

DETERMINAÇÃO DE UMA EXPRESSÃO PARA CÁLCULO DO CALOR LATENTE DE VAPORIZAÇÃO DE ÁGUA EM MILHO AMARELO

WILTON P. SILVA¹, MÁRIO E. R. M. CAVALCANTI MATA², MARIA E. M. DUARTE²,
ANTONIO G. B. LIMA³

¹ Eng. Eletricista, Doutorando em Engenharia de Processos, CCT/UFCG, Prof. Adjunto, DF, CCT, UFCG, Campina Grande, PB, Tel. 83 33332962, wiltonps@uol.com.br

² Eng. Agrícola, Prof. Doutor, DEAg, UFCG, Campina Grande, PB

³ Eng. Mecânico, Prof. Doutor, DEM, UFCG, Campina Grande, PB

**Escrito para apresentação no
XXXV Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola
31 de julho a 4 de agosto de 2006 – João Pessoa - PB**

RESUMO: Em cálculos da energia requerida em processos de secagem artificial de um produto agrícola, é necessário o conhecimento de uma expressão para a determinação do calor latente de vaporização H da água no produto. Normalmente, as expressões para H encontradas na literatura são dadas pelo calor latente de vaporização h da água livre multiplicado por funções que dependem do teor de água do produto. Neste trabalho, uma outra expressão para H é determinada para milho amarelo, por ajuste de curvas. Para tal, foi desenvolvido e utilizado um programa de computador que ajusta, de forma automática, cerca de 500 funções contidas em sua biblioteca, com uma e duas variáveis independentes, a dados experimentais. Testes estatísticos indicam que a expressão obtida produz resultados mais precisos que os de outras equações normalmente encontradas na literatura.

PALAVRAS-CHAVE: energia, produtos agrícolas, secagem

DETERMINATION OF EQUATION FOR CALCULATION OF THE LATENT HEAT OF VAPORIZATION OF MOISTURE IN YELLOW CORN

ABSTRACT: The knowledge of an expression for determination of latent heat of vaporization H of moisture of agricultural product is necessary for calculations of requested energy in artificial drying processes of this product. Usually, such expression is given as a function of the latent heat of vaporization h of free water multiplied by a function of the moisture content of the product. In this work an expression for H is determined for yellow corn, by curve fitting. In this sense, a computer program was developed and used, which fits automatically about 500 functions of one or two independent variables, stored in its library, to experimental data. Statistical tests indicate that the proposed expression gives best results than others found in the literature.

KEYWORDS: energy, agricultural products, drying

INTRODUÇÃO: Em estudos referentes à secagem artificial de um produto agrícola, a determinação da quantidade de energia requerida no processo depende, dentre vários fatores, do calor latente de vaporização H da água no produto. Como H em geral é significativamente diferente do calor latente de vaporização h da água livre, e dependente do produto investigado, pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de determinar expressões de H para vários produtos. BROOK e FOSTER (1981), citados por BROOKER et al. (1992), determinaram expressões de H para vários produtos, a partir de dados

experimentais. Tais expressões são usadas por pesquisadores em trabalhos sobre simulações de secagem de produtos agrícolas como, por exemplo, em CAVALVANTI MATA e DUARTE (2003). CORRÊA et al. (1998) modificaram a função geral proposta por BROOK e FOSTER (1981), e ajustaram a função modificada a dados obtidos para milho pipoca. KALEEMULLAH e KAILAPPAN (2005) determinaram uma expressão para H de pimenta vermelha a partir de dados isotérmicos obtidos para este produto. Neste sentido este trabalho visa a determinar uma outra expressão para o calor latente de vaporização de água em um produto e, para tal, serão usados dados disponíveis para milho amarelo. Visa, também, a comparar a expressão obtida com outras existentes na literatura.

MATERIAL E MÉTODOS: Para se obter uma expressão para a relação entre o calor latente de vaporização H da água em um produto e o calor latente de vaporização h da água livre, normalmente a equação de Clausius-Clapeyron (ver, por exemplo, BROOKER et al., 1992) é utilizada, com a suposição de que a equação de estado dos gases ideais possa ser aplicada ao vapor, considerando desprezível o volume de água na fase líquida. Assim, admitindo que H e h sejam constantes entre dois estados (2 e 1), a seguinte expressão para a determinação do calor latente pode ser usada (BROOKER et al., 1992):

$$\frac{H}{h} = \frac{\ln(\Phi_1 P_{vs1}) - \ln(\Phi_2 P_{vs2})}{\ln P_{vs1} - \ln P_{vs2}} \quad (1)$$

em que Φ é a umidade relativa do ar e P_{vs} é a pressão de vapor saturado de água livre. A umidade relativa do ar Φ é obtida pela Equação (2), devido ao fato desta equação apresentar os melhores indicadores de ajuste aos dados do teor de água de equilíbrio para milho amarelo. Tais dados foram disponibilizados por BROOKER et al. (1992) e, para o referido produto, a equação proposta é escrita do seguinte modo:

$$M = \frac{e^{-0,007061T}}{\ln(1,0945 - 0,0006520\Phi + 1/\Phi)} \quad (2)$$

em que T é a temperatura em °C, Φ é a umidade relativa do ar e M é o teor água de equilíbrio (base úmida), com todos os dados em valores percentuais. A pressão de vapor saturado é calculada através da equação de Riedel (ATHIÊ et al., 1998) cujos parâmetros foram obtidos por regressão não-linear aos dados disponibilizados por BROOKER et al. (1992). Assim, pode-se escrever:

$$P_{vs} = e^{[49,20 - 6643/(T + 273,15) - 4,522 \ln(T + 273,15)]} \quad (3)$$

em que P_{vs} é obtido em kPa quando T é dado em °C. O calor latente de vaporização de água livre é dado por (BROOKER et al., 1992)

$$h = 2503 - 2,386T \quad (4)$$

em que h é obtido em kJ/kg para a temperatura em °C. Por outro lado, para a relação H/h, BROOK e FOSTER (1981), citados por BROOKER et al. (1992), propuseram a equação:

$$\frac{H}{h} = 1 + Ae^{BM} \quad (5)$$

em que os parâmetros A e B são determinados por ajuste de curvas aos dados obtidos para o produto em estudo. O procedimento utilizado nesta investigação consiste em um esquema fatorial 5 x 4, sendo cinco níveis para o teor de água M (10, 15, 20, 25 e 30%) e quatro níveis para a temperatura T (20, 30, 40 e 50 °C). Para um dado teor de água M, numa especificada temperatura T, a umidade relativa do ar

Φ deve ser calculada através da Equação (2), em $T-2$ °C e em $T+2$ °C. Isto permite pressupor que H e h sejam constantes no intervalo de temperatura considerado. A pressão de vapor saturado deve ser calculada através da Equação (3) e isto possibilita calcular a relação H/h , através da Equação (1), para a matriz estipulada. Com isto, pode-se determinar H para cada M e T , uma vez que h pode ser calculado pela Equação (4). Assim, por ajuste de curvas, pode-se determinar os parâmetros A e B da Equação (5). Uma nova expressão para H deve ser determinada por ajuste de curvas. Para tal, foi desenvolvido um programa de computador, denominado Finder, que é uma ferramenta incorporada ao LAB Fit Curve Fitting Software (2006) e que ajusta, de forma automática, cerca de 500 funções compactas de uma e duas variáveis independentes contidas em sua biblioteca aos dados experimentais. Uma vez determinada a nova expressão para H , através do Finder, deve-se fazer uma comparação entre esta expressão e aquela obtida por ajuste da Equação (5). Tal comparação é realizada com base nos seguintes testes estatísticos: coeficiente de determinação, qui-quadrado reduzido e teste t de Student.

RESULTADOS E DISCUSSÃO: A metodologia estabelecida foi usada para a determinação da relação H/h para valores da temperatura e do teor de água previamente estipulados. Uma vez obtidos os valores de H/h , o calor latente de vaporização de água em milho amarelo pode ser obtido pela multiplicação de H/h por h , o que gera os dados contidos na Tabela 1.

Tabela 1 – Calor latente de vaporização H (kJ/kg) de água em milho amarelo

M (%)	T (°C)			
	20	30	40	50
10	2973	2935	2891	2844
15	2733	2696	2660	2624
20	2632	2602	2572	2542
25	2584	2556	2528	2501
30	2556	2529	2503	2476

Um ajuste da função proveniente da Equação (5) aos dados da Tabela 1 produz uma expressão com quatro parâmetros, embora só dois tenham sido determinados por regressão não-linear:

$$H = (2503 - 2,386T)(1 + 0,5268e^{-0,09845M}) \quad (6)$$

Com referência ao ajuste, são apresentados os seguintes resultados para os testes estatísticos realizados. Quanto ao qui-quadrado reduzido, cuja raiz quadrada, para o tipo de dados analisados, é igual ao desvio padrão associado ao ajuste, obteve-se o valor 649,893. Com relação ao coeficiente de determinação, que indica a proporção ou o percentual de variação explicada pela regressão, obteve-se o valor 0,974632. Para o teste t , que dá a probabilidade de um parâmetro ser zero, mesmo tendo o valor obtido, obteve-se $P(t) = 0$ para os dois parâmetros determinados, o que indica que eles são significativos. Detalhes sobre estes testes estatísticos podem ser obtidos, por exemplo, em BEVINGTON e ROBINSON (1992); TAYLOR (1997) e em SILVA e SILVA (1998). O Finder do LAB Fit foi usado na tentativa de se obter uma expressão mais adequada que aquela dada pela Equação (6). O programa computacional relacionou as melhores funções dentre as existentes em sua biblioteca, e a que melhor representa os dados da Tabela 1 é a seguinte:

$$H = 2508e^{(4,4961/M - 0,001045T)} - 8797/M \quad (7)$$

Com relação aos testes estatísticos referentes à regressão não-linear desta função, foram obtidos um coeficiente de determinação igual a 0,999528 e um qui-quadrado reduzido igual a 12,8962. Neste ajuste todos os parâmetros determinados são significativos porque, para todos eles, o teste t de Student aponta para $P(t) = 0$.

CONCLUSÕES: A Equação (7) é a expressão que melhor representa os dados obtidos para o calor latente de vaporização de milho amarelo, para uma faixa de temperatura de 20 a 50 °C, com um teor de água entre 10 e 30 %, em base úmida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ATHIÊ, I.; CASTRO, M. F. P. M.; GOMES, R. A. R.; VALENTINI, S. R. T. *Conservação de Grãos*. Campinas: Fundação Cargill, 236p, 1998

BEVINGTON, P. R.; ROBINSON, D. K., *Data Reduction and Error Analysis for the Physical Sciences*. Boston: WCB/McGraw-Hill, Second Edition, 328p, 1992

BROOK, R. C.; FOSTER, G. H. *Drying, cleaning and conditioning. In CRC Handbook of transportation, marketing and agriculture*, v.2. Boca Raton: CRC Press, 1981

BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; Hall, C. W. *Drying and storage of grains and oilseeds*. Westport: The AVI Publishing Company, 450p, 1992

CORRÊA, P. C.; CHRIST, D.; MARTINS, J. H.; MANTOVANI, B. H. M. Curvas de dessecção e calor latente de vaporização para as sementes de milho pipoca. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.2, n.1, p.75-79, 1998

CAVALCANTI MATA, M. E. R. M.; DUARTE, M. E. M. Drying simulation theory of the cowpea considering the grains shrinkage. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v.5, n.2, p.179-185, 2003

KALEEMUAH, S.; KAILAPPAN, R. Latent heat of vaporization of moisture from red chillies. *International Journal of Food Properties*, Oxfordshire, v.8, n.2, p.199-205, 2005

LAB Fit Curve Fitting Software (1999-2006) v.7.2.35. www.labfit.net 28/02/2006

SILVA, W. P.; SILVA, C. M. D. P. S. *Tratamento de dados experimentais*. 2.ed. João Pessoa: UFPB Editora Universitária, 197p, 1998

TAYLOR, J. R. *An introduction to error analysis*. 2.ed. Sausalito, California: University Science Books, 327p, 1997