
CONTROLE DA TEMPERATURA E VELOCIDADE DO AR DE SECAGEM EM UM SECADOR DE PLANTAS MEDICINAIS

Mauro de Oliveira Prates¹, Tarcísio de Assunção Pizzio², Evandro de Castro Melo³, Ronicely Pereira Rocha⁴, José Vitor Nicácio⁵

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a implementação de um sistema de controle de temperatura e velocidade do ar, em um secador de plantas medicinais, utilizando-se microcontrolador PIC16F877A. A velocidade do ar foi monitorada com anemômetro de conchas e o seu controle realizado com um inversor de frequência. A temperatura foi medida pelo sensor LM35 e o seu controle foi realizado utilizando-se um triac. com um microcontrolador realizaram-se ações de controle PID, que determinavam a largura de pulso de um sinal PWM, que acionava o inversor de frequência e, também, o triac. Foi realizada a comparação entre dois métodos de controle de velocidade: manual e automático. Verificou-se redução de 63 % no consumo de energia elétrica quando foi utilizado o método automático.

Palavras-chave: inversor de frequência, secagem, sistemas de controle.

CONTROL OF TEMPERATURE AND VELOCITY OF DRYING AIR IN A MEDICINAL PLANT DRYER

ABSTRACT

This study reports installation of a system to control temperature and velocity of the air in a medicinal plant dryer using a PIC16F877A microcontroller. The air velocity was monitored by an anemometer and controlled by a frequency inverter. The temperature was measured by LM35 sensor and controlled with a TRIAC. The microcontroller performed actions of PID that determines the pulse of a PWM signal, which turns on the frequency inverter and also the TRIAC. The comparison between the manual and automated controls showed that automatic method reduced energy consumption by 63 %.

Keywords: control systems, frequency inverter, drying

Recebido para publicação em 28/08/2009. Aprovado em 09/06/2010

1- Engenheiro Eletricista, Mestre em Engenharia Agrícola, UFV, mauroprates@yahoo.com.br

2- Engenheiro Eletricista, Prof. Adjunto, Departamento de Engenharia Elétrica, UFV, pizzio@ufv.br

3- Engenheiro Agrícola, Prof. Associado, Departamento de Engenharia Agrícola, UFV, evandro@ufv.br

4- Engenheiro- Agrônomo, Doutorando em Engenharia Agrícola, UFV, ronyrocha@yahoo.com.br

5- Engenheiro Eletricista, Mestrando em Engenharia Agrícola, UFV, jvnicacio@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Na secagem de plantas medicinais, os limites da temperatura do ar de secagem são determinados em função da sensibilidade dos princípios ativos da planta medicinal (MARTINAZZO, 2006). Outro fator importante na secagem e que exerce influência nas propriedades químicas de plantas medicinais, submetidas à secagem, é a velocidade do ar usada no processo. (MARTINS, 2000).

Além da temperatura e velocidade, uma das preocupações em um processo de secagem é a eficiência energética, produzida pelo secador. Segundo Weber (1998), citado por Santos (2007), dentre todos os processos que se aplicam à manipulação pós-colheita, conservação e armazenagem adequada de sementes, a secagem é o de maior consumo energético. Em trabalhos desenvolvidos por Barbosa (2006) e por Radünz (2006) utilizou-se um secador, cuja fonte de aquecimento foi o gás GLP e cujo controle de velocidade foi realizado apenas de forma manual, sem preocupação com o consumo energético. Costa (2010) realizou a automação de um sistema de secagem de milho em secador rotativo, cuja fonte de energia também foi o gás GLP e a vazão do ar foi obtida por meio da curva característica do ventilador comercial utilizado, produzindo um consumo de combustível de, aproximadamente, 50 %. Rodrigues (2008) utilizou um secador de leito fixo, com ventilador e resistências elétricas, para simular a secagem de abacaxi em fatias, sem realizar análise do consumo energético.

Considerando o alto consumo energético nos processos de secagem, torna importante a utilização de tecnologias que possibilitem a eficiência e racionalização no uso da energia, no processo de secagem e armazenamento de sementes, com o objetivo de se obter redução nos custos de produção, e com isso a competitividade no mercado.

Diante do exposto, objetivou-se, neste trabalho, o desenvolvimento de sistemas de controle automático de temperatura e velocidade do ar de secagem em um secador de plantas medicinais, visando a redução no consumo de energia elétrica.

MATERIAL E MÉTODOS

O secador utilizado para se aplicar o controle de temperatura e de velocidade do ar de secagem de plantas medicinais e aromáticas, mostrado na Figura 1, está instalado no Laboratório de Secagem de Plantas Medicinais, do Departamento de Engenharia Agrícola, da Universidade Federal de Viçosa. Conforme apresentado na Figura 1, o secador utilizado é composto por duto para entrada e recirculação do ar, ventilador acoplado a um motor elétrico de indução, trifásico, de 1 cv, resistências elétricas para aquecimento do ar, anemômetro de conchas e sensores de temperatura (RADÜNZ, 2004).

O sistema de aquecimento do ar é composto por três resistências elétricas de 5 kW de potência, cada. Duas dessas resistências foram ligadas em série e, a outra, diretamente à rede elétrica. A tensão de alimentação utilizada foi 220 V.

O anemômetro de conchas possui, em sua extremidade, um disco com oito orifícios, distribuídos regularmente, o qual gira dentro de um optoacoplador, que gera pulsos elétricos (ALBUQUERQUE, 2005). Este anemômetro foi aferido, utilizando-se o anemômetro comercial marca Instrutherm, modelo TAVR-650, utilizado na escala de 0,3 a 45,0 m s⁻¹ (Precisão: ± 3 % ; Resolução Básica: 0,1.).

Para o controle da velocidade do ar, foi utilizado o inversor de frequência SIEMENS G110, responsável pela variação de frequência e, conseqüentemente, da velocidade do motor de indução trifásico (RASHID, 1999). Utilizou-se, também, o microcontrolador PIC16F877A, do fabricante Microchip (SOUZA, 2007), no qual foi desenvolvido um programa computacional em linguagem C, na memória. Além deste, foi utilizado um potenciômetro, que varia a tensão contínua de entrada, no microcontrolador, na faixa de 0 a 5 V, e foi definido o intervalo desejado para a velocidade do ar de secagem. Para esse intervalo, optou-se pela faixa de velocidades entre 0 m s⁻¹ (equivalente a 0 V) e 2,5 m s⁻¹ (equivalente a 5 V). Esses valores de tensão são convertidos em sinais digitais, para cálculos internos no programa do microcontrolador.

De posse do valor lido pelo anemômetro e do setpoint de velocidade (valor pré-definido

e desejado em regime permanente durante a secagem), são realizadas ações de controle PID (Proporcional, Integral e Derivativa) para o cálculo da duração da largura de pulso do sinal PWM (Modulação por Largura de Pulso, Power Width Modulation), o qual determinará o valor eficaz da tensão a ser aplicada à entrada analógica do inversor de frequência. O sinal digital PWM gerado, o qual possui frequência de 20 kHz, foi filtrado por um filtro passa-baixas, com frequência de corte de 2,84 Hz. A Figura 2 apresenta o esquema utilizado para a conversão do sinal digital para analógico. Dessa forma, o sinal filtrado era convertido para um sinal analógico, v_o , de 0 a 10 V, apresentado na saída do circuito da Figura 2, o qual é enviado à entrada do inversor de frequência.

Para a aquisição dos dados de temperatura, foram utilizadas as saídas de dois sensores LM 35 de alta precisão, da National Semiconductor, colocados nas posições dos sensores 1 e 2, mostradas na Figura 1(b). Na saída desses sensores obtém-se um sinal de tensão com fator de escala de

10 mV para cada grau Celsius, o qual é enviado ao computador por meio de uma placa de aquisição de dados da Datapool Eletrônica. No computador, esses dados de temperatura são gravados em planilhas eletrônicas. Já os valores de velocidade eram mostrados no Display LCD, acoplado à saída do microcontrolador, de quatro em quatro segundos, e anotados manualmente.

O controle da temperatura também foi realizado por intermédio da utilização do microcontrolador PIC, o qual recebia o sinal de tensão, enviado pelo sensor de temperatura. Foi utilizado outro potenciômetro para ajuste de setpoint da temperatura, que também varia a tensão na faixa de 0 a 5 V, o qual foi convertido para a faixa de variação de 0 a 100 °C, dentro do microcontrolador.

Em função de o processo de variação de temperatura, provocada pelo aquecimento das resistências, possuir constante de tempo elevada, decorrente da inércia térmica, foi necessária apenas a utilização do controle proporcional, que reduzia o tempo necessário para o sistema atingir o valor de

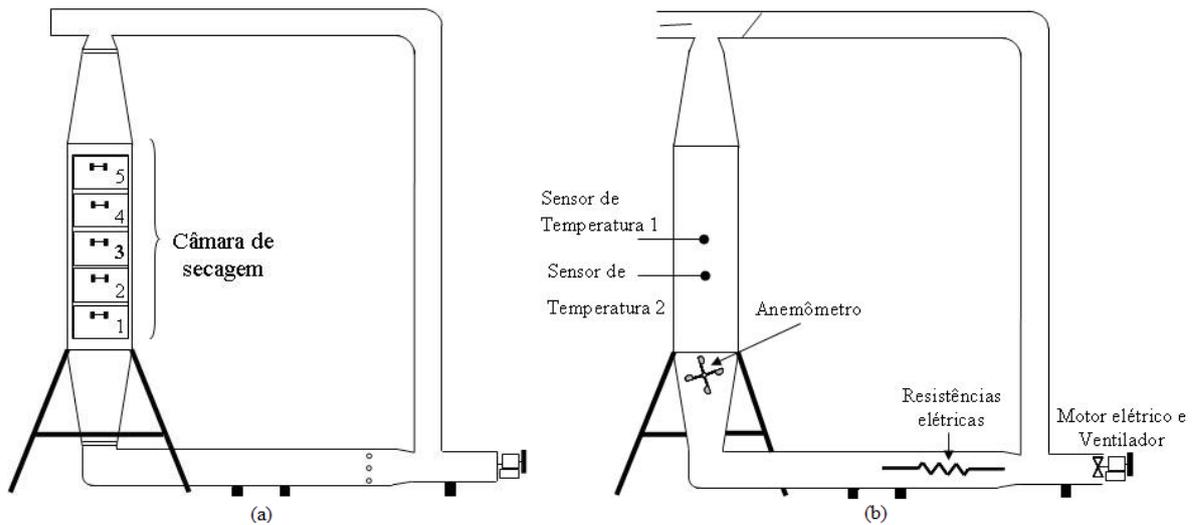


Figura 1. Vista frontal (a) e corte frontal (b) do Secador.

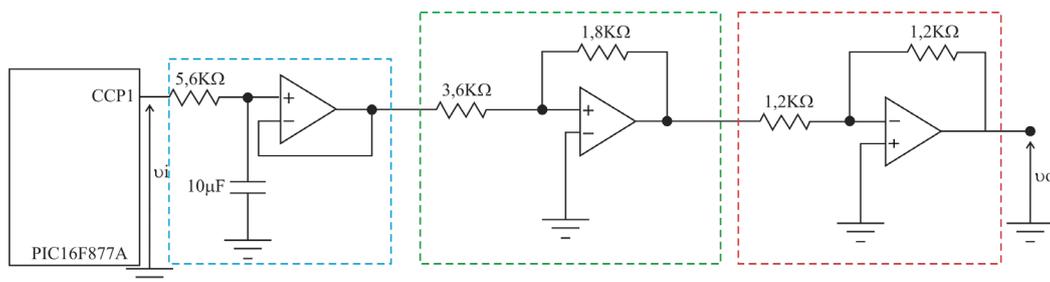


Figura 2. Conversão do sinal PWM para sinal analógico.

setpoint (tempo de subida), à medida que aumentava o valor da constante proporcional (OGATA, 2003). Por meio do controle proporcional, eram gerados outros pulsos PWM, de 1 Hz de frequência, os quais eram enviados ao optoacoplador MOC 3020M, que possui em seu circuito interno um LED (diodo emissor de luz, Light Emitting Diode). Toda vez que o sinal PWM atinge nível alto, esse LED emite luz, sensibilizando o triac (entre os pinos 4 e 6), que entra em condução, disparando o Triac BTA 41, de maior potência, que liga as resistências elétricas. Na figura 3 apresenta-se o circuito elétrico, utilizado para o acionamento das resistências elétricas (MOHAN, 1995).

Por meio de testes preliminares, percebeu-

se que a velocidade influenciava no controle de temperatura do ar de secagem. Dessa forma, a estratégia de controle necessária ao controle adequado do sistema foi elaborada segundo o diagrama de blocos, apresentado na Figura 4.

Conforme apresentado na Figura 4, nota-se que a velocidade é medida pelo sensor anemômetro, cujo sinal é convertido em pulsos elétricos por intermédio de um optoacoplador. O microcontrolador lê o valor desejado e o compara com o medido, atuando, então, no inversor de frequência, que controla a rotação do motor de indução trifásico. Dessa forma, a velocidade do ar de secagem é ajustada ao valor de setpoint.

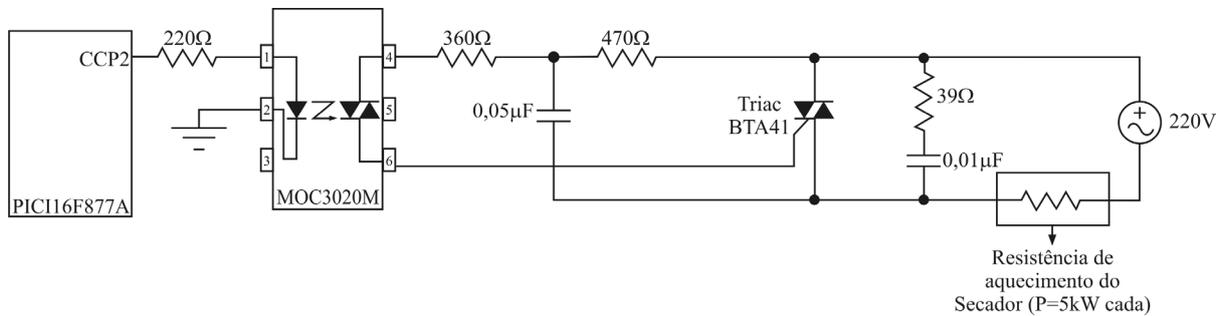


Figura 3. Circuito de disparo das resistências de aquecimento do secador.

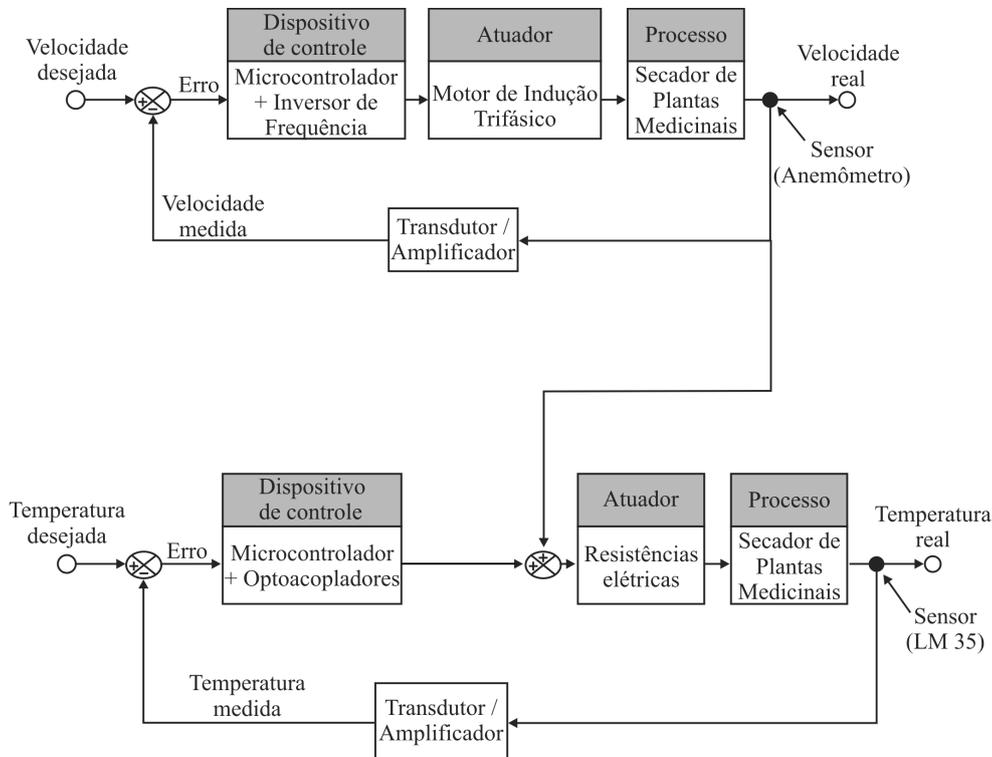


Figura 4. Diagrama de blocos para o sistema de controle de velocidade e temperatura do ar de secagem.

A temperatura é medida pelo sensor LM35, que converte o valor em um sinal elétrico contínuo. O microcontrolador lê o valor desejado e o compara com o medido, atuando nos optoacopladores, que ligam as resistências elétricas, as quais ajustam a temperatura do ar de secagem ao valor de setpoint.

Após testes preliminares, anteriormente mencionados, e antes dos ensaios de secagem com plantas, foram realizados ensaios em vazio, a fim de verificar se o sistema estava agindo conforme o esperado. Dessa forma, procurou-se avaliar o sistema para diferentes valores de setpoint para a temperatura e a velocidade do ar dentro do secador. Durante esses testes foram registradas a energia consumida no processo, a temperatura ambiente e a frequência do inversor de frequência. As temperaturas definidas para os ensaios a vazio foram 40, 60 e 80 °C, enquanto as velocidades foram de 1,0 m s⁻¹ e 1,5 m s⁻¹. Com as curvas de temperatura encontradas, calculou-se o máximo sobressinal (M_p), definido como o máximo valor de pico da curva de resposta em relação ao valor desejado em regime permanente (OGATA, 2003).

Após verificar que o sistema de controle estava adequado, com os ensaios em vazio, foi realizada a secagem da planta Capim-limão (*Cymbopogon citratus* (D.C.) Stapf), planta medicinal que é amplamente conhecida e utilizada em diversos

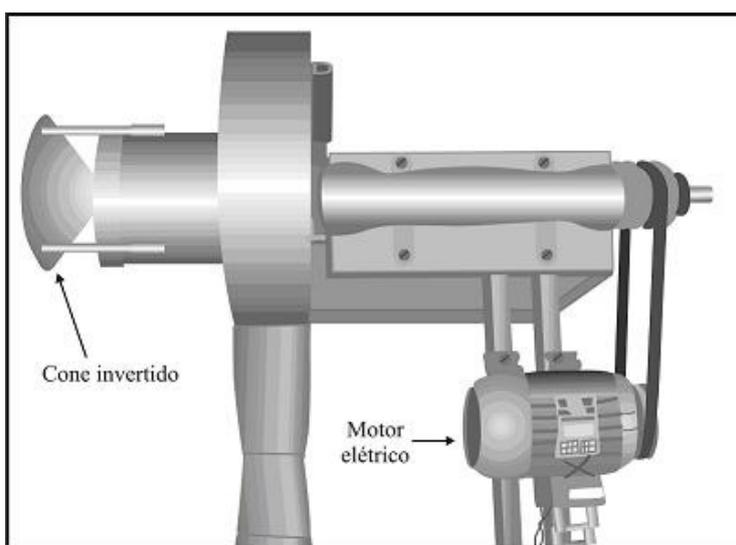
países e tem seu uso e aplicação nas indústrias farmacêuticas, alimentícias, cosméticas e de perfumaria (MARTINAZZO, 2006).

Foram utilizadas plantas provenientes de uma plantação do campus da UFV, cujas folhas foram selecionadas, retirando-se as plantas doentes, assim como qualquer parte de outro vegetal ou material estranho. Logo depois, o produto foi homogeneizado.

Segundo Martinazzo (2006), as folhas, no comprimento de corte de 2 a 5 cm, submetidas à secagem, resultaram em maior rendimento de óleo essencial, em comparação com as folhas secas no tamanho de 20 a 30 cm. Dessa forma, optou-se, neste trabalho, pelas folhas cortadas com comprimento de 2 cm. Após o corte, a planta foi colocada em embalagens, que foram vedadas e armazenadas em câmaras frias, a 5 ± 1 °C.

A determinação do teor inicial de água foi realizada segundo a metodologia recomendada por Martinazzo (2006). Foram utilizadas 25 g de produto, em três repetições, em estufa com circulação forçada de ar, a 103 ± 2 °C, durante 24 horas.

O experimento de secagem foi realizado com temperatura do ar de secagem igual a 50 °C, recomendada por Martinazzo (2006). No entanto, foram avaliadas três velocidades do ar de secagem: 0,8 m s⁻¹, 1,3 m s⁻¹ e 1,8 m s⁻¹.



(a)



(b)

Figura 5. Cone Invertido para controle manual (a) e Inversor de Frequência para controle automático (b) da velocidade do ar.

Com o intuito de manter a temperatura constante em 50 °C, foi utilizado o sistema de controle de temperatura projetado e descrito neste trabalho. O controle de velocidade do ar de secagem foi feito por meio de dois mecanismos:

- Utilizando-se o controle manual, em que o operador atuava na abertura de um cone invertido, acoplado ao duto de entrada de ar do ventilador, mantendo o motor na velocidade e frequência nominais, conforme apresentado na Figura 5(a).
- Utilizando-se o controle automático, também projetado neste trabalho, em que a velocidade do motor é ajustada por meio do inversor de frequência Siemens G110, conforme mostrado na Figura 5 (b).

Durante a secagem, a bandeja foi carregada com 250,0 g do produto, perfazendo uma camada de 5 cm de espessura na gaveta, e realizadas três repetições para cada uma das três velocidades, variando também o mecanismo de controle de velocidade. As pesagens foram feitas em balança semianalítica digital de precisão. A secagem foi interrompida quando, na bandeja, o produto alcançava teor final de água igual a 0,11 b.s.

Com o intuito de verificar a diferença de consumo de energia elétrica devida à utilização do controle automático em relação ao manual,

foi utilizado um medidor de energia trifásico na entrada do sistema, medindo o consumo total do processo, ou seja, o consumo das resistências elétricas e do motor de indução. Para a medição de consumo somente do motor de indução, foram medidas, por meio do método dos três wattímetros, a potência média do motor em cada ensaio. E, como o tempo total de secagem era cronometrado, foi possível estimar o consumo de energia elétrica do motor (MEDEIROS FILHO, 1983).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O comportamento do sistema, para o ensaio com o secador em vazio (sem nenhuma planta nas bandejas), e durante a secagem com a planta medicinal citada, é abordado nesta seção. Na Figura 6 mostra-se o comportamento do sistema para o setpoint de temperatura de 40 °C e de velocidade de 1,0 m s⁻¹ no ensaio em vazio do secador. Durante a aquisição desses dados, a temperatura média ambiente foi igual 26,7 °C. A primeira vez em que o sistema atingiu o set point de temperatura (40 °C), também chamado de tempo de subida (tempo requerido para que a resposta passe de 0 a 100 % do valor final (OGATA, 2003), ocorreu aos 800 segundos, com uma energia consumida de 0,1 kWh. Percebe-se uma variação de cerca de 5 °C até os 2000 segundos e após uma oscilação de, aproximadamente, 2 °C do setpoint estabelecido.

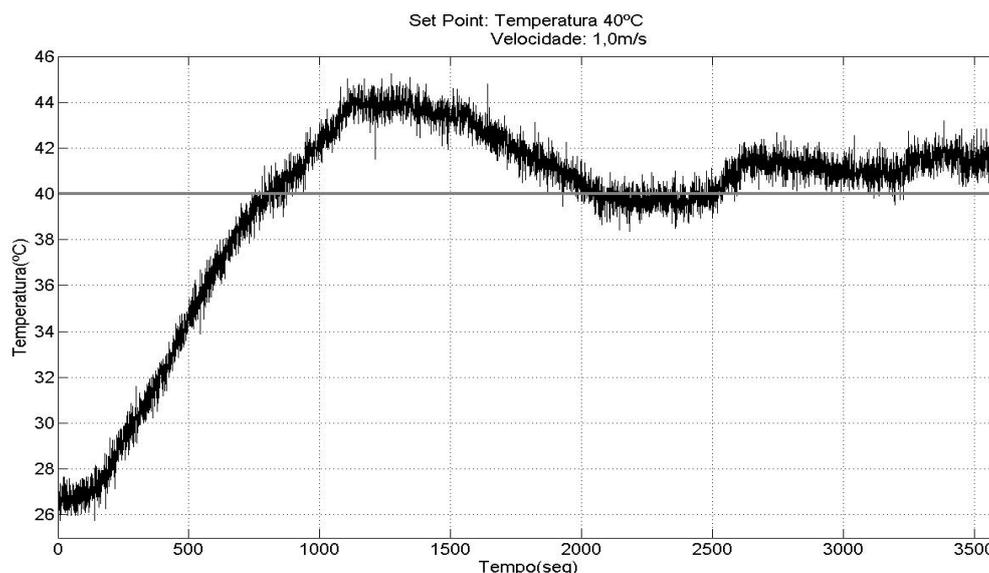


Figura 6. Ensaio em Vazio para set point de 40 °C e 1,0 m s⁻¹

O máximo sobressinal (M_p) para este caso pode ser calculado de acordo com o que está apresentado na Figura 6, utilizando-se a seguinte relação:

$$M_p = \frac{45,1 - 40}{40} \times 100 = 12,75\% \quad (1)$$

Durante o ensaio cujos resultados estão apresentados na Figura 6, observou-se, no display ligado à saída do PIC, que a velocidade do ar entrou em regime permanente, em, aproximadamente, 90 segundos, quando a frequência do inversor estabilizou-se em 27 Hz.

As demais observações para os ensaios em vazio são resumidas e mostradas no Quadro 1.

Nota-se, no Quadro 1, que existe grande influência da velocidade do ar no controle da temperatura, ou seja, pode-se dizer que a velocidade atua como uma fonte de distúrbio para o sistema de controle de temperatura. Outro fator que, também, pode ser considerado um distúrbio é a temperatura ambiente, pois a temperatura interna inicial do ar de secagem altera-se de acordo com seu valor. Percebe-se, também, que o sistema possui tempo de subida muito elevado.

É possível observar, ainda, que o máximo sobressinal é maior em velocidades mais baixas,

em sistemas com a mesma temperatura. Isso ocorre por causa da inércia do sistema para o resfriamento das resistências elétricas.

Nota-se, ainda, aumento no consumo de energia elétrica em sistemas com a mesma temperatura e maior velocidade do ar, o que confirma a influência da velocidade do ar, já que as resistências têm que ficar ligadas por mais tempo, ou seja, a largura do pulso PWM deve ser maior.

Já nos ensaios de secagem, foram registrados os valores da massa do produto, o consumo de energia elétrica, a temperatura e a velocidade do ar de secagem. No Quadro 2 apresentam-se teores inicial e final de água, adquiridos durante a secagem, utilizando-se o controle manual de velocidade, além dos valores médios da temperatura do ar e do tempo total de secagem, com os respectivos desvios padrão para os tratamentos de secagem, com as velocidades de $0,8 \text{ m s}^{-1}$, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e $1,8 \text{ m s}^{-1}$. É importante ressaltar que a velocidade descrita no Quadro 2 é a velocidade inicial do processo de secagem. Pôde-se observar que houve, durante a secagem, aumento da velocidade, à medida que o teor de água da planta diminuía, conforme pode ser visto na Figura 7, em que foram registrados os dados de velocidade antes de cada pesagem. Isto ocorre de acordo com a redução do volume

Quadro 1. Resumo dos dados para os ensaios em vazio

Temp.(°C)	Velocidade (m s ⁻¹)	Tempo de subida (s)	Temp. Ambiente (°C)	Frequência (Hz)	Energia (kWh)	Máximo sobressinal (%)
40	1,0	800	26,7	27	0,1	12,75
40	1,5	900	29,7	38	0,2	7,00
60	1,0	900	32,1	27	0,4	8,67
60	1,5	1200	28,1	38	0,7	7,00
80	1,0	850	32,4	27	0,8	9,25
80	1,5	950	31,1	38	1,1	5,62

Quadro 2. Média das variáveis avaliadas durante a secagem de capim-limão, utilizando-se o controle manual de velocidade do ar

Velocidade do ar de secagem (m s ⁻¹)	Teor inicial de água (decimal, b.s.)	Teor final de água (decimal, b.s.)	Tempo de secagem (min)	Temperatura (°C)
0,8	3,12 ± 0,31	0,13 ± 0,01	220 ± 20	50,3 ± 0,96
1,3	3,12 ± 0,31	0,11 ± 0,01	200 ± 10	49,9 ± 1,23
1,8	3,12 ± 0,31	0,12 ± 0,02	190 ± 10	50,2 ± 0,87

da massa do produto ao longo do processo, pela redução do teor de água.

Em relação à temperatura do ar de secagem, nota-se, na Figura 8, que, após ligá-lo, aguardava-se o sistema atingir 50 °C logo após seu sobressinal, para, então, colocar a planta no secador. Nesse momento, a temperatura média, que é a variável de controle, cai para 41 °C em 50 segundos, pois as folhas da planta, com alto teor de umidade, fazem uma barreira entre o sensor de temperatura abaixo da bandeja e o sensor acima dela, fazendo com que a temperatura média caia e que o sistema reaja automaticamente, até a temperatura média de 50 °C ser atingida novamente, em, aproximadamente, 15

minutos após o início da secagem.

Na Figura 8 mostra-se uma das repetições da secagem realizada, utilizando-se o sistema com o controle manual de velocidade, quando foi fixada em 1,3 m s⁻¹. Para esse caso específico, a média e o desvio padrão da temperatura durante a secagem foram de 49,9 ± 1,23 °C. Esse valor elevado do desvio padrão é devido justamente ao decréscimo brusco na temperatura, no início da secagem. O comportamento da temperatura em todas as repetições seguiu a mesma tendência apresentada na Figura 8.

Conforme esperado, o aumento da velocidade do ar de secagem aumentou a taxa de secagem

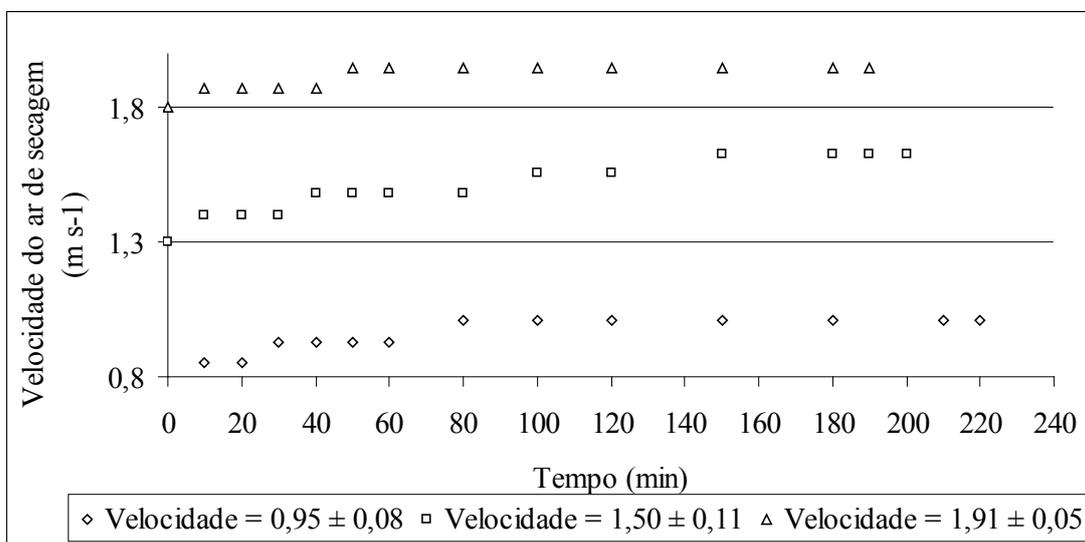


Figura 7. Variação da velocidade do ar durante a secagem com controle manual.

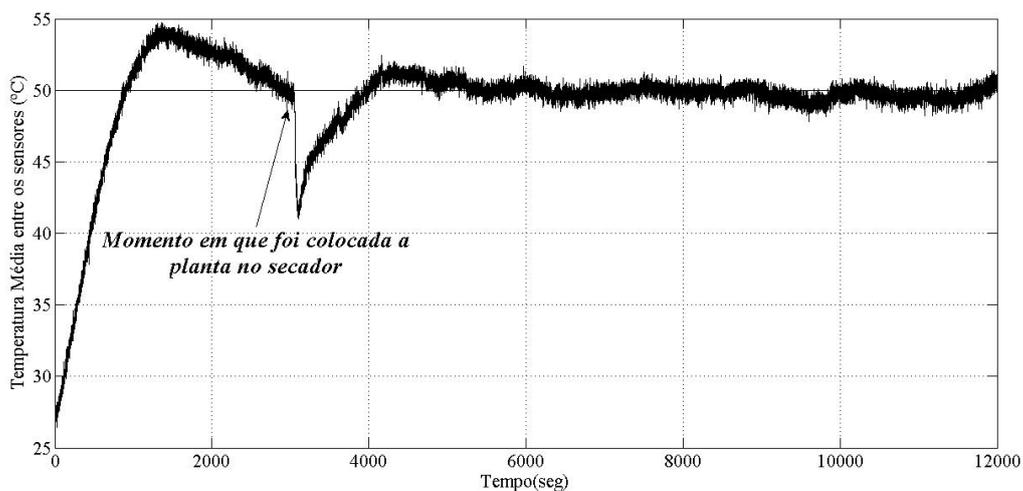


Figura 8. Variação da temperatura média do ar durante o processo de secagem, utilizando-se o método manual de controle da velocidade do ar de secagem

e, conseqüentemente, diminuiu o tempo total de secagem. No Quadro 3, pode-se notar a diferença relativa percentual entre os tempos de secagem para as três velocidades de secagem. Esse comportamento também foi observado por Martins (2000) que, secando a mesma espécie de planta, verificou que, a 50 °C, houve uma diferença relativa percentual de 3,8 %, no tempo de secagem, entre as velocidades de 0,5 m s⁻¹ a 1,0 m s⁻¹.

Os mesmos testes realizados para o controle manual foram repetidos, utilizando-se o controle automático da velocidade do ar de secagem. No Quadro 4, são apresentados as variáveis avaliadas durante essa etapa da secagem.

Quanto ao tempo de secagem médio, não houve variação em relação à secagem realizada com controle manual de velocidade. Para esse caso, a velocidade manteve-se constante durante todo o processo de secagem. Isso foi possível em razão do ajuste automático da frequência, aplicada ao motor quando o teor de água da planta diminuía, ou seja, à medida que eram abertos espaços entre as plantas, automaticamente a frequência do motor de indução trifásico era diminuída e a velocidade mantinha-se constante na bandeja de secagem.

O mesmo comportamento, verificado na variação inicial da temperatura média do ar, também ocorreu

durante a secagem com controle automático de velocidade do ar, conforme pode ser observado na Figura 9, para a velocidade do ar de secagem de 1,3 m s⁻¹. Para esse caso específico, a média e o desvio padrão da temperatura durante a secagem foram de 49,9 ± 0,92 °C. Esse valor elevado do desvio padrão é novamente decorrente do decréscimo brusco da temperatura, no início da secagem. A temperatura média caiu para 42,5 °C, em 35 segundos.

A escolha do momento em que a planta deveria ser colocada no secador foi feita após análises prévias. Percebeu-se que, mesmo esperando pelo sobressinal, ou por uma maior estabilização da temperatura, ao se colocar a planta a temperatura média sofria o mesmo decréscimo e o processo de reestabilização da temperatura demorava os mesmos 15 minutos. Assim, para evitar maior consumo de energia, decidiu-se por colocar a planta logo após o tempo de subida, tanto no método manual, quanto no método automático de controle da velocidade do ar. Dessa forma, a comparação entre estes dois métodos não foi afetada.

A variação do teor de água, em função do tempo de secagem, da planta, submetida a 50 °C e às mesmas três velocidades do ar de secagem, ocorreu durante o mesmo período de tempo do método de controle manual, apresentados no Quadro 2.

Quadro 3. Diferença Relativa Percentual entre os tempos de secagem para diferentes velocidades do ar

			Diferença Relativa
Velocidade (m s ⁻¹)	0,8	1,3	
Tempo (min)	220	200	9,09 %
Velocidade (m s ⁻¹)	0,8	1,8	
Tempo (min)	220	190	13,64 %
Velocidade (m s ⁻¹)	1,3	1,8	
Tempo (min)	200	190	5,00%

Quadro 4. Média dos parâmetros avaliados durante a secagem de capim-limão, utilizando-se o controle automático de velocidade do ar

Velocidade do ar de secagem (m s ⁻¹)	Teor inicial de água (decimal, b.s.)	Teor final de água (decimal, b.s.)	Tempo de secagem (min)	Temperatura (°C)
0,8	3,12 ± 0,31	0,11 ± 0,09	220 ± 20	50,4 ± 0,97
1,3	3,12 ± 0,31	0,11 ± 0,01	200 ± 10	49,9 ± 0,92
1,8	3,12 ± 0,31	0,12 ± 0,01	190 ± 10	50,4 ± 0,84

Em relação à análise da eficiência energética, a partir dos dados de consumo de energia elétrica do motor de indução foi possível perceber a real diferença percentual da energia consumida, em função da utilização do controle automático em relação ao controle manual. Isso ocorreu porque, no controle manual, a frequência no motor, a tensão e sua rotação são fixadas nos valores nominais do motor, que são entre 60 Hz, 220 V e 1710 rpm. Durante a secagem, com as velocidades de $0,8 \text{ m s}^{-1}$, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e $1,8 \text{ m s}^{-1}$, verificou-se que a frequência mostrada no inversor de frequência foi de aproximadamente 19, 23 e 28 Hz, respectivamente, o que certamente reduziu a rotação e a tensão no motor e, conseqüentemente, o seu consumo de energia.

Se esses mesmos motores estivessem em uma indústria, ligados oito horas diárias e 20 dias por mês, teríamos uma diferença de consumo mensal de 26,2 kWh, 22,7 kWh e 17,6 kWh para as velocidades de $0,8 \text{ m s}^{-1}$, $1,3 \text{ m s}^{-1}$ e $1,8 \text{ m s}^{-1}$, respectivamente.

Essas diferenças de consumo seriam suficientes para alimentar outro secador, com motor de mesma potência acionando o ventilador, ou para ligar o equivalente a oito lâmpadas fluorescentes de 40 W, durante quatro horas diárias. No entanto, é importante ressaltar que o motor utilizado neste experimento é um motor de laboratório, de pequeno porte (1 cv), enquanto em uma fábrica, haveria certamente, vários motores de maior potência, o que levaria a uma maior economia de energia, sendo que a diferença de consumo seria suficiente para alimentar aparelhos de maior potência e, até mesmo, todas as lâmpadas do escritório de uma indústria.

CONCLUSÕES

- O sistema de controle projetado mostrou-se adequado para controlar a temperatura e a velocidade do ar de secagem, durante todo o processo; e

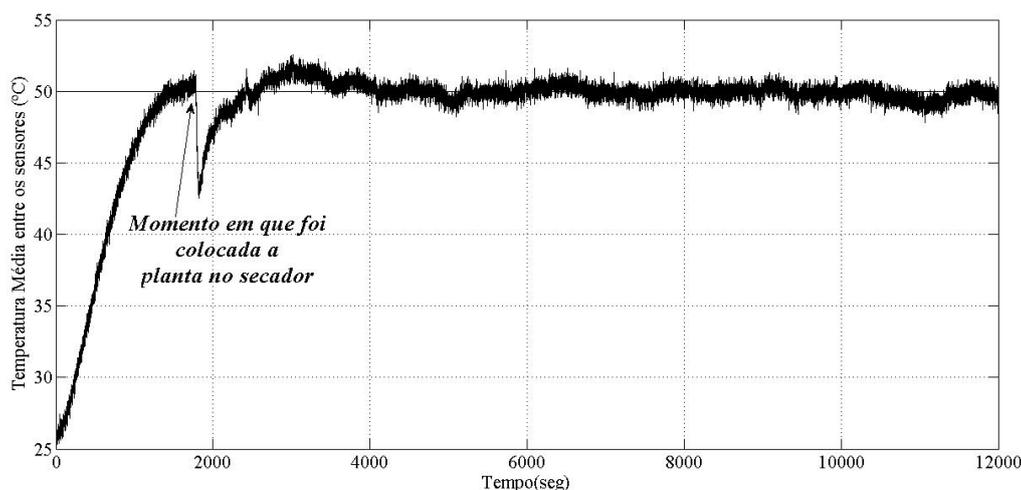


Figura 9. Variação da temperatura média do ar durante o processo de secagem com o método automático de controle da velocidade do ar de secagem.

Quadro 5. Diferença relativa no consumo de energia elétrica do motor de indução trifásico, utilizando o controle automático e o manual de velocidade

Velocidade (m s ⁻¹)	Tempo de secagem (h)	Potência Média (W)		Consumo (kWh)		Diferença Relativa Percentual
		Controle Automático	Controle Manual	Controle Automático	Controle Manual	
0,8	3,67	96,0	260,0	0,3520	0,9533	63,08%
1,3	3,33	118,0	260,0	0,3933	0,8667	54,62%
1,8	3,17	150,0	260,0	0,4750	0,8233	42,31%

- A utilização do controle automático de velocidade do ar de secagem, durante o processo, implicou significativa economia de energia no motor elétrico, na ordem de 42, 54 e 63 %, para as velocidades de 1,8, 1,3 e 0,8 m s⁻¹, respectivamente.

AGRADECIMENTOS

Sinceros agradecimentos ao CNPq, à CAPES e à FAPEMIG, pelo o suporte financeiro essencial para o desenvolvimento deste estudo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBUQUERQUE, P.U.B. **Sensores industriais: fundamentos e aplicações**. 1. ed. São Paulo: Editora Érica, 2005. p.114-200, 2008.

BARBOSA, F.F.; BARSOSA, L.C.A.; MELO, E.C.; BOTELHO, F.M.; SANTOS, R.H.S. Influência da temperatura do ar de secagem sobre o teor e a composição química do óleo essencial de *lippia alba* (mill) n. e. brown. **Quim. Nova**, São Paulo, v.29, n.6, p.1221-1225, 2006

COSTA, D.R.; LACERDA FILHO, A.F; SOUSA E SILVA, J.; QUEIROZ, D.M. Análise energética de um sistema de secagem de milho em secador rotativo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.8, v.2, p.151-164, 2010.

MARTINAZZO, A.P. **Secagem, armazenamento e qualidade de folhas de cymbopogon citratus (D.C.) Stapf**. 2006, 156f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2006.

MARTINS, P.M. **Influência da temperatura e da velocidade do ar de secagem no teor e na composição química do óleo essencial de capim-limão (cymbopogon citratus (D. C.) Stapf)**. 2000, 77f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2000.

MEDEIROS FILHO, S. **Medição de energia elétrica**. 3. ed. – Editora Guanabara, Rio de

Janeiro, p.283-315, 1983.

MICROCHIP. **Data sheet PIC 16F877A**, 2003. <Disponível em: www.microchip.com; Acesso em; 03 fev. 2009.

MOHAN, N., UNDELAND, T. M., ROBINS, W.P. 2nd ed. **Power electronics – converters, applications and design**. Danvers, MA, USA: John Wiley & Sons, Inc., p. 38-101,1995.

OGATA, K. **Engenharia de controle moderno**. 4. ed. – São Paulo: Prentice Hall, p. 30-80, 2003.

RADÜNZ, L.L. **Efeito da temperatura do ar de secagem no teor e na composição dos óleos essenciais de guaco (Mikania glomerata Sprengel) e hortelã-comum (Menta x villosa Huds)**, 2004, 90f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG. 2004.

RADÜNZ, L.L.; MELO, E.C.; BARBOSA, L.C.A.; BARBOSA, F.F. Efeito da temperatura do ar de secagem na do óleo essencial de hortelã-comum (menta x villosa huds). **Revista Brasileira de Armazenamento**, Viçosa, MG, v.31, n.1, p.52-58, 2006.

RASHID, M.H. **Eletrônica de potência: circuitos, dispositivos e aplicações**. São Paulo: Makron Books, p. 21-53, 1999.

RODRIGUES, E.; SILVA, J.N.; SOUZA, C.M.A.; LACERDA FILHO, A.F.; CHAVES, M.A. Simulação da secagem de abacaxi em fatias em secador de leito fixo. **Engenharia na Agricultura**, Viçosa, MG, v.16, n.4, p. 381-193, 2008.

SANTOS, M.A. **Qualidade de sementes de trigo secas sob utilização de energia elétrica e associada a gás liquefeito de petróleo**. 2007. 120f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Cascavel, PR, 2007.

SOUZA, D.J. **Desbravando o PIC: ampliado e atualizado para PIC 16F628A**. 11. ed. São Paulo: Editora Érica, p.11-90, 2007.