARANI E., BISCAIA JR. E. C., **Transferência de massa na secagem de milho em secadores de camada espessa em leitos fixo e deslizante**. Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 21 (1): 121-129, 2002 (a). Suplemento.

MANCINI M. C., CALÇADA L. A., MASSARANI G., BISCAIA JR. E. C., **Secagem de feijão em leito fixo**. Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 21 (1): 89-96, 2002 (b). Suplemento.

MARTINS M. G., MARQUES W. M., CALÇADA L. A., MANCINI M. C., **Secagem de feijão em leito fixo III**. Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 22 (1): 97-104, 2002 (a). Suplemento.

MARTINS M. G., OLIVEIRA D. D., CALÇADA L. A., MANCINI M. C., **Adaptação de um equipamento de secagem em camada delgada para a determinação de isotermas de equilíbrio**. Rev. Univ. Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 22 (1): 55-63, 2002 (b). Suplemento.

MARTINS M. G., MANCINI M. C., BISCAIA JR. E. C., **Cinética de secagem de feijão em camada delgada.** Univ. Fed. Rural do Rio de Janeiro (Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 21 (1): 83-88, 2002 (c). Suplemento).

MICROHARD catálogo 2005. **Dados do sensor.** Obtido na Internet em 26/07/2005 na homepage : <http://www.microhardbrasil.com.br/produtos.html#SN>

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PORTARIA n.º 234 de 04 de agosto de 1980. **Método oficial para determinação de umidade de sementes.**

PEREIRA J.A.M., PEREIRA A. L. R. M., **Aeração de grãos.** Centro nacional de treinamento em armazenagem - Centreinar Universidade Federal de Viçosa MG, 1990.

PEREIRA J.A.M., PEREIRA A. L. R. M., **Determinação de umidade de grãos.** Centro nacional de treinamento em armazenagem - Centreinar Universidade Federal de Viçosa MG, 1990.

PEREIRA J.A.M., PEREIRA A. L. R. M., **Água no grão.** Centro nacional de treinamento em armazenagem - Centreinar Universidade Federal de Viçosa MG, 1990.

QIANG L., BAKKER-ARKEMA F. W., **A model – predictive controller for grain drying.** Department of Agricultural Engineering. Michigan State University. Journal of Food Engineering 49, 2001 (a) 321-326.

QIANG L., BAKKER-ARKEMA F. W., **Departament of agricultural engineering.** Michigan State University. Automatic Control of Crossflow Grain Dryers, Part 2: Design of a Model – Predictive Controller, 18 July 2001 (b).

QIANG L., BAKKER-ARKEMA F. W., **Departament of agricultural engineering.** Michigan State University. Automatic Control of Crossflow Grain Dryers, Part 3: Field Testing of a Model – Predictive Controller. Control Engineering Practice 9 (2001) 249-266, 18 July 2001 (c).

QUEIROZ D. M., MELO J. A. M., CASTRO E., **Modelos matemáticos de simulação e secagem de grãos.** Centreinar. Universidade Federal de Viçosa, MG,1990.

QUEIROZ D. M., MELO J. A. M., PEREIRA., **Secagem de grãos em baixas temperaturas.** Centreinar. Universidade Federal de Viçosa, MG,1987.

SAVARESI S. M., BETINEAD, R. R., PEIRSE R., **On modeling and control of a rotary sugar dryer.** Departamento de Eletrônica e Informazione - Department of Mechanical and Aerospace Engineering. University of California San Diego. Received 5 November 1999, accepted 25 September 2000.

SOUZA A. M., DIAS A. R. C., BARROZO M. A. S., **Estudo fluidodinâmico em leito deslizando com escoamentos contracorrentes.** Unive. Fed. Rural do Rio de Janeiro. Revista Universidade Rural, Série Ciências Exatas e da Terra. Vol. 21 (1): 169-176. 2002. Suplemento.

TEMPLE S. J., VAN BOXTEL A. J. B., **Control of fluid bed tea dryers: control in the context of design and operation conditions**. Tea Reserarch Foundation, Mulanje, Malawi, Central African Republic. Departament of Agricultural Engineering and Physics, Wageningen University. Received 23. April 2000. received form 26 August 2000, accepted 30 August 2000.

UFLA catálogo 1999. **Dados do sensor**. obtido na Internet em 25/07/2005 na home-page: [http://www.editora.ufla.br/revista/23\\_2/art17.pdf](http://www.editora.ufla.br/revista/23_2/art17.pdf)

WALD-MEISTER catálogo 2005. **Dados do Sensor**. Obtido na Internet em 25/07/2005 na home-page : <http://www.wald-meister.com.br/produtos/g86.htm>

WIDITEC catálogo 2005. **Dados do sensor**. Obtido na Internet em 27/07/2005 na home-page : <http://www.widitec.com.br>

YUTTHANA T., SOMKIAT P., WARUNEE V., SOMCHART S., **Simulation and grain quality for in store drying of paddy**. The Institute of Food Research and Product Development (IFRPD). Kasetsart University, Chatuchat, Thailand. Received 8 February 2003, accepted 13 September 2003.

## APÊNDICE A

### 1. Atividade de Água:

O conceito de atividade de água,  $A_w$ , está relacionado com o potencial químico da água; a atividade de água é, na prática, com muito pouco erro, igual a umidade relativa de equilíbrio expressa em decimal: ( PEREIRA, 1990 ).

$$A_w = \frac{URE(\%)}{100} \quad (A1)$$

URE = Umidade Relativa de Equilíbrio Ar – Grão.

Este valor de atividade de água é absolutamente relevante para a conservação dos grãos e para evitar-se o aparecimento e desenvolvimento de fungos e bactérias. Para o milho e a maioria dos grãos o valor ideal para estocagem está em torno de 12,5%, bulbo úmido.

Para as sementes deve ser seguida (MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, 1980), método oficial para determinação de umidade de sementes, de acordo com as regras para análise de sementes.

No comércio, na indústria e nas unidades armazenadoras de grãos, o teor de umidade expresso em base úmida é usado tradicionalmente. Entretanto, em ciência, o teor de umidade expresso em base seca é, na maioria das vezes, preferível (PEREIRA, 1990).

Conceito: Teor de umidade de bulbo úmido.

$$U_{bu} = \frac{\text{massa do grão} - \text{massa de matéria seca}}{\text{massa total do grão}} \quad (A2)$$

$$U_{bu} = \frac{U_{bu}}{1 + U_{bs}} \quad (A3)$$

Conceito: Teor de umidade de bulbo seco

$$U_{bs} = \frac{\text{massa de água}}{\text{massa de matéria seca}} \quad (A4)$$

$$U_{bs} = \frac{U_{bs}}{1 - U_{bu}} \quad (A5)$$

## 2. Variações:

Variações bruscas de temperatura, umidade ou tempo limite de permanência do grão sob temperaturas limite (limitador – casca ou pele do grão) podem afetar a higroscopicidade da pele do grão. A higroscopicidade é definida como afinidade grão e água.

Limites – grãos quando submersos em água a casca enrugada e após algum tempo estufa.

Limites – grãos em temperaturas elevadas explodem a casca (pipoca).

Estes extremos não dependem apenas dos limites de temperatura ou umidade mas também do tempo de permanência sob as condições limites.

Teoricamente pode-se variar estas condições, mas os limites destas variações devem ser estabelecidos por conta da manutenção da vida do grão principalmente no caso das sementes.

