

SUPERVISÃO E CONTROLE AUTOMÁTICO DE SISTEMA DE SECAGEM DE PRODUTOS AGRÍCOLAS ATRAVÉS DO *SOFTWARE* TERMICONT

SUPERVISION AND AUTOMATIZED CONTROL OF DRYING PROCESS THE AGRICULTURAL PRODUCTS THROUGH OF THE TERMICONT SOFTWARE

ALCEU ROSA NETO¹
BÁRBARA TERUEL²

RESUMO

Descreve-se o software TERMICONT para a supervisão e controle de uma planta de secagem, monitorando a temperatura e umidade do ar, velocidade de rotação do motor do ventilador e consumo de energia. A planta foi instrumentada com sensores de temperatura, umidade relativa e potência ativa. O aplicativo foi desenvolvido em LabView 7.11, com interface homem-máquina de fácil visualização, configuração do tipo de controle, obtenção das curvas do sistema (malha aberta e fechada), para a modelagem matemática e estudo das estratégias de controle. O aplicativo poderá ser usado como ferramenta de atuação local e remota (Web Lab), controlando a vazão de ar e potência da resistência de aquecimento, aquisição e armazenamento dos dados do processo. A planta será disponibilizada para a realização de pesquisas em instrumentação e controle de processos e servirá de ferramenta didática para o desenvolvimento de aulas práticas no curso de Engenharia Agrícola.

Palavras-chaves: Instrumentação, Temperatura, Umidade, Vazão de Ar, Rotação, Consumo de Energia.

¹ Engenheiro Eletrônico, R.A. Eletro Sistemas LTDA, E-mail: neto.alceu@gmail.com

² Prof. Dr. Eng. Mecânico, Faculdade de Engenharia Agrícola/UNICAMP, E-mail: barbarat@agr.unicamp.br

Recebido: Jan/08
Aprovado: Abr/08

ABSTRACT

Is presented the software TERMICON, for supervision and control of a drying plant, monitoring the temperature and relative air humidity, rotation speed of the engine of the fan and energy consumption. The drying plant was instrumented with temperature sensor, relative humidity and active power. The applicatory one was developed in LabView 7.11; with man-machine interface and easy visualization, configuration of control type, curves of the system (open and closed loop), mathematical model and study of control strategies. The control supervisory one could be used as tool of remote and local performance (Web Lab), the air flow and power and simultaneously the heating resistance, acquisition and storage of process data. The plant will be used for the research in instrumentation application and control of processes and didactic tool for the practical lessons in the agricultural engineering course.

Keywords: Instrumentation, Temperature, Relative Humidity, Air Flow, Energy Consumption.

INTRODUÇÃO

A necessidade de melhorar os processos pós-colheita e desenvolver tecnologias para a agroindústria faz com que a Engenharia de Automação busque soluções, integrando a Engenharia Agrícola, Ambiental e as Tecnologias de Informação, visando avanços e geração de inovações que possam ser aplicadas de forma confiável, trazendo benefícios no plano econômico e produtivo.

Tratamentos de secagem podem ser aplicados a vários processos e produtos, em áreas afins com a Engenharia Agrícola, como na secagem de biomassa, grãos, produtos hortícolas, madeiras, plantas medicinais e aromáticas, materiais construtivos e produtos manufaturados, dentre outros. O controle destes processos deve garantir a secagem homogênea, com mínima presença de mão-de-obra através do acionamento automático dos mecanismos do sistema, para manter os parâmetros de operação em condições ideais e dentro das exigências do mercado.

Embora diversos trabalhos disponíveis na literatura tenham sido dedicados a explorar as diferentes características, aplicações de sistemas de secagem, modelos matemáticos e de simulação do processo de secagem para diversos produtos, e ao estudo de estratégias de controle, ainda há poucos controladores em uso comercial que dispõem de sistemas automáticos de controle e *softwares* de supervisão em tempo real, devido à falta de precisão, robustez e inexatidão nos modelos

e algoritmos disponíveis. Secadores e sistemas de secagem concebidos para serem controlados automaticamente podem contribuir para a melhoria do processo, da qualidade final dos produtos e da economia de energia ou combustível (LIU & BAKKER-ARKEMA, 2001; LIU & BAKKER-ARKEMA, 2001a; SRZEDNICKI et al., 2006; SHABDE & HOO, 2008).

A secagem de plantas aromáticas e medicinais, por exemplo, merece atenção especial, pois abastecem as indústrias de alimentos, cosmética e farmacêutica, e devem ser submetidas ao processo de secagem logo após a colheita. A indústria nacional já mostra indícios da necessidade de investir em pesquisas na área de pré-processamento, para alcançar padrões exigidos pelo mercado internacional, onde a temperatura do ar de secagem é o principal fator, evitando a degradação e perda das propriedades das plantas.

Um sistema automatizado de secagem para plantas medicinais e aromáticas foi desenvolvido por JESUZ et al. (2001), para o controle da temperatura do ar, atuando no sistema de aquecimento. Concluíram que o secador pode ser usado para a secagem de plantas aromáticas e medicinais entre temperaturas de 40 a 90°C, com acréscimo linear de temperatura ao longo do processo, mas destacam a necessidade de supervisão do sistema em tempo real, visando a tomada de decisões.

Um sistema de controle preditivo foi desenvolvido por LIU & BAKKER-ARKEMA (2001), para a secagem de grãos de milho, numa faixa de teor de umidade de 21 a 32% em base úmida com temperaturas entre 85 e 12°C. O sistema mostrou-se estável, preciso e robusto, controlando o teor de umidade dos grãos com precisão de $\pm 0,7\%$, com relação ao *set point*. Os autores destacam que, a secagem de grãos é um processo complexo de ser controlado devido às não linearidades, inércia do processo e tempo de atraso.

Outra dificuldade está no uso de sensores adequados para a medição em tempo real do teor de umidade dos produtos, que geralmente são feitas em laboratório, provocando maior incidência de erros. LIU et al. (2006) apresentaram um modelo não-linear de controle preditivo para estimar o teor de umidade de milho em tempo real, com base em medições da umidade relativa do ar e análise estatística, mostrando boa exatidão. PORTOGHESE et al. (2007), apresentaram um sistema de medição usando sondas elétricas, posicionadas em diferentes camadas do leito, usando como simuladores esferas de vidro e sílica, comprovando que a relação entre o sinal elétrico e o teor de umidade não foi afetada até um aumento da velocidade do ar de até 25%, partindo da velocidade inicial de $0,4 \text{ m s}^{-1}$.

Um sistema de controle num secador de erva mate foi proposto por ZANOELO et al. (2008), visando manter a umidade relativa do ar de exaustão do secador, variando entre 2,4 a 3,4% (em base seca), ajustando a velocidade das correias transportadoras em função dos distúrbios no processo. As estratégias de controle em malha aberta, fechada, com controle PID (Proporcional+Integral+Derivativo) e PI, foram testadas para variações da alimentação, teor de umidade, temperatura e velocidade do ar. As novas exigências de qualidade dos produtos unida à necessidade de processos mais eficientes desde o ponto de vista energético são grandes incentivos para que tecnologias de secadores convencionais sejam desenvolvidas ou adaptadas, facilitando a otimização dos processos.

Por outro lado, no ensino da Engenharia, a experimentação remota vem se mostrando uma realidade para estudantes, professores e pesquisadores. Motivado pela flexibilização dos

recursos didáticos de apoio ao ensino de graduação, tem-se observado nestes últimos anos o aumento significativo de laboratórios virtuais, com interatividades, simulação baseada em *Web* e laboratórios remotos, compondo uma gama diversificada de opções para os alunos de diferentes cursos.

Uma proposta de laboratório virtual para o ensino do controle automatizado de casas de vegetação, contendo um modelo completo do sistema, com um conjunto de operações de controle e uma interface homem-máquina (IHM) bem estruturada foi desenvolvido por GUZMAN et al., 2005. O laboratório tem como proposta conseguir a abstração dos resultados de pesquisas consolidadas, com a finalidade de que os alunos possam utilizá-las, entendendo de forma acessível a teoria matemática envolvida no processo de controle.

Diferentemente do laboratório virtual, onde todo o processo se resume a uma simulação em *software*, o laboratório remoto permite a interação com processos reais permitindo ao usuário a análise de problemas práticos, assim como a troca de informações entre diversos cursos e especialidades. Permite também maior interação com o laboratório, até em períodos fora do horário de aula, além de representar a economia de recursos alocados para este tipo de prática, já que um único experimento pode ser compartilhado por dezenas de usuários, dependendo do propósito para o qual foi construído.

O controle automático predial foi estudado através de um laboratório remoto proposto por SANTOS et al. (2004), representado matematicamente com um modelo de sistema térmico de primeira ordem, para estudar diferentes estratégias de controle climático. Uma maquete, composta por cinco escritórios e sistema de aquecimento e resfriamento foi construída, simulando diferentes temperaturas, testando-se diferentes estratégias de controle automatizado, visando à racionalização de energia, com execução em tempo real.

Apresenta-se o desenvolvimento da primeira fase do *software* TERMICONT, para a supervisão e controle, local e remoto, de uma planta térmica para secagem de produtos agrícolas, visualizando os dados em gráficos e tabelas, geração de arquivos de dados do processo, tratamento dos sinais e identificação

do sistema. Em função das particularidades do processo de secagem para diferentes tipos de produtos, pode ser alterado o *set point*, para estabelecer diferentes estratégias de controle. Uma validação com dados experimentais do aquecimento do ar são mostrados, visualizando algumas das interfaces possíveis do *software*. Na segunda fase, em andamento, o aplicativo permitirá a visualização da evolução do teor de umidade e peso dos produtos durante a secagem, da umidade relativa e temperatura do ar, consumo de energia elétrica e conversão do consumo de energia elétrica em equivalente de outras fontes de energia (lenha, gás).

MATERIAL E MÉTODOS

Bancada experimental

Constituída por um insuflador de ar (ventilador com vazão de 0,35 a 0,91 m³ s⁻¹), uma resistência (marca STEINEL, potência nominal de 1.200 W) e um sensor de temperatura (termoresistência PT 100, 4-20 mA) e de umidade (marca Honeywell, HIH-3610-003, 4-20 mA), para medir a temperatura e umidade do ar na saída da câmara de secagem.

O controle da temperatura do ar na entrada é feita através de saída PWM (*Pulse-Width Modulation*), atuando na resistência de aquecimento, através de um controlador (Novus N1100), com sistema de auto-sintonia dos parâmetros PID (Proporcional+ Integral+ derivativo) e saída de largura de pulso modular PWM (*Pulse-Width Modulation*), e um sensor de temperatura (PT 100, 4-20 mA), para medir a temperatura do ar na entrada da câmara de secagem.



Figura 1- Bancada experimental de secagem

A capacidade do secador é de aproximadamente 1 kg de produto, que serão colocados numa bandeja, e o ar quente insuflado pelo ventilador atravessa o leito no sentido vertical, saindo pela parte superior, denominada de exaustão. A bancada experimental fica exposta às condições ambientais de temperatura e umidade relativa do ar (25°C e 60%). Ao ar escoar pelo leito de produtos, este se resfria e aumenta a umidade relativa devido a transferência de calor e massa durante o processo, havendo o aumento da temperatura do produto e a perda de água, diminuindo o teor de umidade dos mesmos.

Modelagem simplificada de processos de secagem e sistemas térmicos

O teor de umidade de equilíbrio pode ser descrito pela equação 1 (BROOKER et al., 1992):

$$Y_{eq} = 0,0 \left[\frac{\ln(1 - UR)}{-A(T + B)} \right]^{\frac{1}{C}} \quad (1)$$

Onde: Y_{eq} é o teor de umidade de equilíbrio (%); em base seca, UR a umidade relativa do ar (%); T a temperatura do ar de secagem (°C); e A, B e C são coeficientes com valores de 8,6541x10⁻⁵; 49,81 e 1,8634, respectivamente.

A taxa de secagem pode ser descrita por uma equação empírica (BROOKER et al., 1992):

$$\frac{dM}{dt} = -k(M - M_e)$$

Onde: M é o teor de umidade do produto em base seca; k a constante de secagem (h⁻¹) e t o tempo de secagem (h).

O balanço de energia do processo pode ser expresso pela equação 3 e descrito na figura 2:

$$\frac{dT}{dt} = \frac{G_g}{c_a G_a} \frac{dM}{dt} \quad (3)$$

Onde: c_a é o calor específico do ar seco (kJ kg⁻¹ °C⁻¹); h o calor de vaporização (kJ kg⁻¹); G_g o fluxo de grãos (matéria seca) (h⁻¹ m⁻²); G_a o fluxo de ar (h⁻¹ m⁻²); dT é a variação da temperatura (°C); $\frac{dM}{dt}$ a variação do teor de umidade dos produtos em base seca.

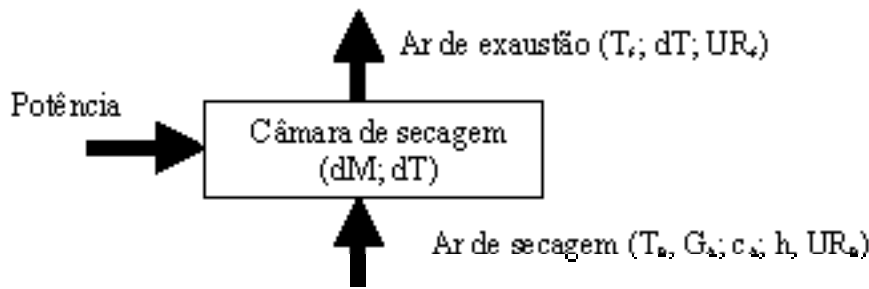


Figura 2- Representação da bancada processo (T_e - temperatura do ar na entrada; UR_e - umidade relativa do ar na entrada; T_s - temperatura do ar na saída do secador; UR_s - umidade relativa do ar na saída).

A função de transferência ($G(s)$) de um sistema térmico pode ser aproximada para um sistema de primeira ordem com um atraso de transporte, como mostra a equação 4. Os valores dos parâmetros para a sintonia do controle PID (L_s , t_s e K_e), foram obtidos para as duas vazões de ar estabelecidas (mínima e máxima) aplicando o Método de Ziegler-Nichols (OGATA, 2005).

$$G(s) = \frac{k^{-k}}{\tau s + 1} \quad (4)$$

Onde: L_s é o tempo de atraso ou tempo morto (s); t_s a constante de tempo do sistema (s); K_e o ganho estático do sistema (s).

Nos experimentos preliminares para validar a ferramenta, fixaram-se os valores de potência de aquecimento em 50% e selecionadas duas vazões de ar (mínima de $0,35 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ e máxima de $0,55 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$), controladas através de um potenciômetro. Após a parametrização do sistema o sistema de ventilação e aquecimento do ar era ligado até que o sistema entre em regime permanente. Nesta etapa do trabalho os experimentos de validação não contemplaram secagem de produtos, apenas aquecimento do ar. As equações do modelo de secagem para cada tipo de produto que poderá ser secado na planta estão em fase de introdução na ferramenta.

Hardware

O sistema é composto de um computador Pentium (512 Mb de RAM; 60 Gb, com interface de rede *Ethernet*). A aquisição dos sinais dos

sensores de temperatura e umidade, assim como o controle da vazão de ar, foi feito através de uma placa de aquisição PCI-6224.

Através do controlador é feita a configuração do sinal de entrada e saída de controle via teclado frontal e/ou Modbus RTU. A interface de comunicação *hardware-software* é híbrida, sendo o controlador de temperatura, responsável pelo controle da resistência de aquecimento do ar e comunica-se com o protocolo MODBUS-RTU com interface RS 485.

O complemento do sistema de interfaceamento conta com uma placa PCI-6821, responsável pela aquisição dos sinais de saída e o controle da vazão de ar do sistema.

Software

Optou-se pela arquitetura de *layout* de tela simplificado, para facilitar a visualização local e remota do *software*. A estrutura de telas foi dividida em três partes:

- **Painel de parametrização e cadastro:** usado para configurar o *software*, através do cadastro do usuário, entidade e tipo de operação do sistema.

- **Painel principal:** atua como supervisor da planta térmica, desenho do gráfico e indicação dos valores medidos em tempo real.

- **Painel de análise e resultados:** gera um arquivo de dados ASCII, para a análise e estudo do processo. Pode-se visualizar também a parametrização e equação do sistema.

O sistema pode ser parametrizado para operar de dois modos:

- **Modo identificação e modelagem da planta:** aquisição de dados para obter as curvas do sistema em malha aberta para a modelagem matemática. Possui opção de configuração somente da potência de saída do sistema.

- **Modo controle da planta:** aquisição de dados para obter curvas do sistema em malha fechada, que permitem o estudo de estratégias de controle. Possui opção de configuração do *set point* de operação, banda proporcional, tempo derivativo e taxa integral do sistema, já que este remete somente no levantamento da curva característica de controle do sistema.

Para operar em malha aberta, através do *software* configura-se o controlador para modo de controle manual, seta a porcentagem de PWM na resistência de aquecimento. Além de configurar a vazão de ar através da saída analógica da placa 6821.

Para que a planta opere em malha fechada, deve-se configurar o controlador em modo de controle: automático; *set point* de operação; banda proporcional; tempo derivativo e taxa integral.

A conexão remota poderá ser realizada, desde que previamente configurada, podendo estar baseada em uma página HTML comum, que referencia um controle tipo ActiveX, proprietário da *National Instruments* (TRAVIS, 2000).

Para que este controle funcione, será necessário instalar um *software* de RUNTIME no computador de acesso, proporcionando todas as características de operação do sistema (Figura 3).

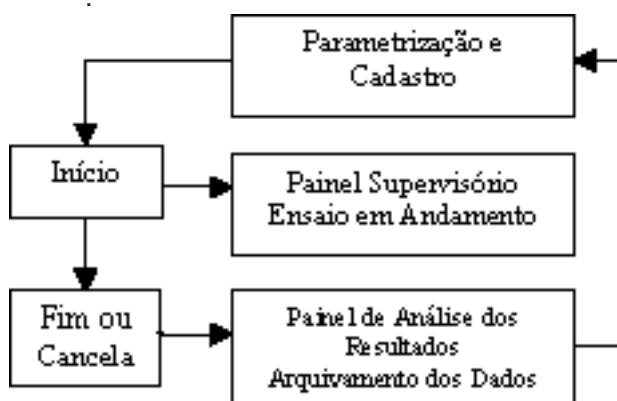


Figura 3- Diagrama de blocos do *software* TERMICONT

COMUNICAÇÃO

Propõe-se uma arquitetura remota portátil, compatível com diferentes plataformas de *hardware*, usando um servidor *Web*, limitado pela capacidade do servidor e a largura de banda de rede. Para a implantação do sistema remoto serão configurados dois subsistemas: um para a comunicação entre o computador onde pode-se publicar e acessar a página na internet e o processo. Outro responsável pela interação com os usuários remotos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A tela de supervisão e controle da planta de secagem mostra-se na figura 4, com as opções de visualização da temperatura do ar na entrada e saída da câmara, além da umidade relativa do ar na saída, e um gráfico em tempo real da variação destes parâmetros. É possível visualizar também o valor da potência de saída, em porcentagem, ao mesmo tempo, estes dados são armazenados em arquivo de texto.



Figura 4- Tela HTML com controle ActiveX

Na figura 5 mostra-se a tela de configuração do experimento e modo de controle. O usuário pode fazer o registro e alteração de parâmetros, preenchendo o campo Operador e Instituição, escolhendo uma das opções disponíveis, Identificação e Modelagem da Planta ou Controle da Planta. Através desta tela é possível alterar a taxa de aquisição e potência de saída da resistência elétrica, entre 0-100%.

Os testes preliminares mostraram a viabilidade de supervisionar e alterar os parâmetros envolvidos no processo de secagem em tempo real, realizando o registro dos dados para posterior análise.

Os valores obtidos experimentalmente das variáveis da equação do modelo estão mostrados na Tabela 1. O ruído foi atenuado através de filtros capacitivos, sem interferir na dinâmica do sistema.

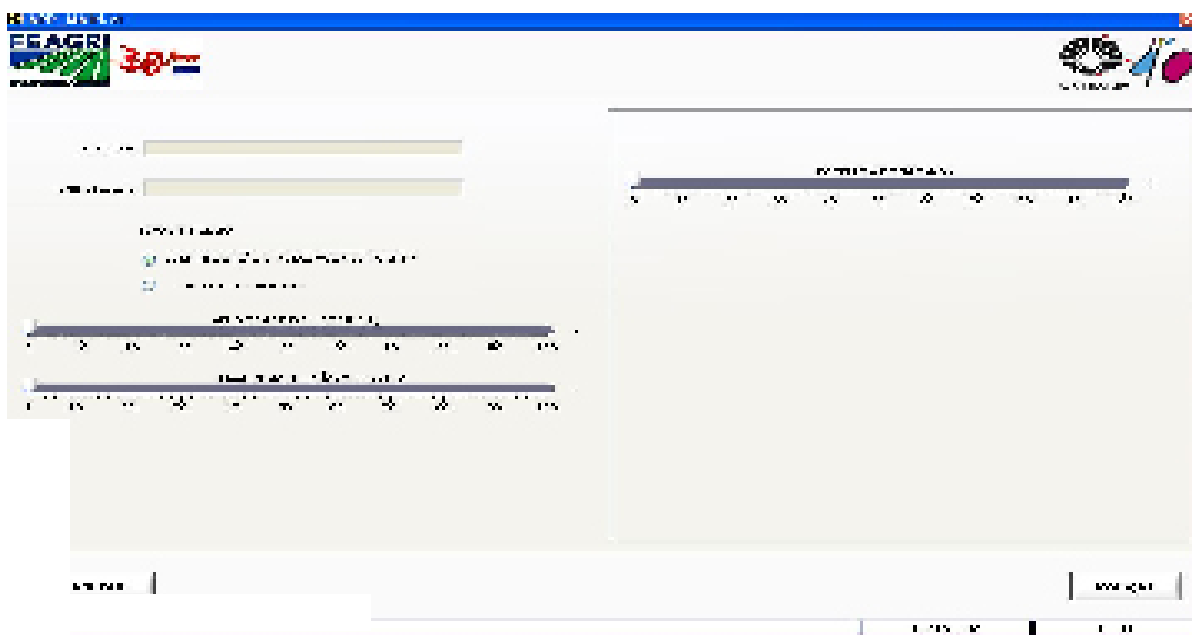


Figura 5- Tela de identificação de usuário e alteração de parâmetros

Os valores dos parâmetros de sintonia do controle PID apresentaram diferença entre 38 e 22% em relação à vazão máxima e mínima. A temperatura do ar aumenta até 70°C

no aquecimento com menor vazão e para a máxima vazão a temperatura do ar atinge valores de 90°C (Figura 6).

Tabela 1: Parâmetros de sintonia do controlador PID (Método de Ziegler-Nichols)

Parâmetro	Vazão mínima	Vazão máxima
L_s (s)	21,0	13,0
τ_s (s)	124,0	96,0
K_e (s)	118,8	72,2
ΔT (°C)	59,4	36,1

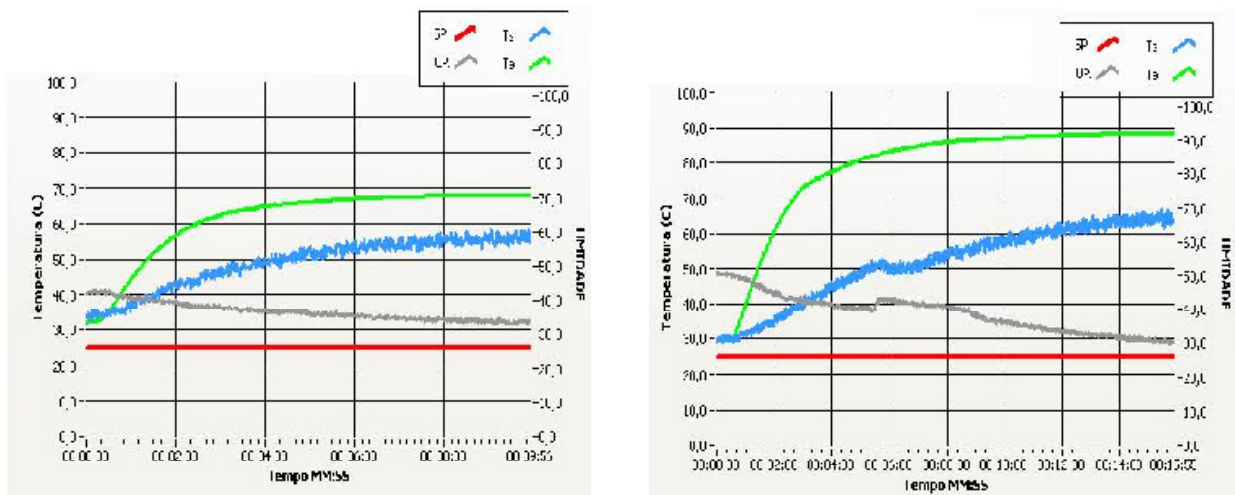


Figura 6- Temperatura de *set point* (SP), temperatura e umidade relativa do ar na saída da câmara (Ts e UR) e temperatura do ar na entrada (Te), para as duas condições de vazão e potência na resistência de 50%.

Os valores de temperatura calculados foram comparados com aqueles obtidos através da equação, constatando que os resultados das simulações se aproximam aos valores obtidos pelos experimentos (Figura 7).

médio total entre o valor experimental e o modelo foi de 0,85% o que representa uma diferença em termos de temperatura de 0,09°C por ponto. Já no experimento com a maior vazão o erro médio foi de 0,18% e por ponto de 0,01°C.

No experimento com menor vazão o erro

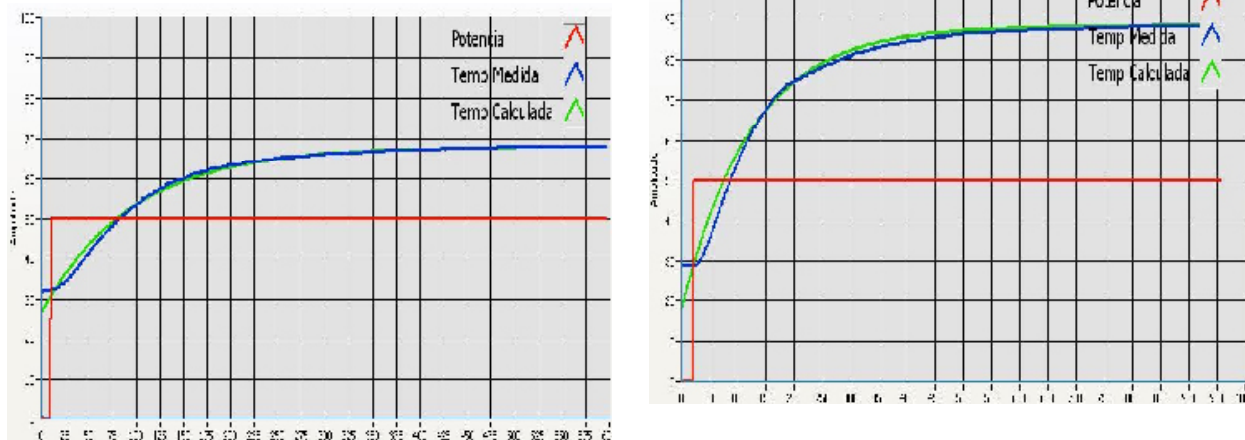


Figura 7- Comparação entre os valores da temperatura medida experimentalmente e calculada.

CONCLUSÕES

O processo de secagem apresentado permite o estudo do sistema de controle e aquisição de dados, através do *software* TERMICONT e da *Web* implantada, colocando os usuários em contato com aspectos relevantes do processo de secagem.

A interface gráfica se mostrou adequada para a supervisão e controle, local e remoto, da planta de secagem. O sistema e *software* continuam sendo aprimorados, acrescentando-se novos recursos, dentre eles, as equações que representam a secagem de grãos, frutas e

hortaliças, introdução de lógica *fuzzy* para as estratégias de controle, dentre outros, visando convertê-la em uma ferramenta disponível para o apoio a atividades de ensino, pesquisa e extensão na Faculdade de Engenharia Agrícola, e a interação com outras instituições.

AGRADECIMENTOS

À FAPESP e Laboratório de Instrumentação e Controle da Faculdade de Engenharia Agrícola, da Universidade Estadual de Campinas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BROOKER, D.B; BAKKER-ARKEMA, F.W; HALL C.W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. New York, NY: Van Nostrand Reinhold, 1992, 435 p.
- GUZMÁN, J.L.; RODRIGUEZ, F.; BERENGUEL, M.; DORMIDO, S. Laboratorio virtual para la enseñanza de control climático de invernaderos. *Revista Ibero-Americana de Automática e Informática Industrial*, Valencia, ESP, v.2, n.2, p.82-92, 2005.
- JESUZ, J.C.; RADUNZ, L.L.; MELO, E.C.; ROCHA, R.P.; BERBERT, P.A. Automação do controle da temperatura do ar em secador de plantas medicinais e aromáticas. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA – CONBEA, 30., 2001, Foz do Iguaçu, Paraná. *Anais...* Jaboticabal, SP: Associação Brasileira de Engenharia Agrícola, SBEA, 2001. Publicado em CR-Rom.
- LIU, Q. & BAKKER-ARKEMA, F.W. *A model-predictive controller for grain drying*. *Journal of Food Engineering*, Davis, CA, v.49, p.321-326, 2001a.
- LIU, Q. & BAKKER-ARKEMA, F.W. *Automatic control of crossflow grain dryers, Part 3: field testing of a model-predictive controller*. *Journal of Agricultural Engineering Research*, Silsoe, UK, v.80, n.3, nov. p. 245-250, 2001.
- LIU, X.; CHEN, X.; WU, W.; ZHANG, Y. Process control based on principal component analysis for maize drying. *Food Control*, Elsevier v.17, p.894–899, 2006.
- NATIONAL INSTRUMENTS, LabView. *Intermediate I : successful development practices, course manual*. Austin, TX : National Instruments , 2004. 320 p.
- OGATA, K. *Engenharia do controle moderno*. 4.ed. São Paulo, SP Pearson Education do Brasil, 2005. 788 p.
- PORTOGHESE, F.; BERRUTI, F.; BRIENS, C. *Continuous on-line measurement of solid moisture content during fluidized bed drying using triboelectric probes*. New York: Powder Technology, Elsevier , 2007 .
- SANTOS, R.; BAUCHSPIESS, A.; BORGES, G. *Laboratório remoto de automação predial*. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENSINO DE ENGENHARIA, COBENGE, 32., 2004. Brasília, DF .*Anais...* Universidade de Brasília, set. 2004. Disponível em: <http://www.cobenge2004.nmi.unb.br/>. Acesso em 20/12/2006.
- SHABDE, V.S.; HOO, A.K. Optimum controller design for a spray drying process. *Control Engineering Practice*, Elsevier, v.16, n.5, may, p. 541-552, 2008
- SRZEDNICKI, G.S.; HOU, R.; DRISCOLL, R.H. Development of a control system for in-store drying of paddy in Northeast China. *Journal of Food Engineering*, Davis, CA, v.77, p.368–377, 2006.
- TRAVIS, J. *Internet: applications in LabView*. New Jersey: Prentice Hall, 2000. 250 p.
- ZANOELO E.F.; ABITANTE, A.; MELEIRO, L.A.C. Dynamic modeling and feedback control for conveyors-belt dryers of mate leaves. *Journal of Food Engineering*, Davis, CA, v. 84, p.458–468, 2008.