

Modelagem e desenvolvimento de um simulador para aquecedores elétricos de ar

Mônica Ronobo Coutinho¹, Edilson Sadayuki Omoto², Ubyratan Gobbi Oliveira², Cid Marcos Gonçalves Andrade² e Luiz Mário de Matos Jorge^{2*}

¹Departamento de Engenharia de Alimentos, Universidade Estadual do Centro-Oeste. R. Simeão Camargo Varela de Sá, 03, C.P. 3010, 85040-080, Guarapuava, Paraná, Brasil. ²Departamento de Engenharia Química, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil. *Author for correspondence: e-mail: lmmj@deq.uem.br

RESUMO. Desenvolveu-se um modelo matemático que correlaciona a voltagem (V) aplicada ao aquecedor elétrico com a vazão (\dot{m}), temperatura do ar na entrada (T_e) e a temperatura do ar desejada na saída (T_s), a partir de um balanço de energia no aquecedor, contemplando possíveis perdas de calor por convecção natural. O modelo apresenta dois parâmetros: a resistência elétrica (R) e o coeficiente de transferência de calor por convecção natural (h). A partir deste modelo, foi desenvolvido um simulador com interface amigável que contempla duas situações distintas: perdas significativas de calor pela parede do aquecedor (modelo completo, $h \neq 0$) e perdas desprezíveis (modelo simplificado, $h = 0$). Pôde-se verificar que para o sistema ora estudado, o modelo completo representou adequadamente o comportamento do aquecedor em toda faixa de condições operacionais sem a necessidade de ajuste de nenhum parâmetro, indicando que as perdas de calor por convecção natural são significativas.

Palavras-chave: aquecedor elétrico, modelagem, simulador, convecção natural.

ABSTRACT. Modeling and development of an electrical air heater simulator. A mathematical model was developed which correlates the voltage (V) applied to the electric heater in function of the flow rate (\dot{m}), the air temperature at the entrance (T_e) and the desired air temperature at the exit (T_s) from an energy balance in the heater, taking into account possible heat dissipations due to natural convection. The model has two parameters: the electric resistance (R) and the heat transfer coefficient for natural convection (h). From this model, a user-friendly simulator was developed that contemplates two distinct situations: significant heat dissipations through the wall of the heater (complete model, $h \neq 0$) and insignificant ones (simplified model, $h = 0$). It was verified that the complete model represented heater behavior in the range of operational conditions experimented without any parameters adjustment, indicating that the heat dissipations by natural convection are significant.

Key words: electric heater, modeling, simulator, natural convection.

Introdução

A secagem de grãos é uma operação industrial muito importante, apresentando alto custo energético e restrições quanto à temperatura de secagem, devido à possibilidade de degradação dos nutrientes ou inviabilização da germinação quando destina-se à secagem de sementes.

Em unidades de pequena escala, o aquecimento do ar pode ser efetuado por meio de aquecedores elétricos. Nestes dispositivos, torna-se imprescindível conhecer a relação entre a tensão aplicada a diferentes vazões de ar, com a temperatura em que se deseja admitir o ar quente no secador. Esta relação

pode ser obtida de forma adequada a partir do desenvolvimento de um modelo matemático do secador validado experimentalmente.

Por sua vez, a simulação deste modelo em condições variadas pode ser facilitada pelo uso de um simulador de interface amigável, no qual o usuário defina iterativamente as condições específicas em que deseja efetuar a simulação.

Neste contexto, a proposta deste trabalho é apresentar um modelo matemático de aquecedores elétricos, validá-lo frente aos dados experimentais obtidos em um aquecedor elétrico utilizado em um secador de leito fixo em escala de bancada e

desenvolver um simulador de interface amigável genérico.

Material e métodos

Aparato experimental

O equipamento utilizado neste trabalho encontra-se ilustrado na Figura 1. A instalação é composta basicamente por um soprador, um aquecedor elétrico de 11 Ω , um regulador de tensão (VARIAC), um secador de leito fixo de 6 cm de diâmetro interno, sem recheio algum, e um anemômetro de ventoinha de 6 cm de diâmetro interno (OMEGA, modelo HH-F10).

O ar proveniente do meio ambiente é captado pelo soprador e direcionado ao aquecedor elétrico, recebendo calor de acordo com a voltagem ajustada no regulador de tensão. Da saída do aquecedor o ar é encaminhado à entrada do secador, tendo sua temperatura medida por um termopar tipo K acoplado a um indicador de temperatura digital. No topo do secador pode-se acoplar o anemômetro de ventoinha para avaliar a velocidade deste.



Figura 1. Esquema do equipamento utilizado.

Procedimento experimental

Todos os ensaios foram efetuados segundo o procedimento experimental detalhado abaixo:

- 1) liga-se o soprador;
- 2) regula-se a vazão de ar manipulando-se as válvulas a jusante deste e variando-se a velocidade do ar (0,4 a 1,8 m/s) no anemômetro acoplado à saída do secador;
- 3) mede-se a temperatura ambiente;
- 4) fixa-se a tensão de 10 V e aguarda-se o sistema alcançar a condição de regime permanente;
- 5) após estabelecido o regime permanente, anota-se a temperatura do ar na saída do aquecedor;
- 6) repete-se o procedimento 3, 4 e 5 para as tensões de 15, 20, 25 e 30V;
- 7) fixa-se uma nova velocidade do ar na faixa de 0,4 a 1,8 m/s e repete-se os passos 3, 4, 5 e 6.

Modelagem matemática

O modelo matemático completo, equação 1, foi obtido a partir de um balanço de energia no aquecedor elétrico do secador, considerando perdas de calor por convecção natural pelas paredes do aquecedor, admitindo as seguintes hipóteses:

- parâmetros concentrados;
- resistências ôhmicas;
- temperaturas das paredes do aquecedor iguais à temperatura de saída do ar.

$$\frac{V^2}{R} = \dot{m}C_p\Delta T_1 + hA\Delta T_2 \quad (1)$$

Na qual:

$$\Delta T_1 = (T_s - T_e);$$

$$\Delta T_2 = (T_s - T_{amb}).$$

Na Equação (1) o primeiro termo (V^2/R) corresponde ao calor fornecido pelas resistências elétricas, o termo ($\dot{m}C_p\Delta T_1$) é o calor recebido pelo ar que está passando pelo aquecedor e o termo ($hA\Delta T_2$) é o calor perdido por convecção natural pelas paredes.

A influência das perdas de calor pela parede do aquecedor sobre a temperatura na saída do aquecedor pode ser avaliada admitindo-se $h = 0$ na equação 1, conduzindo a um novo modelo denominado modelo simplificado (Equação 2).

$$\frac{V^2}{R} = \dot{m}C_p\Delta T_1 \quad (2)$$

O modelo completo possui dois parâmetros: h e R , enquanto o modelo simplificado possui apenas um: R . Em ambos os modelos, as propriedades físicas do ar foram obtidas da literatura (Reid e Sherwood, 1966; Perry, 1984; Welty *et al.*, 1984; Holman, 1986).

O coeficiente de transferência de calor por convecção (h) foi calculado a partir da correlação proposta por Churchill e Chu (1975) para cilindros horizontais (Equação 3).

$$Nu_D = \left\{ 0,60 + \frac{0,387Ra_D^{1/6}}{\left[1 + (0,559/Pr)^{9/16}\right]^{8/27}} \right\}^2 \quad (3)$$

$$\text{Na qual: } Nu_D = \frac{hD}{K}; \quad Ra = \frac{\beta g D^3 \Delta T}{\alpha \nu}; \quad Pr = \frac{\nu}{\alpha}$$

Desenvolvimento do simulador

O simulador de interface amigável foi inteiramente desenvolvido em Delphi®, versão 6.0, apresentando janelas interativas com múltiplas opções. Dentre estas, possibilita ao usuário escolher se quer simular o modelo completo ($h \neq 0$) ou o simplificado ($h=0$), além de poder ser aplicado a qualquer aquecedor elétrico de geometria cilíndrica. O simulador recebeu o nome de AQUECEDOR.

Resultados e discussão

Na Figura 2 estão apresentados os resultados do modelo simplificado, desprezando as perdas de calor por convecção natural, e na Figura 3 os resultados considerando as perdas convectivas pelas paredes (modelo completo). Como mostra a Figura 3, a maior parte dos dados obtidos pela simulação está dentro da margem de erro de 15%, ao contrário do comportamento apresentado na Figura 2, revelando que para o aquecedor elétrico estudado as perdas de calor por convecção natural são significativas e devem ser contempladas nas simulações.

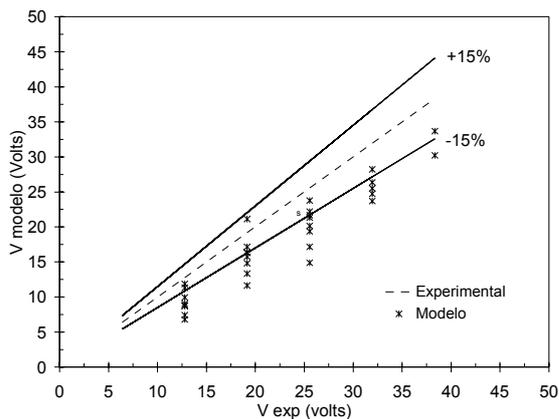


Figura 2. Qualidade do ajuste do modelo simplificado frente aos dados experimentais

Como mostra a Figura 4, a diferença entre os dois modelos é maior a baixas velocidades. Este comportamento pode ser explicado analisando a Equação (1). Para uma dada voltagem, temos uma geração de calor constante (V^2/R). Conforme aumenta-se a velocidade do ar também aumenta-se a vazão (\dot{m}). Logo, também aumenta o valor da parcela de calor convectiva ($\dot{m} C_p \Delta T_1$) em relação a parcela dissipativa ($hA\Delta T_2$), tornando-a menos significativa a altas vazões.

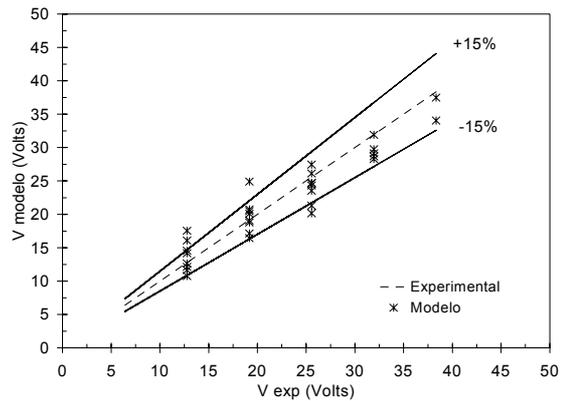


Figura 3. Qualidade do ajuste do modelo completo frente aos dados experimentais.

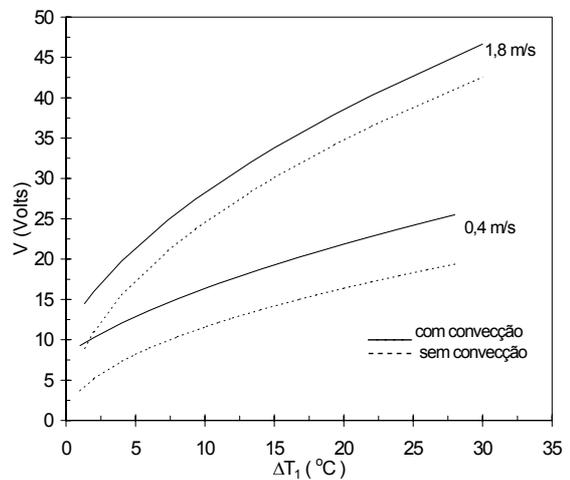


Figura 4. Comparação entre os modelos

Na Figura 5 foram apresentados os resultados das simulações do modelo completo, estimando-se a voltagem necessária para promover uma dada alteração na temperatura de alimentação (ΔT_1). A comparação destes resultados com dados experimentais revela que o modelo apresenta boa concordância com os dados experimentais, além de representar satisfatoriamente as principais tendências do aquecedor elétrico.

Nas Figuras 6, 7, 8 e 9 apresentam-se as janelas do simulador, desde o início até o final da simulação. Na Figura 6, o usuário pode optar por sistema adiabático ou não.

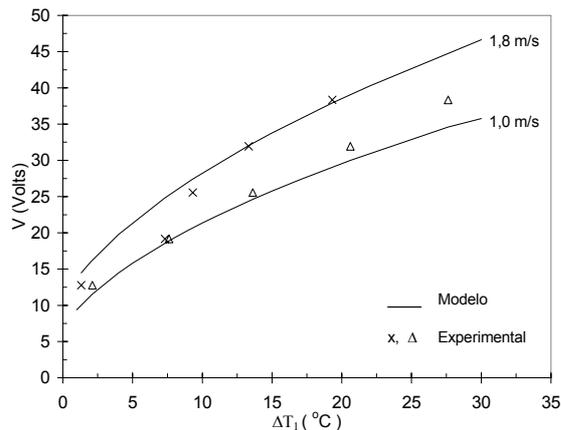


Figura 5. Simulações do modelo completo frente a dados experimentais.

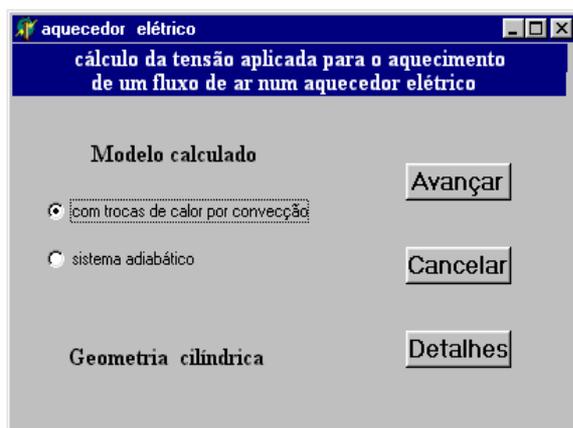


Figura 6. Início da simulação.

Na Figura 7, o usuário pode escolher quais serão os dados de entrada e o que deseja calcular, dentre quatro configurações possíveis.

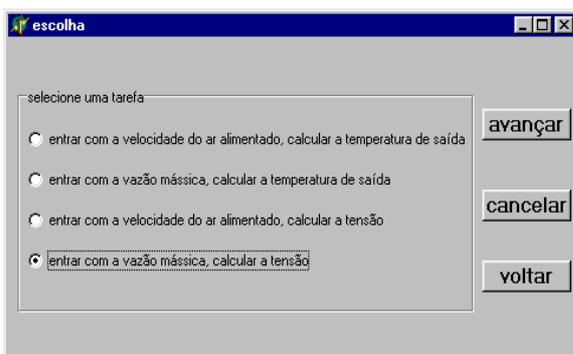


Figura 7. Seleção da tarefa.

Na Figura 8 são especificadas condições típicas de vazão mássica, temperatura de entrada e de saída do ar, área das paredes do aquecedor e o valor da resistência elétrica do aquecedor. Os resultados desta simulação são apresentados na Figura 9, indicando

que o coeficiente de transferência por convecção natural entre as paredes do aquecedor e o meio ambiente é $4,60 \text{ Wm}^{-2}\text{C}^{-1}$ e a voltagem necessária para que o ar saia do secador a $41,2^\circ\text{C}$, nas condições operacionais especificadas, é de 24,6 Volts, enquanto o valor experimental é de 25,6 Volts, observando-se um erro de 5%.

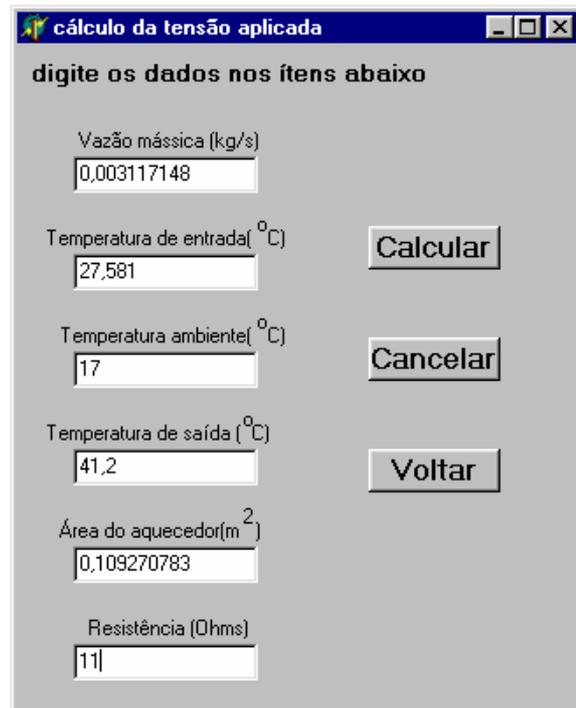


Figura 8. Condições operacionais.

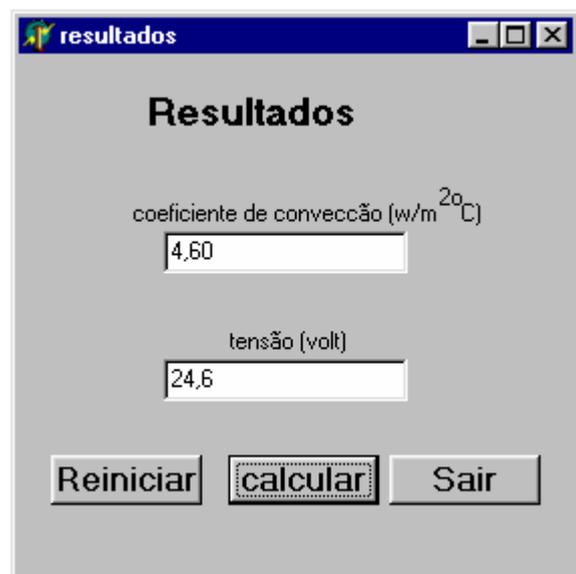


Figura 9. Resultados da simulação.

Conclusão

As perdas de calor por convecção natural pelas paredes são significativas em toda faixa de velocidade exercendo maior influencia a baixas vazões.

O modelo completo, contemplando as perdas de calor por convecção natural, pôde representar satisfatoriamente o comportamento do aquecedor elétrico.

A linguagem de programação Delphi ® (versão 6), revelou-se adequada para o desenvolvimento de um simulador genérico de aquecedores elétricos, denominado AQUECEDOR.

Num caso típico utilizado como ilustração, o uso do simulador apresentou um erro aproximado de 5% na voltagem estimada em relação à voltagem utilizada experimentalmente para elevar a temperatura de uma corrente de ar de $3,117 \times 10^{-3}$ kg/s a 17°C até a temperatura de $41,2^\circ\text{C}$ na saída do aquecedor.

Nomenclatura

A	área superficial do aquecedor	(m^2) ;
C_p	capacidade calorífica do ar	$(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$;
D	diâmetro do tubo	(m) ;
g	aceleração da gravidade	$(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$;
h	coeficiente convectivo de transferência de calor	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$;
K	condutividade térmica do fluido	$(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot ^\circ\text{C}^{-1})$;
\dot{m}	vazão mássica	$(\text{kg} \cdot \text{s}^{-1})$;
Nu	número de Nusselt	(adm);

Pr	número de Prandtl	(adm);
Ra	número de Rayleigh	(adm);
R	resistência elétrica	(Ω) ;
T_{amb}	temperatura ambiente	$(^\circ\text{C})$
T_e	temperatura do ar na entrada do aquecedor	$(^\circ\text{C})$;
T_s	temperatura do ar na saída do aquecedor	$(^\circ\text{C})$;
V	tensão	(V) ;
β	coeficiente de expansão térmica do fluido	(K^{-1}) ;
α	difusividade térmica	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$;
ν	viscosidade cinemática	$(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$.

Referências

- CHURCHILL, S. W.; CHU, H. H. S. Correlating equations for laminar and turbulent free convection from a horizontal cylinder. *Int. J. Heat Mass Transfer*, Kidlington, v. 18, p.1049, 1975.
- HOLMAN, J. P. *Heat transfer*. 6. ed. New York: McGraw Hill Book Company, 1986.
- PERRY, R. H. *Perry's Chemical Engineer's handbook*. 6. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1984.
- REID, R. C.; SHERWOOD, T. K. *The properties of gases and liquids: their estimation and correlation*. 2. ed. New York: McGraw-Hill Book Company, 1966.
- WELTY, J.R. *et al. Fundamentals of Momentum, Heat and Mass Transfer*. 3. ed. New York: John Wiley and Sons, 1984.
- Received on February 16, 2004.
Accepted on June 18, 2004.