

Sistema automático para secagem de produtos agrícolas em camada fina

José Eduardo Carvalho Monte¹, José Helvécio Martins², Daniela de Carvalho Lopes^{2*}, Paulo Marcos de Barros Monteiro³ e Paulo Raimundo Pinto¹

¹Departamento de Informática, Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil.

²Departamento de Engenharia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Av. P.H. Rolfs, s/n, 36571-000, Viçosa, Minas Gerais, Brasil. ³Departamento de Automação, Controle e Técnicas Fundamentais, Campus do Morro do Cruzeiro, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Minas Gerais, Brasil. *Autor para correspondência.

E-mail: danielaclopes@gmail.com

RESUMO. Geralmente, o controle do processo de secagem em camada fina, é realizado com base na pesagem de amostras, retirando-se periodicamente a bandeja do secador e levando-a até uma balança, para determinar, por diferença de massa, a quantidade de água que foi retirada do produto durante o processo. Essa operação é a principal fonte de erro na determinação das taxas de secagem, tendo em vista a interrupção do processo de secagem ou a perda de parte da amostra durante a etapa de pesagem. Este trabalho propõe a automação do controle da secagem em camada fina, utilizando-se um sistema baseado em uma célula de carga e em dispositivos eletrônicos endereçáveis. Os valores obtidos pelo monitoramento realizado pelo sistema proposto são armazenados e comparados com valores finais pré-definidos para o processo de secagem. Quando não houver diferença significativa entre os valores medidos e os pré-definidos, encerra-se o processo. O sistema proposto foi testado e validado, fornecendo uma série de resultados confiáveis, com elevada precisão e um excelente desempenho.

Palavras-chave: secagem, automação, dispositivos eletrônicos endereçáveis.

ABSTRACT. Automated system for thin-layer drying of agricultural products.

Generally, the control of thin-layer grain drying is done based on weighing the samples, periodically removing the sample from the dryer and taking it to a precision scale in order to determine, by the difference in weight, the amount of water removed from the product during the process. This operation is the main source of error in determining drying rates, due to the interruption of the drying process or the sample losses during the weighing stage. In this work, the automation of thin-layer grain drying control is proposed through the use of a system based on a load cell and on addressable electronic devices. The results are recorded in a file and compared with the final pre-defined values for the drying process. The process is terminated when there is no significant difference between the measured values and the pre-defined ones. The proposed system was tested and validated, resulting in reliable data, with high accuracy and excellent performance.

Key words: drying, automation, addressable electronic devices.

Introdução

Em geral, quando o processo de secagem de grãos, em camada delgada, é estudado, seu objetivo é a determinação das taxas de secagem do produto (Thompson, 1967; Martins, 1988). Nesses casos, o método comumente utilizado para a coleta de dados se baseia no registro das perdas de massa ocorridas em uma amostra durante o processo de secagem. Na maioria das situações, esse registro é obtido manualmente, retirando-se a amostra do secador e levando-a até um dispositivo de pesagem (Palacin *et al.*, 2005). Essa operação gera erros na determinação das taxas de secagem, tendo em vista a

interrupção do processo de secagem ou a perda de parte da amostra durante a etapa de pesagem.

A automação de sistemas de secagem é uma área bastante carente atualmente. Apesar dos vários trabalhos desenvolvidos, relacionados a secadores e a teores de umidade de produtos agrícolas, o monitoramento e o controle dos processos ainda são feitos manualmente ou empregando equipamentos de alto custo e complexidade operacional, como placas de aquisição de dados e sensores específicos (Topuz *et al.*, 2004; Temple *et al.*, 2000; Zhang *et al.*, 2002; Lisovsky, 2007). Utilizando-se uma célula de carga e dispositivos eletrônicos endereçáveis,

combinados a outros dispositivos eletrônicos que permitam tratar os sinais de controle, a operação de pesagem das amostras de grãos e o registro desses dados podem ser realizados automaticamente, de forma simples, confiável e com baixo custo. Célula de carga é uma estrutura mecânica que mede a deformação da peça em teste pela sua própria deformação e a traduz em variação da resistência ôhmica. Embora essa deformação seja pequena, é suficiente para gerar um sinal de saída compatível com a carga aplicada sobre a célula e, por isso, as células de carga podem ser utilizadas para medições de esforços de tração ou compressão em prensas, cabos, máquinas de ensaio, dinamômetros e vários outros equipamentos, sempre que a medida de força seja necessária (Thomazini e Albuquerque, 2005). São inúmeras as possibilidades para a conexão de uma célula de carga a dispositivos eletrônicos para automatizar a pesagem de amostras e o controle de sistemas de secagem, pois o número de dispositivos ligados aos computadores para comunicação e instrumentação (medições e acionamentos) aumenta continuamente. Por isso, características como a simplicidade, eficiência, velocidade de comunicação e confiabilidade devem ser consideradas na implantação de sistemas desse tipo (Altuntas e Yildiz, 2007; Bijay *et al.*, 2005; Joo *et al.*, 2002; Osborna *et al.*, 2007).

Normalmente, a transferência de informações entre o computador e os dispositivos conectados a ele é estabelecida por meio de cabos com múltiplos condutores, que ligam e alimentam, individualmente, cada um destes dispositivos. O grande número de fios e cabos usados para transmissão dos sinais de controle e para comunicação de dados torna o sistema vulnerável a interferências nos sinais, por estar trabalhando em ambientes próximos a locais onde ocorrem muitos acionamentos eletromecânicos, tais como relés, contadores e chaves eletromecânicas. A fim de evitar essas interferências e simplificar as redes de transmissão de dados de maneira confiável, a Dallas Semiconductor desenvolveu a tecnologia 1-Wire™, que possibilita transferência bidirecional de informação por meio de um único condutor (operando em semi-duplex), ao mesmo tempo em que alimenta dispositivos remotos endereçáveis por meio da própria linha de transmissão de dados (Awtrey, 1997; Awtrey, 1998; Awtrey, 2002). Sistemas automáticos, baseados em redes 1-Wire™, apresentam a vantagem de poder ter todas as tarefas de transmissão de dados, monitoramento, controle, geração de relatórios e outras gerenciadas por um único programa computacional, desenvolvido

especificamente para a aplicação desejada, além de resultar em uma estrutura física mais simples e com custos operacionais mais baixos (Steidle Neto, 2003).

Assim, o objetivo do presente trabalho foi o desenvolvimento de um sistema de controle automático, com base em um sistema de aquisição de dados em tempo real, que utiliza dispositivos eletrônicos endereçáveis da série 1-Wire™, combinados a uma célula de carga, para monitorar e controlar um sistema de pesagem automático de amostras de produto em secador, em camada fina.

Material e métodos

Este trabalho foi desenvolvido no Laboratório de Pré-processamento de Produtos Agrícolas e no Laboratório de Instrumentação, ambos do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa, e nos Laboratórios de Instrumentação Eletrônica do Centro Federal de Educação Tecnológica de Ouro Preto, Estado de Minas Gerais (Cefet - Ouro Preto).

A estrutura física do sistema automático para secagem em camada fina consiste em um ventilador, acionado por um motor elétrico monofásico de 186,5 W (1/4 de HP), que insufla o ar à temperatura ambiente, por um duto cilíndrico horizontal. Esse ar passa, então, por um sistema de resistências elétricas, ligadas e controladas por um controlador proporcional-integral-derivativo (PID), capaz de manter a temperatura do ar em um valor pré-estabelecido, com variação máxima de $\pm 1^\circ\text{C}$. Depois de aquecido, o ar é conduzido para a câmara de homogeneização do secador, sendo posteriormente insuflado, por meio de um duto cilíndrico vertical, e atravessando a amostra de produto, localizada em uma bandeja com fundo telado. Sob a bandeja do secador, existe uma balança de três apoios, sendo apenas um fixado sobre uma célula de carga com capacidade de 1 N, alimentada com 10 Vcc e fornecendo um sinal de saída máximo de 20 mVcc. Os demais funcionam como apoio simples para nivelamento. Para evitar a necessidade de compensação de temperatura por causa do aquecimento do fluxo de ar que passa pela balança, existe, também, uma pastilha de isolante térmico, entre o apoio do prato da balança e o corpo da célula de carga. O esquema do sistema desenvolvido é apresentado na Figura 1.

O gerenciamento do sistema automático para secagem em camada fina é realizado por um programa computacional, que recebe as informações coletadas pela rede de transmissão de dados e, juntamente com os dados de entrada fornecidos pelo

usuário (fluxo de ar, teor de umidade inicial do produto e teor de umidade final desejado para o produto), determina o início e o final da secagem. Além do sinal de saída amplificado da célula de carga, os dados transmitidos ao programa computacional, pelo sistema de aquisição de dados, são a temperatura e a umidade relativa do ar de secagem na entrada e nas proximidades da bandeja e a temperatura do ar na entrada do sistema de secagem. A partir destes dados, o programa verifica e registra continuamente a variação da massa colocada sobre a bandeja de secagem, determinando automaticamente o momento em que o sistema deve ser desligado. Terminado o processo, o sistema de controle desliga o sistema de aquecimento e, depois que a temperatura do ar atinge o valor da temperatura do ambiente, desliga, também, o sistema de ventilação. Os valores medidos e estimados durante todo o processo de secagem são gravados em arquivos-texto para posteriores análises e para a documentação do sistema.

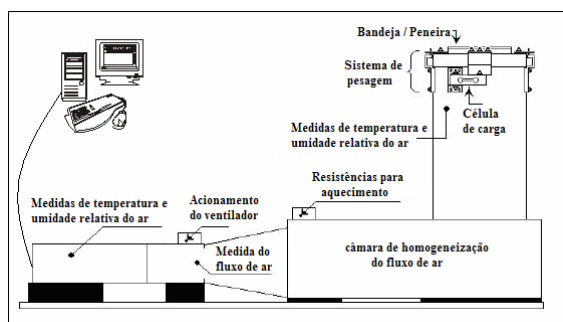


Figura 1. Esquema do sistema automático para secagem de grãos em camada fina.

A variação da massa colocada sobre a bandeja de secagem é estimada aplicando-se uma curva de calibração, que relaciona a massa da amostra com a tensão de saída da célula de carga, a cada instante em que o sistema registra os dados coletados. Essa curva de calibração é uma função linear de primeiro grau, ajustada previamente por regressão linear simples:

$$Y = AX + B \quad (1)$$

em que:

Y é a massa do produto (g);

X é a tensão de saída da célula de carga (mV);

A e B são coeficientes que dependem do produto e da faixa de tensão considerados durante o processo de calibração.

A cada registro dos dados, o teor final de umidade desejado é comparado com os teores de umidade instantâneos da amostra, sendo que o

processo de secagem é finalizado quando não existe diferença significativa entre eles. O teor final de umidade desejado pode ser um valor determinado pelo usuário do sistema ou pode ser o teor de umidade em equilíbrio. A estimativa dos teores de umidade da amostra, durante o processo de secagem, é realizada com base na massa do produto, medida a cada instante, aplicando-se a equação de conservação de massa:

$$m_i(1 - U_i) = m_{i+1}(1 - U_{i+1}) \quad (2)$$

em que:

m_i é a massa do produto no instante t_i (kg);

m_{i+1} é a massa do produto no instante t_{i+1} (kg);

U_i é o teor de umidade do produto no instante t_i (decimal, b.u.);

U_{i+1} é o teor de umidade do produto no instante t_{i+1} (decimal, b.u.).

A razão de umidade também é armazenada como um dado de saída do programa, visando à posterior comparação destes dados com a curva de secagem, ajustada pelo modelo de Page:

$$RU = \frac{U_t - U_e}{U_0 - U_e} \quad (3)$$

em que:

RU é a razão de umidade (adimensional);

U_t é o teor de umidade do produto no instante t_i (decimal, b.s.);

U_e é o teor de umidade em equilíbrio do produto (decimal, b.s.);

U_0 é o teor de umidade inicial do produto (decimal, b.s.).

A aquisição de dados do sistema desenvolvido tem como base a tecnologia 1-Wire™ constituída por um computador (mestre), em que o programa de controle e gerenciamento da transmissão de dados é executado, seguindo um protocolo específico de comunicação, e dispositivos remotos da série 1-Wire™ (escravos), como sensores, adaptadores e chaves eletrônicas, conectados por dois ou três condutores (Lopes *et al.*, 2007).

A conexão da rede de transmissão de dados ao computador é realizada por meio de sua porta serial, utilizando-se um adaptador universal DS9097U-009 da série 1-Wire™.

A temperatura e a umidade relativa do ar são medidas no duto de entrada do secador e abaixo da bandeja de secagem. Cada circuito de medição é composto por um sensor HIH3610, capacitivo e fabricado pela empresa Honeywell, endereçado por meio de um DS2438 da série 1-Wire™ (Pinto,

2005). O DS2438 foi projetado para o monitoramento de carga em baterias, contendo conversores A/D (analogico-digital) para temperatura e tensão, necessários na obtenção da umidade relativa. Os circuitos desenvolvidos foram projetados para operar com alimentação parasita, em que a energia necessária para alimentar os dispositivos conectados à rede é obtida pela própria linha de transmissão de dados, ou com alimentação externa, em que uma fonte de alimentação externa de 5 V é empregada para alimentar os dispositivos conectados à rede. Um outro DS2438 foi conectado a um circuito responsável por amplificar o sinal de saída da célula de carga, possibilitando, assim, a transmissão das medidas realizadas pelo sistema de pesagem ao computador.

Os circuitos de acionamentos do motor do ventilador e do aquecimento de ar com resistências têm como base as chaves digitais DS2406 da série 1-Wire™, associadas a um circuito acionador com triac TIC226D, montado em dissipador de calor, e com o acoplador (fotodiaca) MOC 3010 (Lopes, 2006). Estes circuitos garantem isolamento elétrico entre o acionamento digital pela rede 1-Wire™ e a rede energizada de corrente alternada (127 V ou 220 V), evitando-se danos ao computador, caso ocorra algum problema na rede elétrica.

O sistema de controle foi testado e validado, gerenciando o funcionamento do sistema para secagem de milho. Em todos os testes, o fluxo de ar utilizado foi igual a $0,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$. Para verificar a influência da temperatura e do fluxo de ar sobre a curva de calibração da célula de carga, foram realizados testes também sem ventilação, em uma amostra de 2400 g, com temperatura igual a 40°C e teor de umidade inicial igual a 26% b.u., determinado pelo método oficial de estufa. Os outros testes foram realizados com temperaturas do ar de secagem iguais a 60 e 80°C, teores de umidade iguais a 22% b.u. e massas iniciais das amostras iguais a 2100 g e 2500 g. Para cada tratamento, foram realizadas três repetições.

Resultados e discussão

A rede de transmissão de dados e o sistema de pesagem com a célula de carga funcionaram de maneira satisfatória, possibilitando a troca de dados entre o computador e os dispositivos 1-Wire™, sem interferências significativas que resultassem em perda de dados. Como o protocolo de comunicação utilizado pelas redes 1-Wire™ caracteriza suas instruções com base em intervalos de tempo distintos, todo o sistema fica protegido contra interferências por causa das perturbações

eletromagnéticas. Esse protocolo estabelece temporizações de poucos microssegundos, mantendo a linha de dados em nível alto na maior parte do tempo, o que permite a absorção das interferências sem prejuízo à comunicação dos dados.

A célula de carga também respondeu perfeitamente aos estímulos de esforços a ela impostos, mantendo-se dentro das expectativas e de acordo com o especificado pelo fabricante, para as condições de teste. As leituras de tensão, realizadas na entrada do conversor analógico digital (DS2438), obtidas da célula de carga, apresentaram valores equivalentes aos valores de tensão medidos, utilizando um voltímetro digital, simultaneamente. Desta forma, comprovou-se a fidelidade das medidas proporcionadas pelo DS2438.

As chaves eletrônicas apresentaram desempenho excelente, tanto para acionamentos a 127 V, quanto para acionamentos a 220 V, tendo limite de corrente de acordo com o modelo de semicondutor utilizado. Durante os testes, sempre ocorreu um tempo de resposta entre 0,25 e 0,5 s, desde o instante em que o comando era fornecido pelo programa até o efetivo acionamento dos circuitos do motor do ventilador e do aquecedor à base de resistências elétricas. Esse tempo de atraso pode ser por causa da utilização de interface gráfica, operando em um sistema operacional Windows. Assim, para que a comunicação com a rede 1-Wire™ seja realizada, é necessária a troca de protocolos e, com isso, aumenta-se o tempo de acionamento esperado de 100 μs a 250 μs para até 0,5 s. Ainda assim, o tempo de acionamento manteve-se dentro de uma faixa adequada ao processo, resultando na utilização das chaves eletrônicas, baseadas no DS2406 para o acionamento de dispositivos em sistemas de secagem de maneira confiável e eficiente.

Os resultados dos testes para verificação da influência da temperatura e do fluxo de ar sobre a curva de calibração da célula de carga são apresentados nas Figuras 2, 3 e 4.

Os valores de umidade relativa e temperatura, medidos pelos circuitos contendo o DS2438, foram comparados às medidas realizadas por um psicrômetro de referência. Os resultados não variaram de forma significativa, apresentando erros máximos de 0,5°C para temperatura e 2% para umidade relativa.

A Figura 5 apresenta a variação da razão de umidade estimada pelo modelo de Page e os valores experimentais observados no teste realizado com milho, inicialmente, a 26% b.u e com ar de secagem a 80°C.

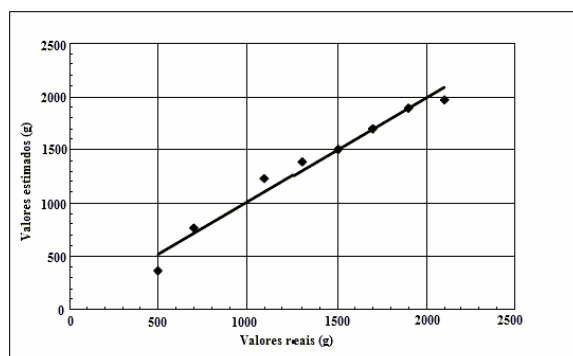


Figura 2. Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais para testes realizados com temperatura de 60°C, massa inicial igual a 2100 g e fluxo de ar igual a $0,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

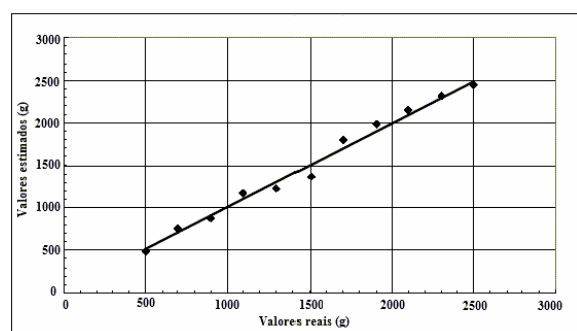


Figura 3. Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais para testes realizados com temperatura de 80°C, massa inicial igual a 2500 g e fluxo de ar igual a $0,27 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1} \text{ m}^{-2}$.

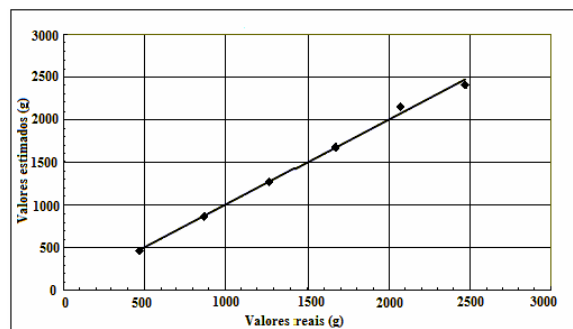


Figura 4. Curva de correspondência entre os valores estimados de massa e os valores reais para testes realizados com massa inicial igual a 2400 g e sem fluxo de ar.

Todos os testes apresentaram ótimos resultados, confirmando a viabilidade do sistema desenvolvido no controle automático do processo de secagem em camada fina e na pesagem das amostras.

A elevada precisão observada nas respostas dos instrumentos digitais endereçáveis está diretamente relacionada à operação da rede de comunicação de dados que garantiu, em um ambiente naturalmente hostil para transmissão de dados por fios metálicos, a confiável troca de dados e comandos para as partes

do sistema, ou seja, uma transferência sem interferências significativas, uma vez que as leituras foram realizadas de forma contínua. Os circuitos DS2438 dos conversores A/D comportaram-se muito bem para medição da umidade relativa, temperatura e medição da massa das amostras, fornecendo valores bem próximos dos valores apresentados em equipamentos de referência como psicrômetro, voltímetro e balança. Os circuitos DS2406, usados nas chaves digitais, comportaram dentro das expectativas, interpretando os comandos perfeitamente, para as operações de liga e desliga do ventilador e do sistema de aquecimento com resistências. Também, o programa computacional foi baseado em bibliotecas e rotinas disponibilizadas pela Dallas Semiconductor, via rede mundial de computadores, Internet. Essas rotinas contribuíram para a aquisição de dados com segurança e confiabilidade, pois possibilitaram o acionamento das rotinas de teste para transmissão, decodificação e leitura final do dado, com agilidade e uma estrutura relativamente simples.

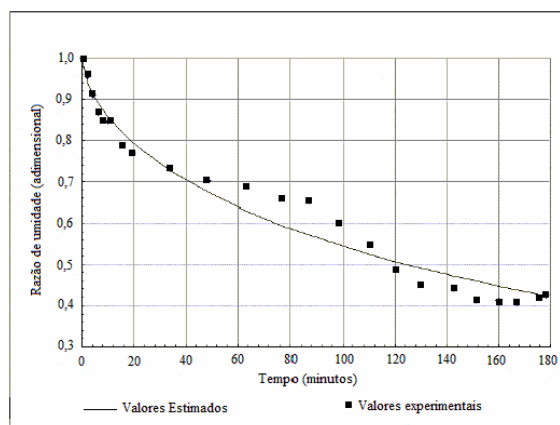


Figura 5. Variação da razão de umidade estimada pelo modelo de Page e os valores experimentais observados no teste realizado com milho, inicialmente, a 26% b.u e com ar de secagem a 80°C.

Ressalta-se que o sistema desenvolvido pode ser utilizado com outros produtos agrícolas, desde que testes sejam realizados previamente com esses produtos, com a finalidade de adequar o sistema a eles, gerando-se as curvas adequadas de calibração e secagem.

Conclusão

A partir dos resultados obtidos, conclui-se que o sistema automático para secagem de grãos em camada fina se mostrou eficiente e confiável. A rede de comunicação a três fios, com o protocolo 1-Wire™, apresentou desempenho bastante satisfatório, isento de interferências e de perdas

significativas de informações. O sistema de pesagem proposto também apresentou um ótimo desempenho, sendo possível com uma única célula de carga, pesar com elevada precisão, amostras de milho distribuídas uniformemente sobre a bandeja de pesagem.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Minas Gerais (Fapemig), pelo suporte financeiro.

Referências

- ALTUNTAS, E.; YILDIZ, M. Effect of moisture content on some physical and mechanical properties of faba bean (*Vicia faba* L.) grains. *J. Food Eng.*, New York, v. 78, p. 174-183, 2007.
- AWTREY, D. Transmitting data and power over a one wire bar. *Sensors Magazine*, 1997. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>. Acesso em: jan. 2006.
- AWTREY, D. The 1-wire weather station. *Sensors Magazine*, 1998. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>. Acesso em: jan. 2006.
- AWTREY, D. 1-wire addressable digital instruments for environmental monitoring. *Sensors Magazine*, 2002. Disponível em: <http://www.sensorsmag.com/articles0297/onewire/main.shtml>. Acesso em: jan. 2006.
- BIJAY, L.S. et al. Prediction of moisture content of alfalfa using density-independent functions of microwave dielectric properties. *Meas. Sci. Technol.*, Bristol, v. 16, p. 1179-1185, 2005.
- JOO, J.W. et al. Design and evaluation of a six-component load cell. *Measurement*, Boston, v. 32, n. 2, p. 125-133, 2002.
- LISOVSKY, V. Automatic control of moisture in agricultural products by methods of microwave aquametry. *Meas. Sci. Technol.*, Bristol, v. 18, p. 1016-1021, 2007.
- LOPES, D.C. *Simulação e controle em tempo real para sistemas de aeração de grãos*. 2006. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- LOPES, D.C. et al. Redes 1-wire aplicadas à aeração de grãos armazenados. *Acta Sci. Agron.*, Maringá, v. 29, n. 2, p. 157-163, 2007.
- MARTINS, J.H. *Thin-layer drying rates of corn hybrids related to performance of high-speed, high temperature batch dryer*. 1988. Tese (Ph.D em Engenharia Agrícola)-Purdue University, West Lafayette, 1988.
- OSBORNEA, B.G. et al. Assessment of commercial milling potential of hard wheat by measurement of the rheological properties of whole grain. *J. Cereal Sci.*, Amsterdam, v. 45, p. 122-127, 2007.
- PALACIN, J.J.F. et al. Determinações das curvas de secagem de milho nas espigas (*Zea mays* L.). *Engenharia na Agricultura*, Viçosa, v. 13, n. 4, p. 300-313, 2005.
- PINTO, P.R. *Instrumentos digitais endereçáveis com base na tecnologia 1-wire™*. 2005. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- STEIDLE NETO, A.J. *Avaliação do sistema 1-wire™ para aquisição de dados de temperatura em instalações agrícolas*. 2003. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- TEMPLE, S.J. et al. Monitoring and control of fluid-bed drying of tea. *Control Eng. Pract.*, Amsterdam, v. 8, p. 165-173, 2000.
- THOMAZINI, D.; ALBUQUERQUE, P.U.B. *Sensores industriais: fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora Érica, 2005.
- THOMPSON, T.L. *Predicted performance and optimal design of convection grain dryers*. 1967. Tese (Ph. D em Engenharia Agrícola) - Purdue University, West Lafayette, 1967.
- TOPUZ, A. et al. An experimental and numerical study of fluidized bed drying of hazelnuts. *Appl. Therm. Eng.*, Oxford, v. 24, p. 1535-1547, 2004.
- ZHANG, Q. et al. Prediction of performance indices and optimal parameters of rough rice drying using neural networks. *Biosyst. Eng.*, Bedford, v. 83, n. 3, p. 281-290, 2002.

Received on January 18, 2007.

Accepted on August 09, 2007.