

SISTEMA PARA CONTROLE DE TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM EM SECADOR EXPERIMENTAL

**ELTON APARECIDO SIQUEIRA MARTINS¹, ANDRÉ LUÍS DUARTE GONELI²,
CESAR PEDRO HARTMANN FILHO³, JOSÉ CARLOS DE ANDRADE⁴, THALITA
MARTINHÃO DE SOUSA AZAMBUJA⁵**

¹ Eng. Agrícola, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, elton_asm@yahoo.com.br

² Eng. Agrônomo, Prof. Adjunto, UFGD / Dourados-MS, andregoneli@ufgd.edu.br

³ Eng. Agrônomo, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, cphartmann21@hotmail.com

⁴ Eng. Agrônomo, Mestrando em Agronomia UFGD / Dourados-MS, joseandradecarlos@hotmail.com

⁵ Eng. Agrônomo, Doutorando em Agronomia, UFGD / Dourados-MS, thalitaazambuja@gmail.com

Apresentado no
XLIV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - CONBEA 2015
13 a 17 de setembro de 2015- São Pedro- SP, Brasil

RESUMO: A temperatura e a velocidade do ar são as principais variáveis durante o processo de secagem de produtos agrícolas, devido a importância das mesmas muitos estudos sobre a secagem de produtos agrícolas estão sendo realizados em secadores experimentais que permitam o domínio destas variáveis. Assim, o presente trabalho teve por objetivo automatizar o controle de temperatura e velocidade do ar de secagem de um secador experimental, e validar o funcionamento do sistema de automação em conjunto com a estrutura do secador experimental. Para realizar o controle de temperatura do ar foi utilizado um controlador de temperatura, com lógica proporcional integral derivativa, um controlador de potência, um sensor de temperatura e um conjunto de resistências elétricas de troca de calor com o ar. Já para proporcionar diferentes velocidades ao ar de secagem foi utilizado um inversor de frequência ligado ao motor do ventilador. Para verificar a eficácia do controle de temperatura e velocidade do ar de secagem foram realizados testes preliminares com o secador experimental a vazio e em seguida ensaios de secagem de produtos agrícolas. Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o sistema de controle de temperatura e velocidade do ar de secagem funcionou de modo satisfatório.

PALAVRAS-CHAVE: controlador de potência, inversor de frequência, sensor de temperatura.

SYSTEM FOR CONTROL OF TEMPERATURE AND AIR SPEED DRYING IN EXPERIMENTAL DRYER

ABSTRACT: The temperature and air velocity are the most important variable during the drying process agricultural products, due to their importance in the many studies on drying agricultural products are being performed in experimental dryers which allow the domain of these variables. Thus, this study aimed to automate temperature control and drying air velocity of an experimental dryer, and validate the operation of the automation system in conjunction with the structure of the experimental dryer. For realize the air temperature control, a temperature controller was used with logic proportional integral derivative, a power controller, a temperature sensor and a set of electrical resistances of heat exchange with the air. Different speeds of the drying air was provided using a frequency converter connected to

the fan motor. To verify the effectiveness of the temperature control and drying air velocity preliminary tests were conducted with experimental dryer without product and then drying tests of agricultural products. Based on the results obtained it can be concluded that the temperature control system and drying air velocity functioned satisfactorily.

KEYWORDS: power controller, frequency converter, temperature sensor

INTRODUÇÃO

Os principais fatores que afetam o processo de secagem são a temperatura e a velocidade do ar de secagem, tendo influência direta no tempo de secagem e na qualidade final do produto. Quanto maior a temperatura e a velocidade do ar de secagem, menor será o tempo de secagem do produto, assim como também a possibilidade de perda de qualidade devido ao estresse hídrico gerado pela elevada taxa de secagem (CARLESSO et al., 2005). Devido a necessidade de estudar o processo de secagem de produtos agrícolas com condições controladas de temperatura e velocidade do ar, muitos pesquisadores, têm feito uso de secadores experimentais de leito fixo, em nível de laboratório, conseguindo maior controle e domínio dessas variáveis (CARLESSO et al., 2005; PRATES et al., 2012; MORAIS et al., 2013; OLIVEIRA et al., 2013).

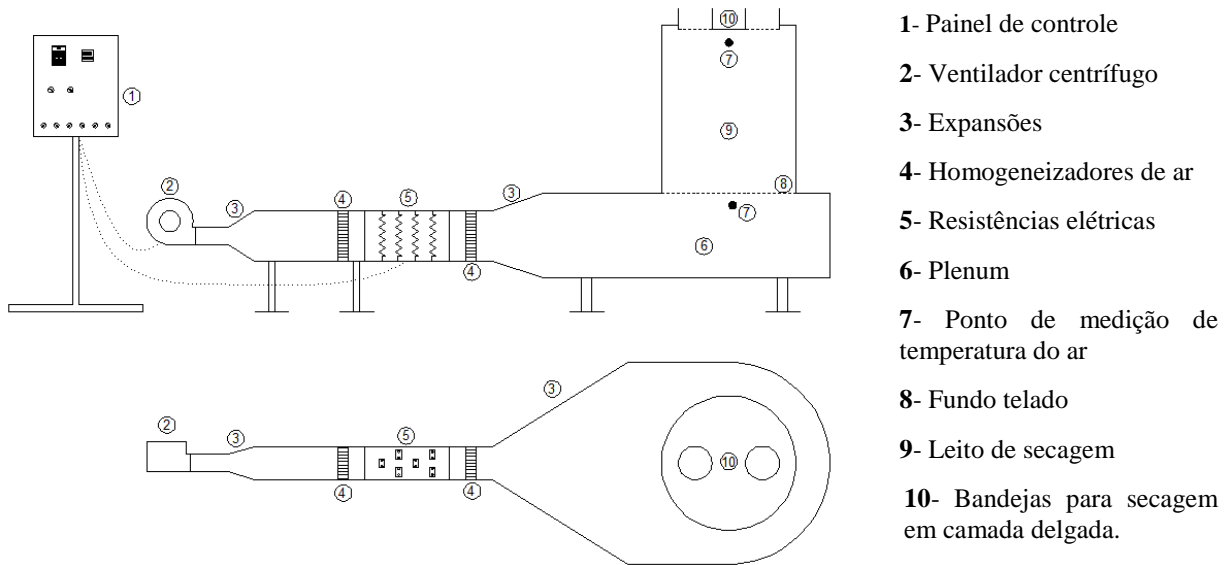
Rodrigues (2010) implementando lógicas de controle de temperatura em um secador experimental de leito fixo, testou o controle liga-desliga e o controle Proporcional Integral Derivativo (controle PID), verificando que quando utilizou o controle liga-desliga o valor de temperatura não estabilizou no valor desejado, apresentando oscilações na temperatura do ar de secagem, já o controle PID reduziu as oscilações na temperatura do ar de secagem. O controle PID é a combinação de ações de controle proporcional, integral e derivativa para gerar um único sinal de controle (RODRIGUES, 2010). A ação proporcional produz uma saída CV (variável controladora) proporcional à diferença entre o sinal medido (PV - variável de processo) e a referência (SP). Já a ação integral fornece um sinal de saída proporcional a intensidade e ao tempo em que o sinal de erro está presente e o elemento derivativo produz um sinal proporcional à taxa de variação do erro (MONTEIRO, 2002). O erro é conceituado como a diferença entre os valores de PV e SP, sendo PV a grandeza a ser monitorada no processo controlado, o SP o valor em que se deseja manter a grandeza monitorada e a CV é a grandeza a ser controlada no processo.

O fluxo de ar nos secadores experimentais é fornecido por insuflação por meio de ventiladores, geralmente, do tipo centrífugo, sendo que a potência dos ventiladores utilizados variam de 186,5 à 735,5 W. Para regular o fluxo de ar nos secadores experimentais os pesquisadores usam diafragmas na entrada de ar do ventilador ou inversor de frequência para modular a rotação do motor e, conseqüentemente, controlar a vazão do ventilador, ou ainda, a combinação destes dois dispositivos.

Diante do exposto, objetivou-se com o presente trabalho automatizar o controle de temperatura e velocidade do ar de secagem de um secador experimental, e validar o funcionamento do sistema de automação em conjunto com a estrutura do secador experimental.

MATERIAL E MÉTODOS

O secador experimental em que foi realizada a automação do controle de temperatura e velocidade do ar de secagem está esquematizado na Figura 1, em que são ilustradas as vistas frontal e superior, respectivamente, do equipamento com todos os seus componentes.



- 1- Painel de controle
- 2- Ventilador centrífugo
- 3- Expansões
- 4- Homogeneizadores de ar
- 5- Resistências elétricas
- 6- Plenum
- 7- Ponto de medição de temperatura do ar
- 8- Fundo telado
- 9- Leito de secagem
- 10- Bandejas para secagem em camada delgada.

Figura 1. Ilustração esquemática do secador experimental projetado para a secagem de produtos agrícolas.

O secador experimental possui como fonte de aquecimento um conjunto de seis resistências elétricas aletadas de troca de calor com o ar, totalizando 12 kW de potência, e para insuflar o ar de secagem um ventilador Siroco, do fabricante Ibram, modelo VSI-160, o qual possui um motor de 1 cv. O sistema de aquecimento foi projetado para aquecer o ar de secagem à pelo menos 90 °C quando a velocidade do ar, no leito de secagem em camada delgada (duas bandejas de 20 cm de diâmetro), for de até 2 m s⁻¹.

Na Figura 2 é apresentado o secador experimental, construído com base no esquema da Figura 1, em que foi implementado a automação do controle de temperatura e velocidade do ar de secagem.



Figura 2. Secador experimental para secagem em camada delgada e espessa de produtos agrícolas.

A automação do secador experimental foi constituída de um painel de comando, para proporcionar o controle automático da temperatura do ar de secagem e possibilitar a variação da rotação do motor do ventilador centrífugo, conseqüentemente, alterando a vazão de ar para a secagem. No painel de comando foram usados disjuntores e relé térmico como dispositivos de segurança para sobrecargas e curto circuito, relé falta e sequência de fase para proteger o

motor do ventilador em caso de ausência ou inversão de fases na rede de alimentação (motor trifásico). Também foram usados contadores, sinalizadores de indicação de processos e falhas além de chaves seletoras.

O controle de temperatura do ar de secagem foi baseado em uma lógica de controle Proporcional Integral Derivativo (PID). Foram utilizados os seguintes componentes: controlador de temperatura que possibilitasse utilização de controle PID, módulo de controle de potência de cargas resistivas e um sensor de temperatura. O processo de controle automático de temperatura foi projetado para responder à perturbações ou distúrbios (Figura 3) ocasionados por variações de temperatura do ar ambiente e de fluxo de ar durante o processo de secagem, no qual o processo de controle deverá contornar esses distúrbios.

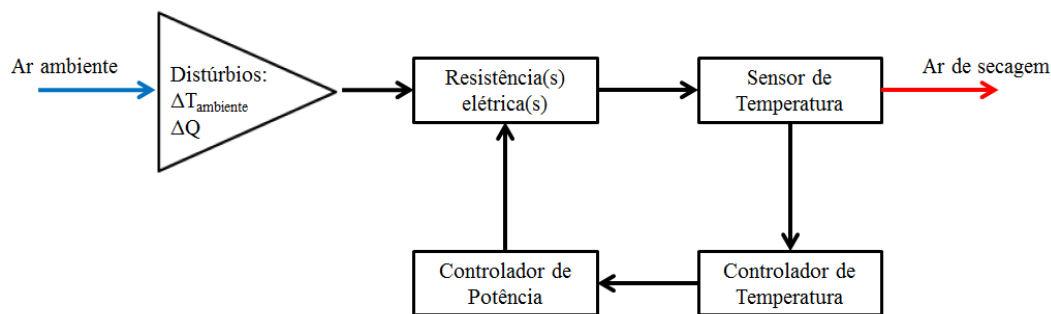


Figura 3. Diagrama do processo de controle de temperatura do ar de secagem.

Para regular o fluxo do ar de secagem foi selecionado um inversor de frequência para atender as necessidades do motor do ventilador centrífugo, possibilitando a variação da rotação do eixo do motor e, conseqüentemente, a vazão fornecida durante o processo de secagem.

Após a automação do secador experimental foram realizados alguns testes com o secador a vazio para verificar a distribuição de ar e temperatura nas bandejas para a secagem em camada delgada. Para realizar a verificação dos parâmetros citados anteriormente, o secador foi regulado em diferentes condições de velocidade (0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹) e temperatura do ar de secagem (40, 65 e 90 °C) e realizado as medições de cada parâmetro em intervalos de 20 minutos durante 2 horas. A distribuição de ar, no par de bandejas, foi verificada utilizando um termo anemômetro de pás rotativas, da marca Instrutherm, modelo TAD 500, com precisão de ±0,1 m s⁻¹. Juntamente com a verificação da velocidade do ar nas bandejas foi verificada a temperatura do ar, em cada bandeja, utilizando termômetros de mercúrio, graduados de -10 à 210 °C.

Após os testes a vazio foram realizadas secagens de produtos agrícolas, também com o intuito de comprovar o funcionamento do secador em camada delgada e espessa. Para verificar o funcionamento do secador experimental em camada delgada realizou-se a secagem de folhas de guavira [*Campomanesia adamantium* (Cambess.) O. Berg] em quatro condições de temperatura controlada (40, 50, 60 e 70 °C) e duas velocidades do ar de secagem (0,4 e 1,2 m s⁻¹), e também, a secagem de sementes de soja em cinco condições de temperatura controlada (40, 50, 60, 70 e 80 °C) e três velocidades do ar de secagem (0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹). Os processos de secagem, para ambos os produtos, foram realizados em duas bandejas do secador experimental. Durante o processo de secagem, as bandejas com as amostras foram pesadas periodicamente, utilizando uma balança analítica digital com resolução de 0,01 g, para acompanhar a variação do teor de água.

Para avaliar o secador experimental na secagem em camada espessa realizou-se a secagem de sementes de soja em cinco condições controladas de temperatura (40, 50, 60, 70 e 80 °C), com a densidade de fluxo de ar de secagem de 0,20 m³ s⁻¹ m². As sementes de soja

foram secas até atingirem o teor de água de aproximadamente 0,16 decimal b.s.. Para acompanhar a variação do teor de água das sementes de soja durante a secagem, foram colocadas amostras de sementes de soja em cinco embalagens teladas, e espalhadas na camada espessa de sementes, em que cada embalagem consistiu em uma repetição. Sendo acompanhada a variação da massa, do conteúdo das embalagens, durante a secagem. Conhecendo-se o teor de água inicial do produto e a variação de massa em determinado instante, determinava-se o teor de água daquele produto no dado instante.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para o controle de temperatura e seleção da velocidade do ar foi desenvolvido um painel de comando, o qual é constituído por um circuito principal ou de força (Figura 4) e um circuito de comando (Figura 5).

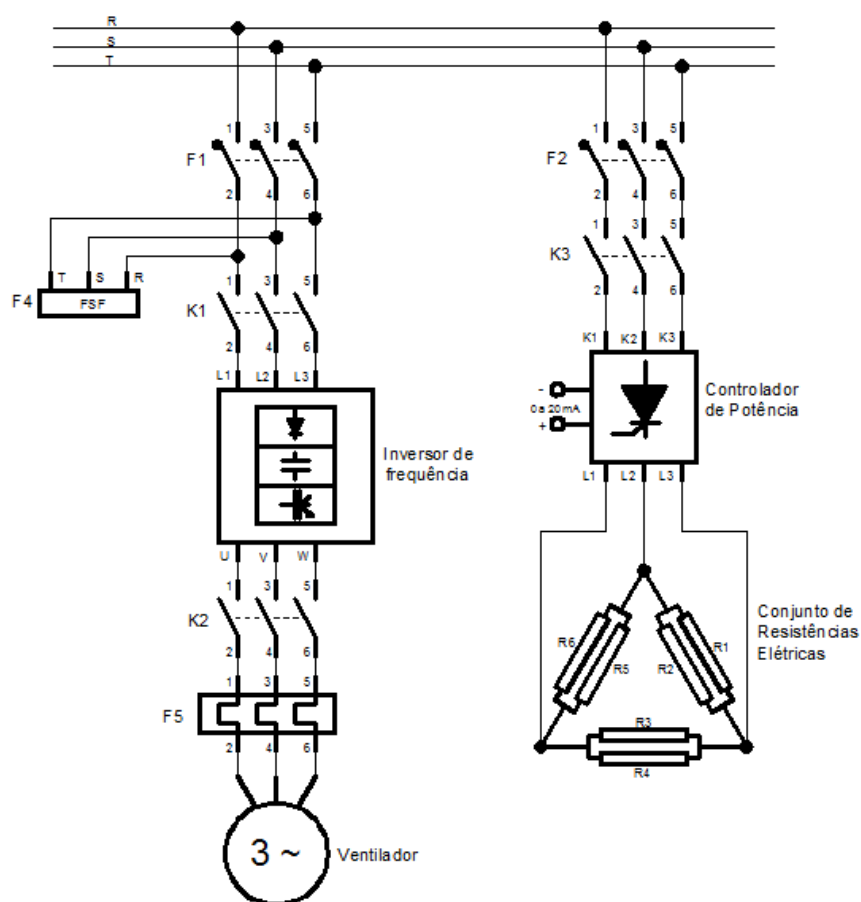


Figura 4. Circuito principal ou de força do painel de controle de temperatura e fluxo de ar de secagem.

abertos da contatora K2 (13-14) para que o sistema de aquecimento somente seja ligado caso o ventilador esteja em funcionamento (Figura 5).

No circuito de comando (Figura 5) do painel de controle do secador experimental a chave seletora B1 é responsável por energizar e desenergizar todo o painel de controle, enquanto as teclas “I” e “0” da interface de controle do inversor de frequência são responsáveis pelo seu acionamento e desligamento e, conseqüentemente do motor do ventilador. Já a chave seletora B2 é responsável por energizar e desenergizar a contatora K3 e, conseqüentemente, o controlador de potência e o conjunto de resistências elétricas.

Ao colocar a chave seletora B1 na posição ligada, o relé de tempo D1 é energizado, o qual atrasa a comutação da contatora K1 em 40 s, e o mesmo acontece no caso do sistema estar em pleno funcionamento e haver uma falha na alimentação do mesmo, para que na retomada do sistema o inversor de frequência não seja iniciado imediatamente, garantindo que o mesmo volte a operar normalmente após ser desenergizado, conforme recomenda Rodrigues (2010).

O painel de controle montado com base nos circuitos de força e comando das Figuras 4 e 5 são mostrados nas Figuras 6 e 7.



Figura 6. Vista interna (à esquerda) e da tampa (à direita) do painel de controle de temperatura e fluxo de ar de secagem.

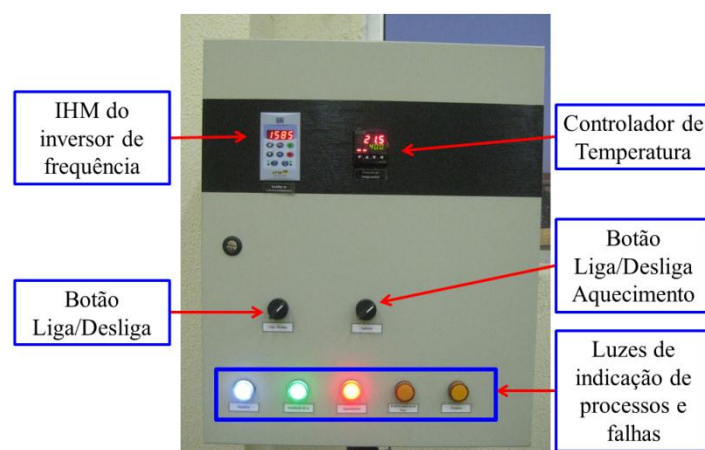


Figura 7. Vista frontal do painel de controle do secador experimental.

O controlador de temperatura utilizado foi o N1200, da marca Novus (NOVUS, 2013b), sendo este componente o “cérebro” do processo de controle de temperatura. O controlador de temperatura utilizado trabalha com lógica de controle PID, que ao receber do sensor de temperatura a temperatura instantânea do processo, faz a comparação com o valor

de temperatura programado (SP), realiza as ações de controle PID e, gera o sinal de controle variável (4 a 20 mA) para o controlador de potência para que o mesmo forneça a potência adequada para que as resistências elétricas aqueçam o ar de secagem conforme o programado, sendo essa ação contínua durante todo o processo de secagem, mantendo a temperatura programada constante. O painel de controle do secador experimental (Figura 7) possui sinalizadores de indicação de processos e falhas, indicando quando o painel está energizado (pronto para o funcionamento); que a ventilação e o aquecimento estão em funcionamento; e ainda indicam falhas referentes a sobrecorrente do motor do ventilador e falta e sequência de fase.

O sensor de temperatura utilizado para medir a temperatura do ar de secagem foi um pt 100 (termorresistência), o qual apresenta uma faixa de trabalho de -200 a 650 °C, possuindo uma haste de comprimento de 50 cm. O sensor de temperatura é acoplado ao secador por meio de rosca de 1/2", sendo possível acoplar o sensor de temperatura nos dois possíveis pontos de leitura de temperatura, sendo esses pontos o mais próximo possível do leito de secagem em camada delgada e espessa, conforme ilustrado na Figura 1.

Na Tabela 1 são apresentadas as temperaturas (T1 e T2, em °C) e velocidades (V1 e V2, em m s⁻¹) do ar, verificadas a cada 20 minutos durante duas horas, nas bandejas 1 e 2 do secador experimental, quando o mesmo foi regulado para as temperaturas de 40, 65 e 90 °C e velocidades do ar de 0,4; 1,2 e 2,0 m s⁻¹.

Tabela 1. Temperaturas (T1 e T2), em °C, e velocidades (V1 e V2), em m s⁻¹, do ar nas bandejas 1 e 2 do secador experimental para diferentes condições de ar de secagem.

Tempo (min)	0,4 m s ⁻¹		1,2 m s ⁻¹		2,0 m s ⁻¹		0,4 m s ⁻¹		1,2 m s ⁻¹		2,0 m s ⁻¹	
	T1	T2	T1	T2	T1	T2	V1	V2	V1	V2	V1	V2
40 °C												
0	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
20	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	41,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
40	40,0	40,0	40,5	41,0	40,5	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
60	40,0	40,0	40,0	40,5	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
80	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
100	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
120	40,0	40,0	40,0	41,0	40,0	40,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
65 °C												
0	65,0	65,0	65,0	65,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
20	65,0	65,0	66,0	65,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
40	65,0	65,0	67,0	66,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
60	65,0	65,0	66,0	65,0	66,5	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
80	65,0	65,0	67,0	66,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
100	65,0	65,0	66,0	66,0	66,0	66,5	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
120	65,0	65,0	66,0	66,0	66,0	66,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
90 °C												
0	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
20	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	93,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
40	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
60	90,0	90,0	93,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
80	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
100	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	93,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0
120	90,0	90,0	92,0	92,0	92,0	92,0	0,4	0,4	1,2	1,2	2,0	2,0

Notou-se boa distribuição de ar nas bandejas, independente da velocidade do ar de secagem no decorrer do tempo de ensaio (Tabela 1). O inversor de frequência permitiu muita praticidade no ajuste da velocidade do ar de secagem.

Ainda na Tabela 1, observa-se boa uniformidade e consistência da temperatura entre as bandejas do secador experimental, em que não houve variações superiores a 1 °C, entre

bandejas. Porém notou-se o aquecimento do ar, de aproximadamente 2 °C, com o aumento da velocidade do ar de secagem. Devido a essas observações, recomenda-se realizar a verificação da temperatura do ar de secagem com termômetro padrão para verificar se confere com a temperatura programada no controlador de temperatura, e também, que durante a secagem em camada delgada seja realizado o rodízio da posição das bandejas.

Após os testes preliminares com o secador, foram realizadas secagens em camada delgada de folhas de guavira e de sementes de soja, em que durante a secagem em camada delgada, tanto das folhas de guavira como das sementes de soja, pode-se enfatizar que o secador experimental apresentou praticidade em seu uso e bom desempenho. Na Figura 8 é apresentada a variação do teor de água em cada bandeja do secador experimental, para a secagem das folhas de guavira e sementes de soja, durante a secagem com velocidade do ar de 0,4 m s⁻¹ e temperatura de 40 °C.

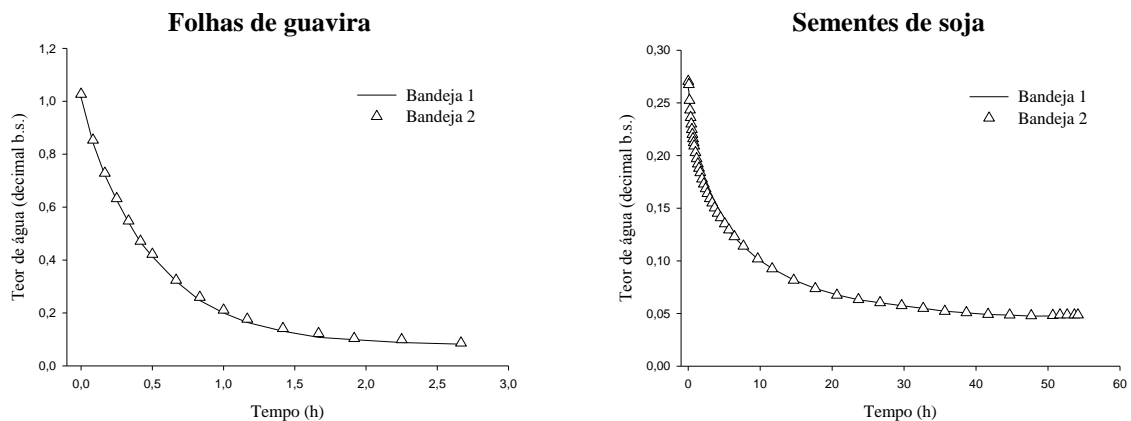


Figura 8. Variação do teor de água, de folhas de guavira e sementes de soja, nas bandejas 1 e 2 do secador experimental, durante a secagem com velocidade do ar de 0,4 m s⁻¹ e temperatura de 40 °C.

Em ambas as secagens em camada delgada, apresentadas na Figura 8, foi possível observar, de maneira indireta, que houve uma boa uniformidade na velocidade e temperatura do ar de secagem nas bandejas do secador experimental, pois a variação do teor de água entre as bandejas foi muito semelhante.

Também foi realizada a secagem em camada espessa de sementes de soja, na Figura 9 é apresentada a variação do teor de água entre as embalagens teladas distribuídas na camada espessa de sementes de soja, durante a secagem na temperatura de 40 °C e fluxo de ar de 0,20 m³ s⁻¹ m⁻².

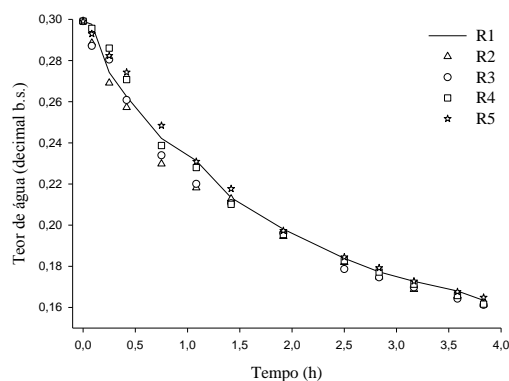


Figura 9. Variação do teor de água das sementes de soja secas em camada espessa, na temperatura de 40 °C e fluxo de ar de 0,20 m³ s⁻¹ m⁻² no secador experimental.

A secagem de sementes de soja em camada espessa, Figura 9, evidenciou o funcionamento satisfatório do secador experimental para este tipo de secagem, como pode ser observado não houve variações acentuadas do teor de água entre as embalagens espalhadas na camada de sementes durante a secagem.

De um modo geral, as Figuras 8 e 9 indicam que a geometria do secador experimental proporcionou a distribuição uniforme no leito de secagem em camada delgada e espessa, e que o sistema de controle de temperatura, com lógica PID, mostrou-se eficiente em todas as temperaturas estudadas, mantendo a temperatura constante durante todo o processo de secagem, com baixas oscilações.

CONCLUSÕES

Com base nos resultados obtidos pode-se concluir que o sistema de controle de temperatura e velocidade do ar de secagem funcionou de modo satisfatório e que a geometria do secador experimental proporcionou uniformidade na distribuição do fluxo de ar no leito de secagem em camada delgada e espessa.

REFERÊNCIAS

CARLESSO, V.O.; BERBERT, P.A.; SILVA, R.F.; VIANNA, A.P.; DETMANN, E.; DIONELLO, R.G. Secagem de sementes de maracujá em camada delgada. **Revista Brasileira de Fruticultura**, v.27, n.3, p.444-448, 2005.

MONTEIRO, P.M.B. **Tecnologia 1-Wire™ Aplicada ao Controle em Tempo Real de Sistemas de Aeração de Grãos**. 2002. 135p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

MORAIS, S.J.S.; DEVILLA, I.A.; FERREIRA, D.A.; TEIXEIRA, I.R. Modelagem matemática das curvas de secagem e coeficiente de difusão de grãos de feijão-caupi (*Vigna unguiculata* (L.) Walp.). **Revista Ciência Agronômica**, v.44, n.3, p.455-463, 2013.

NOVUS, **Controlador de potência**. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/controlador%20de%20pot%EAncia.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013a.

NOVUS, **Controladores e indicadores**. Disponível em: <<http://www.novus.com.br/downloads/Arquivos/folheto%20n1200.pdf>>. Acesso em: 20 jul. 2013b.

OLIVEIRA, M.T.R.; BERBERT, P.A.; MARTINAZZO, A.P. Avaliação de modelos matemáticos na descrição das curvas de secagem por convecção de *Pectis brevipedunculata* (Gardner) Sch. Bip. **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.15, n.1, p.1-12, 2013.

PRATES, M.F.O.; REIS, R.C.; DEVILLA, I.A.; FARIA, R.Q.; LIMA JUNIOR, A.F. Cinética de secagem de folhas de *Solanum lycocarpum* A. St.-Hil. (fruta-de-lobo). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, v.14, n.3, p.514-521, 2012.

RODRIGUES, C.L.C. **Desenvolvimento de um sistema automático para um secador de produtos agrícolas**. 2010. 162p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

WEG, **Inversor de frequência CFW 08**. Disponível em <<http://www.weg.net/br/Produtos-e-Servicos/Drives/Inversores-de-Frequencia/CFW08>>. Acesso em: 20 jul. 2013.