

DETERMINAÇÃO DO EQUILÍBRIO HIGROSCÓPICO E DO CALOR ISOSTÉRICO DO BAGAÇO DE CANA-DE-AÇÚCAR

Doi: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4430-Eng.Agríc.v35n3p555-566/2015>

LUCIANA P. TEIXEIRA¹, EDNILTON T. DE ANDRADE², JÉSSICA Z. ESPÍNDOLA³,
ROBERTO G. PEREIRA⁴

RESUMO: Com o intuito de analisar a dinâmica de sorção e a energia necessária para a vaporização da água na desidratação do bagaço da cana-de-açúcar, o presente trabalho teve como objetivo a determinação de seu equilíbrio higroscópico e calor isostérico, a partir de diferentes condições controladas de temperatura (20; 40; 55 e 70 °C) e umidade relativa do ar (10; 12; 17; 18; 30; 40; 45; 50; 60 e 85%), assim como avaliar, entre diversos modelos descritos na literatura, o que melhor represente o comportamento de sorção. Como resultado, foi verificado que o modelo que melhor se ajustou aos dados empíricos do processo de sorção do bagaço de cana-de-açúcar foi o Modelo de Henderson Modificado, com coeficiente de determinação de 0,972, enquanto o calor isostérico integral de dessorção variou de 2524,09 a 2951,95 kJ kg⁻¹, para os teores de água de equilíbrio de 0,014 a 0,170 b.s., respectivamente.

PALAVRAS-CHAVE: bagaço de cana-de-açúcar; equilíbrio higroscópico; calor isostérico.

HYGROSCOPIC EQUILIBRIUM AND ISOSTERIC HEAT OF SUGARCANE BAGASS

ABSTRACT: This study aimed to determine the hygroscopic equilibrium and isosteric heat of sugarcane bagasse to evaluate sorption dynamics and the required energy to vaporize water in the bagasse dehydration. The reaction was assessed at different controlled conditions of temperature (20, 40, 55 and 70 °C) and air relative humidity (10, 12, 17, 18, 30, 40, 45, 50, 60 and 85%), as well as testing various models described in the literature to identify the condition that better represents sorption behavior. As a result, we found that the model that best fit empirical data of sugarcane bagasse sorption was the modified Henderson with determination coefficient of 0.972; while the integral isosteric heat of desorption ranged from 2,524.09 to 2,951.95 kJ kg⁻¹, for all water contents and equilibrium of 0.014 until 0.170 bs, respectively.

KEYWORDS: sugarcane bagasse; hygroscopic equilibrium; isosteric heat.

INTRODUÇÃO

Ao longo das últimas décadas, a cana-de-açúcar deixou de ser processada apenas para a produção de açúcar e álcool, passando, hoje, também a se apresentar como uma importante fonte de energia de biomassa através da queima de sua palha e, principalmente, do bagaço. Este processo, chamado de cogeração, consiste na produção simultânea de energia térmica e elétrica a partir do uso de biomassa (SANTOS et al., 2011).

O Brasil é o principal produtor de cana-de-açúcar do mundo (BARBOSA & GATTI JÚNIOR, 2012). Com o contínuo aumento da demanda desse produto, verifica-se, conseqüentemente, o aumento de sua importância na matriz energética brasileira, principalmente por esta se apresentar como uma fonte limpa e renovável de energia e por não gerar competição direta com a produção de alimentos, assegurando, dessa maneira, a segurança alimentar.

¹ Engº Agrícola, Doutoranda em Engenharia Mecânica, PGMEC, UFF/Niterói – RJ, Fone: (21) 97608-5930, lucianapteixeira@yahoo.com.br

² Engº Agrícola e Engº de Segurança do Trabalho, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia, UFLA/Lavras – MG, ednilton@deg.ufla.br

³ Engº Agrícola e Engº de Segurança do Trabalho, Mestre em Engenharia Civil, UFF/Niterói – RJ, jzespindola@gmail.com

⁴ Engº Mecânico, Prof. Doutor, Departamento de Engenharia Mecânica, UFF/Niterói – RJ, temrobe@vm.uff.br

Recebido pelo Conselho Editorial em: 04-7-2011

Aprovado pelo Conselho Editorial em: 15-10-2014

De acordo com AGEITEC (2014), a cada tonelada de cana-de-açúcar processada são produzidos cerca de 280 quilos de bagaço, ou seja, aproximadamente 28% do processamento da cana-de-açúcar correspondem apenas ao bagaço. Em razão disso, o bagaço de cana-de-açúcar apresenta condições quantitativas adequadas para ser utilizado como uma importante matéria-prima de base para a fabricação de aglomerados ou briquetes destinados à coprodução de energia elétrica no setor.

Para tanto, a fim de se analisar a eficiência e planejar a produção, necessidade e capacidade energética, faz-se útil o conhecimento das características caloríficas do bagaço de cana-de-açúcar, principalmente a respeito de seu calor isostérico.

Além da necessidade da utilização direta desse subproduto para a geração de energia, outro ponto que merece especial destaque é o armazenamento do bagaço produzido, de maneira a garantir a formação de estoques para períodos de entressafra (BRESSAN FILHO, 2011). Como nem todo o bagaço é queimado logo após o processamento da cana, sendo, na maioria das vezes, armazenado a céu aberto sem controle e pelo fato de o mesmo ser altamente suscetível ao processo de fermentação, faz-se necessário o conhecimento de seu comportamento perante diferentes condições de temperatura e umidade relativa, ou seja, a caracterização da higroscopicidade do bagaço de cana-de-açúcar. A partir do conhecimento dessa propriedade, há uma adequada condição para o planejamento quanto ao seu local e características de armazenamento e a viabilidade de tempo para tal ação, evitando-se, dessa maneira, as perdas, devido às alterações físicas, químicas e biológicas, ou referentes ao ataque de microrganismos. Para o caso do bagaço de cana, essas condições favorecem uma ampliação do tempo de armazenamento e seu melhor aproveitamento para a geração de energia.

Para a melhor determinação das condições ideais de armazenamento e para a verificação do comportamento do teor de água para diferentes condições, as isotermas ou curvas de equilíbrio higroscópico foram determinadas neste trabalho, através de modelos matemáticos tradicionais e disponíveis em literatura. Da mesma forma, com a determinação da curva isostérica de sorção e por meio dos modelos matemáticos analisados, também será possível verificar o quanto de energia é necessário fornecer ao sistema para a remoção de toda a água contida no produto até a sua posterior queima e transformação em energia, garantindo a otimização da produção, por meio do uso eficiente e controlado de energia.

Dessa maneira, este trabalho teve como objetivo analisar o equilíbrio higroscópico do bagaço da cana-de-açúcar para diferentes condições controladas de temperatura e umidade relativa do ar, assim como, a partir dos dados analisados, também, determinar seu calor isostérico.

MATERIAL E MÉTODOS

O presente trabalho foi desenvolvido na Universidade Federal Fluminense, Niterói – RJ, no Departamento de Engenharia Agrícola e Meio Ambiente, e para a realização dos testes e análises foram utilizados o Laboratório de Luminotécnica (LabLux), vinculado ao Departamento de Engenharia Elétrica, e Laboratório de Termociências (Latermo), pertencente ao Departamento de Engenharia Mecânica.

O material utilizado para o estudo foi o bagaço de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), da variedade RB 738795, procedente do município de Campos – RJ. As amostras foram picadas aleatoriamente até à obtenção de um material homogêneo e de pequena dimensão, e, posteriormente, submetidas ao processo de secagem com temperatura aproximada de 45 °C por 24 horas, sendo, em seguida, embaladas em recipientes herméticos e armazenadas em geladeira, ao longo de todo o trabalho. O teor de água das amostras de bagaço foi determinado a partir do método da estufa com temperatura de 105 ± 1 °C por 24 horas (INSTITUTO ADOLFO LUTZ, 2008).

Os testes de higroscopicidade foram realizados em câmara climática com controle de temperatura e umidade relativa do ar. Para cada teste de equilíbrio higroscópico, foram utilizadas

amostras que variavam entre 1 e 4 g de bagaço seco, colocadas em placas de “Petri” de 120 mm, de forma a garantir maior superfície de contato do material com o ambiente.

O equilíbrio higroscópico foi determinado por meio do método dinâmico. A aferição dos valores de umidade relativa e temperatura foi feita através de um termo-higrógrafo digital e dois termômetros (bulbo seco e bulbo úmido). As combinações de temperatura e umidade relativa dos experimentos foram obtidas a partir das condições de funcionamento da câmara, sendo utilizadas combinações entre dez umidades relativas do ar ambiente regulados de 10; 12; 17; 18; 30; 40; 45; 50; 60 e 85% e quatro temperaturas: 20; 40; 55 e 70°C. Para cada combinação, as amostras foram mantidas na câmara climática por 24 horas, quando, experimentalmente, foi verificada a obtenção do equilíbrio higroscópico.

Para a verificação e a quantificação dos fenômenos de sorção e dessorção, as amostras foram pesadas em balança analítica, com precisão de 3 casas decimais, antes e depois de serem, respectivamente, colocadas e retiradas da câmara, após entrarem em equilíbrio térmico com o ambiente, em condições herméticas, sendo utilizadas 4 repetições para cada combinação. Dessa maneira, foram verificados os diversos teores de água de equilíbrio para as várias combinações de temperatura e umidade relativa.

Os modelos matemáticos obtidos na literatura e representativos da higroscopicidade de produtos agrícolas, utilizados neste trabalho, foram escolhidos em função da avaliação da temperatura e umidade relativa do ambiente, para a verificação do que melhor se ajusta à realidade empírica do produto, de maneira a melhor representar sua isoterma (QIAOFANG et al., 2013; BABETTO et al., 2011; LI et al., 2011; ACHARJEE et al., 2011; LAM et al., 2012; BROOKER et al., 1992). Os modelos utilizados estão presentes na Tabela 1.

TABELA 1. Modelos utilizados para a verificação do comportamento da isoterma. **Models used to define the isotherm behavior and respective equations.**

Modelo	Equação	
Chung Pfost	$U_e = a - b \ln[-(T + c) \ln(a_w)]$	(1)
Copace	$U_e = \exp[a - (bT) + (ca_w)]$	(2)
GAB Modificado	$U^*e = \frac{ab(c/T)a^w}{\{[1 - ba^w][1 - ba^w + b(c/T)a^w]\}}$	(3)
Halsey Modificado	$U_e = [\exp(a - bT) / -\ln(a_w)]^{1/c}$	(4)
Henderson	$U_e = [\ln(1 - a_w) / (-aT_{abs})]^{1/c}$	(5)
Henderson Modificado	$U_e = \{\ln(1 - a_w) / [-a(T + b)]\}^{1/c}$	(6)
Oswin	$U_e = (a - bT) / [(1 - a_w) / a_w]^{1/c}$	(7)
Sabbah	$U_e = a (a_w^b / T^c)$	(8)
Sigma Copace	$U_e = \exp\{a - (bT) + [c \exp(a_w)]\}$	(9)

em que,

U_e - Teor de água de equilíbrio do produto, em base seca (b.s.);

a_w - Atividade de água, decimal;

T - Temperatura do ar ambiente, °C;

T_{abs} - Temperatura absoluta do ar ambiente, K,

a, b, c - Parâmetros que dependem da natureza do produto.

A Equação de GAB Modificada considera as propriedades modificadas da água adsorvida ao longo da região de multicamada, sendo de acordo com PARK et al. (2008), os parâmetros b e c são constantes de adsorção relacionados com as interações energéticas entre as moléculas da monocamada e as subseqüentes, em um sítio de sorção.

De acordo com SAUER (1995) e BROOKER et al. (1992), para a análise dos dados, foi considerada a atividade de água (a_w) como sendo igual à umidade relativa do ar, em decimal. Para estimar os parâmetros dos modelos matemáticos, foi utilizado o programa STATISTICA versão 5.0 (STATSOFT, 1995). Na análise de representatividade da higroscopicidade dos modelos, os dados experimentais foram comparados com os valores estimados para cada modelo, verificando-se a porcentagem de erro médio relativo (P) e o erro médio estimado (SE), de acordo, respectivamente, com as eqs. (10) e (11).

$$P = \frac{100}{n} \sum (|Y - \hat{Y}|/Y) \quad (10)$$

$$SE = \sqrt{\frac{\sum (Y - \hat{Y})^2}{GLR}} \quad (11)$$

em que,

Y- Valor observado experimentalmente;

\hat{Y} - Valor calculado pelo modelo;

GLR - Grau de liberdade do modelo.

A capacidade do modelo em descrever com fidelidade o processo físico é inversamente proporcional ao valor de SE (GONELI et al., 2014). Sendo assim, o grau de ajuste dos modelos matemáticos aos dados experimentais foi baseado na magnitude do coeficiente de determinação ajustado e dos erros médios relativo e estimado.

Em produtos higroscópicos, a água presente pode ser caracterizada como de fácil remoção, apresentando-se aderida superficialmente ou retida por forças capilares; e a de difícil remoção que se caracteriza por estar quimicamente ligada à matéria seca, fazendo parte da célula. Dessa maneira, se um produto é exposto a uma condição onde haja dessorção, quanto mais tempo se passar desse processo, menos água estará disponível nesse material higroscópico, sendo, então, cada vez mais difícil a retirada da água contida, fazendo-se necessário uma demanda cada vez maior de energia.

De acordo com OLIVEIRA et al. (2013) e TEIXEIRA et al. (2012), a energia adicional necessária para remover a água associada com um material higroscópico, em relação à energia necessária para vaporizar igual quantidade de água livre, sob mesma condição de temperatura e pressão, é caracterizada como calor isostérico de dessorção. O calor isostérico, também denominado calor de sorção ou entalpia de vaporização, é um parâmetro capaz de permitir a avaliação da demanda energética necessária aos processos de desidratação, secagem e queima de materiais biológicos, além de serem essenciais para a escolha da melhor estratégia de armazenamento (LI et al., 2011).

Dessa maneira, considerando a proporcionalidade inversa entre a necessidade de calor e o teor de água do produto, também é possível avaliar, com essa característica, o estado da água presente no produto e em sua microestrutura, e, conseqüentemente, as mudanças físicas que acontecem em sua superfície (OLIVEIRA et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2012). De acordo com OLIVEIRA et al. (2013) e TEIXEIRA et al. (2012), um indicador de água livre na superfície do produto pode ser considerado quando o calor isostérico de sorção é quase idêntico ao calor latente de vaporização da água livre.

De acordo com BROOKER et al. (1992), a temperatura e o teor de água do produto são as variáveis que influenciam diretamente no valor do calor latente de vaporização da água do produto. Para tanto, a análise do calor isostérico do bagaço de cana-de-açúcar foi realizada em função das

isotermas de sorção (curvas representativas dos teores de água de equilíbrio higroscópico) do modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais do produto analisado.

Para o cálculo do calor isostérico líquido (q_{st}), foram aplicados o modelo exponencial de Sopade e Ajisegiri (equação 12) que representa o comportamento do calor isostérico de sorção em função apenas do teor de água de equilíbrio (OLIVEIRA et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2012), e a equação de Clausius-Clapeyron (equação 13), modificada por WANG & BRENNAN (1991), que considera além do teor de água de equilíbrio também a temperatura, sendo largamente utilizada na literatura da área.

$$q_{st} = A \exp (-B \times U_e) \quad (12)$$

$$\ln(a_w) = -\left(\frac{q_{st}}{R}\right) \frac{1}{T_{abs}} + C \quad (13)$$

em que,

q_{st} - Calor isostérico líquido de sorção, kJ kg^{-1} ;

R - Constante universal dos gases, $8,314 \text{ kJ kmol}^{-1} \text{ K}^{-1}$, sendo para o vapor d'água $0,4619 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$,

A , B e C - Coeficientes de ajuste.

Na equação de Clausius-Clapeyron, o calor isostérico líquido de sorção (q_{st}) foi determinado a partir das inclinações das curvas do gráfico $\ln(a_w) \times (1/T_{abs})$ para os diversos teores de água de equilíbrio a partir do modelo matemático que melhor se ajustou aos dados experimentais (equação 14).

$$q_{st} = (\text{coeficiente angular}) \times R \quad (14)$$

Além do calor isostérico líquido de sorção (q_{st}), ou seja, o calor adicional necessário para remover a água associada ao produto, também foi calculado o calor isostérico integral de sorção (Q_{st}), que além do calor isostérico líquido de sorção, também considera o calor latente de vaporização da água livre, de acordo com a [eq. (15)] (OLIVEIRA et al., 2013; TEIXEIRA et al., 2012).

$$L = 2502,2 - 2,39 \times T_m \quad (15)$$

em que,

L - Calor latente de vaporização da água livre, kJ kg^{-1} ;

T_m - Temperatura média na faixa de estudo, em $^{\circ}\text{C}$.

A partir dos dados expostos anteriormente é possível, então, determinar o calor isostérico integral de sorção (Q_{st}).

$$Q_{st} = q_{st} + L \quad (16)$$

$$Q_{st} = A \times \exp (-B \times U_e) + L \quad (17)$$

em que,

Q_{st} - Calor isostérico integral de sorção, kJ kg^{-1} ;

A e B - Coeficientes de ajuste.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os dados experimentais de teor de água de equilíbrio higroscópico do bagaço de cana-de-açúcar foram obtidos a partir das combinações entre as umidades relativas do ar ambiente e

temperaturas. A partir dos valores médios do teor de água de equilíbrio higroscópico (b.s.) foram obtidos os pontos experimentais pertencentes às curvas de sorção para as diferentes temperaturas. A Figura 1 apresenta os dados experimentais obtidos assim como seus respectivos desvios-padrão.

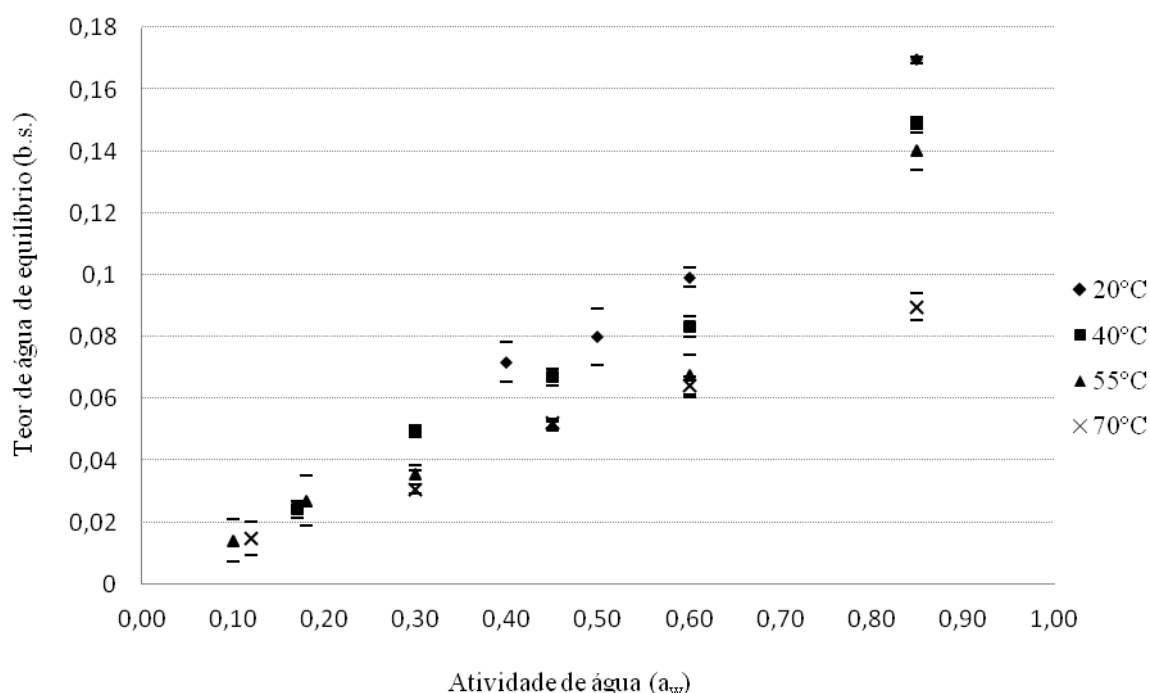


FIGURA 1. Valores experimentais do equilíbrio higroscópico e desvio-padrão do bagaço de cana-de-açúcar. **Sugarcane bagasse hygroscopic equilibrium values and standard deviation.**

Pode-se observar, na Figura 1, que conforme há o aumento da temperatura, o teor de água de equilíbrio do bagaço de cana-de-açúcar diminui; da mesma forma, quando a temperatura diminui, o teor de água de equilíbrio aumenta. Esse comportamento observado no bagaço de cana-de-açúcar caracteriza-o como um produto higroscópico, cuja umidade relativa e temperatura interferem em sua estabilidade higroscópica no ambiente, podendo este comportamento ser, também, observado no bagaço de laranja (FIORENTIN et al., 2010) e no coentro (SILVA et al., 2010).

Para a análise da modelagem representativa do equilíbrio higroscópico, foram utilizados os modelos descritos na Tabela 1. Para cada modelo, foram determinados seus parâmetros, coeficientes de determinação (R^2), erros médio relativo (P) e estimado (SE), como o exposto na Tabela 2.

TABELA 2. Parâmetros estimados, coeficientes de determinação (R^2), e erros médios relativo (P) e estimado (SE) para cada modelo analisado. **Estimated parameters, coefficient of determination (R^2), and mean relative errors (P) and estimated errors (SE) for each model.**

Modelo	Parâmetros			R^2	P (%)	SE (decimal)
	a	b	c			
Chung Pfast	0,2359	0,0442	18,9893	0,948	14,50	0,031
Copace	-3,4033	0,0101	2,1985	0,971	12,81	0,023
GAB Modificado	0,0915	0,6150	98,2672	0,957	12,64	0,028
Halsey Modificado	-4,4888	0,0185	1,7731	0,959	18,76	0,027
Henderson	0,0836	-	1,3407	0,907	13,66	0,058
Henderson Modificado	0,3770	37,3575	1,3902	0,972	7,51	0,023
Oswin	0,0697	-0,0002	2,1617	0,900	19,42	0,043
Sabbah	0,5643	1,2128	0,3377	0,949	14,12	0,031
Sigma Copace	-4,2726	0,0104	1,1803	0,960	18,47	0,027

De acordo com MOHAPATRA & RAO (2005), os modelos com erro médio relativo (P) superiores a 10% não apresentam um ajuste satisfatório aos dados experimentais, não representando adequadamente o fenômeno analisado. O mesmo é recomendado por LOMAURO et al. (1985), que ainda acrescentam que os valores de R^2 devem ser o mais próximo da unidade.

Considerando a análise dos resultados de equilíbrio higroscópico do bagaço de cana-de-açúcar, expostos na Tabela 2, é possível verificar que o Modelo de Henderson Modificado foi o que melhor representou o fenômeno, com coeficiente de determinação de 0,972, e erros médios relativo e estimado de, respectivamente, 7,5% e 0,0228. Para melhor verificação da representatividade do modelo ao fenômeno da higroscopicidade, a Figura 2 apresenta os valores experimentais do teor de água de equilíbrio (b.s.) e os valores calculados das isotermas de sorção do modelo que melhor se ajustou às curvas experimentais.

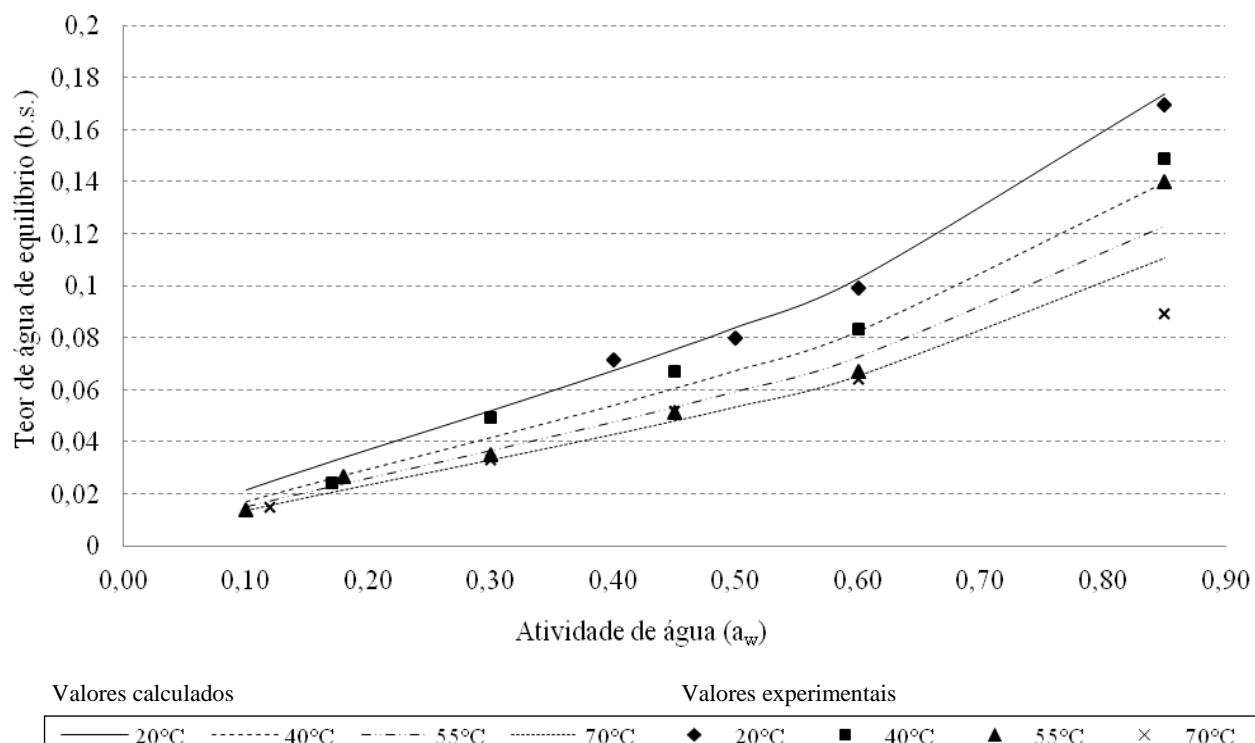


FIGURA 2. Valores experimentais e estimados pelo Modelo de Henderson Modificado do teor de água de equilíbrio em função da atividade de água (a_w) e da temperatura.
Experimental values and estimated by the modified Henderson model of equilibrium water content in function of the water activity (a_w) and temperature.

Tendo em vista a representatividade do fenômeno de higroscopicidade, o Modelo de Henderson Modificado foi utilizado para a determinação dos valores de atividade de água (a_w), na análise do calor isostérico de sorção do bagaço de cana-de-açúcar. A partir do cálculo dos valores de $\ln(a_w)$, estão representadas na Figura 3 as curvas do logaritmo neperiano da atividade de água do bagaço de cana-de-açúcar em função do inverso da temperatura absoluta ($1/T$, K^{-1}) para diferentes teores de água de equilíbrio (b.s.) e suas respectivas equações lineares.

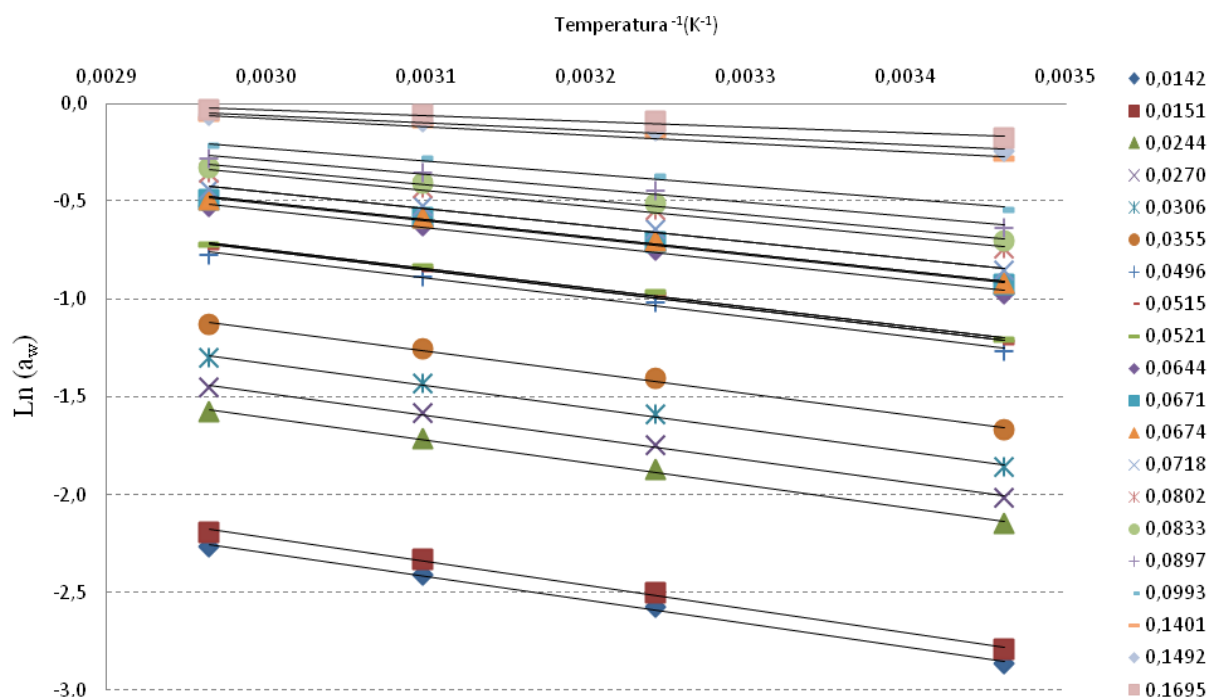


FIGURA 3. Valores de $\ln(a_w)$ para diferentes teores de água de equilíbrio (b.s.), em função da atividade de água (a_w) e da temperatura. **Values of $\ln(a_w)$ for different equilibrium water contents (bs) in function of the water activity (a_w) and temperature.**

Em função do coeficiente angular, calcularam-se, através da equação (14)], os valores do calor isostérico líquido de sorção (q_{st}). Para a determinação do calor isostérico integral de sorção (Q_{st}), em kJ kg^{-1} , assim como o representado pela [eq. (17)], levou-se também em consideração o valor do calor latente de vaporização da água livre (L), que representa a mínima quantidade de energia necessária para evaporar a água. Para este cálculo levou-se em conta a temperatura média utilizada no trabalho, que foi de $46,25^\circ\text{C}$, o que resultou em um valor de calor latente de vaporização de $2391,6625 \text{ kJ kg}^{-1}$. Os valores do calor isostérico líquido e integral de sorção obtidos, respectivamente, a partir do coeficiente angular e do calor latente de vaporização, estão expostos na Tabela 3.

TABELA 3. Valores do calor isostérico líquido e integral de sorção para diferentes teores de água de equilíbrio (b.s.). **Values of net and integral isosteric heats of sorption for different equilibrium water content (bs).**

Teor de água de equilíbrio (b.s)	Equação da reta	Coefficiente angular	Calor isostérico líquido (kJ kg ⁻¹)	Calor isostérico integral (kJ kg ⁻¹)
0,0142	y = -1213,6x + 1,283	-1213,6	560,2847	2951,9472
0,0151	y = -1209,6x + 1,3453	-1209,6	558,4371	2950,0996
0,0244	y = -1159x + 1,8142	-1159	535,3421	2927,0046
0,0270	y = -1143,7x + 1,8936	-1143	527,9517	2919,6142
0,0306	y = -1121,7x + 1,9802	-1121,7	517,7899	2909,4524
0,0355	y = -1090,9x + 2,062	-1090,9	503,4710	2895,1335
0,0496	y = -996,84x + 2,1476	-996,84	460,4219	2852,0844
0,0515	y = -983,83x + 2,1469	-983,83	454,4172	2846,0797
0,0521	y = -979,26x + 2,1462	-979,26	452,2925	2843,9550
0,0644	y = -893,87x + 2,0923	-893,87	412,8462	2804,5087
0,0671	y = -875,01x + 2,0722	-875,01	404,1625	2795,8250
0,0674	y = -872,73x + 2,0696	-872,73	403,1001	2794,7626
0,0718	y = -841,92x + 2,0314	-841,92	388,8736	2780,5361
0,0802	y = -783,93x + 1,9454	-783,93	362,0834	2753,7459
0,0833	y = -762,63x + 1,91	-762,63	352,2449	2743,9074
0,0897	y = -719,41x + 1,8327	-719,41	332,2909	2723,9534
0,0993	y = -655,75x + 1,7075	-655,75	302,8678	2694,5303
0,1401	y = -418,73x + 1,1584	-418,73	193,3975	2585,0600
0,1492	y = -373,91x + 1,0438	-373,91	172,7044	2564,3669
0,1695	y = -286,77x + 0,8138	-286,77	132,4267	2524,0892

A partir da obtenção desses dados, e utilizando-se do programa STATISTICA versão 5.0 (STATSOFT, 1995), chegou-se à equação que fornece o calor isostérico integral de sorção para o bagaço de cana-de-açúcar (equação 18), em função do teor de água de equilíbrio (b.s.) e da temperatura média de 46,25 °C.

$$Q_{st} = 657,5507 \times \exp(-7,8441 \times Ue) + 2391,6625 \quad (18)$$

em que,

$$Q_{st} - \text{Calor isostérico integral de sorção, kJ kg}^{-1}.$$

Os valores dos parâmetros estimados e coeficiente de determinação foram, respectivamente, A= 657,5507, B= 7,844079 e $R^2 = 0,977$. Assim, a Figura 4 apresenta o calor isostérico integral de sorção obtido a partir das eqs. (14) e (16) (Q_{st1}), e o calor isostérico integral de sorção obtido a partir da [eq. (18)] (Q_{st2}), ambos em função do teor de água de equilíbrio (Ue), b.s.

A partir da análise da Figura 4, assim como o mencionado por OLIVEIRA et al. (2013) e por TEIXEIRA et al. (2012), é possível verificar que à medida que o teor de água do produto diminui, mais energia é necessária fornecer ao mesmo para a remoção de água.

A partir desses dados, verifica-se que os valores de calor isostérico integral de sorção, para o bagaço de cana-de-açúcar na faixa de teor de água de 0,014 a 0,170 (b.s.), variaram de 2524,09 a 2951,95 kJ kg⁻¹; estando de acordo com os resultados obtidos nas análises das folhas e caule do coentro (SILVA et al., 2010), e da casca do maracujá-amarelo (FERREIRA & PENA, 2010).

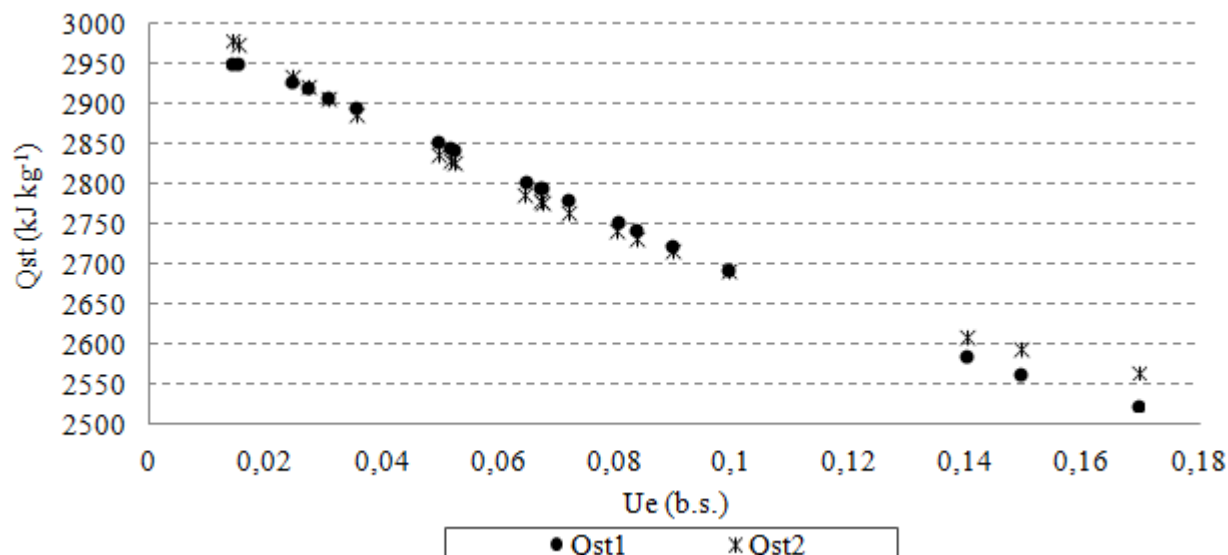


FIGURA 4. Valores calculados a partir dos coeficientes angulares (Q_{st1}) e valores simulados (Q_{st2}) do calor isostérico integral de sorção em função do teor de água de equilíbrio. **Sorption integral isosteric heat from angular coefficients (Q_{st1}) and simulated values (Q_{st2}) in function of the equilibrium water content.**

CONCLUSÃO

Com base nos resultados obtidos através deste trabalho, foi possível concluir que o teor de água de equilíbrio do bagaço de cana-de-açúcar estudado varia proporcionalmente em função da umidade relativa do ar, para uma mesma temperatura, e decresce com o aumento da temperatura, para a mesma umidade relativa do ar, caracterizando-se, então, como um produto higroscópico.

A partir da análise dessa dinâmica e baseando-se em parâmetros estatísticos, o Modelo de Henderson Modificado foi o que melhor representou o fenômeno de higroscopicidade do produto estudado, sendo capaz de prever o teor de água de equilíbrio do bagaço de cana-de-açúcar para o intervalo de temperaturas de 20 a 70 °C e umidades relativas do ar entre 10 e 85%.

Já, no que diz respeito à demanda energética necessária para a eliminação de água presente no bagaço de cana-de-açúcar, o calor isostérico integral de sorção para os teores de água de equilíbrio, de 0,014 a 0,170 b.s., variou, respectivamente, de 2524,09 a 2951,95 kJ kg⁻¹, sendo que, quanto menor o teor de água de equilíbrio, maior é a quantidade de energia necessária para a remoção da água contida no produto.

Dessa forma, a partir do estudo realizado, é possível determinar, para diferentes condições ambientais, as particularidades envolvendo higroscopicidade e calor isostérico do bagaço de cana-de-açúcar, cujas aplicações são essenciais para garantir a otimização dos processos de secagem e armazenamento.

REFERÊNCIAS

- AGEITEC - Agência Embrapa de Informação Tecnológica. **Cana-de-açúcar**. 2014. Disponível em: <http://www.agencia.cnptia.embrapa.br/gestor/cana-de-acucar/arvore/CONTAG01_108_22122006154841.html>. Acesso em: 11 set. 2014.
- ACHARJEE, T.C.; CORONELLA, C.J.; VASQUEZ, V.R. Effect of thermal pretreatment on equilibrium moisture content of lignocellulosic biomass. **Bioresource Technology**, New York, v. 102, n. 7, p. 4849–4854, 2011.
- BABETTO, A.C.; FREIRE, F.B.; BARROZO, M.A.S.; FREIRE, J.T. Drying of garlic slices: Kinetics and nonlinearity measures for selecting the best equilibrium moisture content equation. **Journal of Food Engineering**, New York, v.107, n.3-4, p. 347-352, 2011.

- BARBOSA, A.P.P.L.; GATTI JUNIOR, W. Cenários tecnológicos para a demanda por cana-de-açúcar. **Future Studies Research Journal: Trends and Strategy**, São Paulo, v.4, n. 1, p.92-113, 2012.
- BROOKER, D. B.; BAKKER-ARKEMA, F. W.; HALL, C. W. **Drying and storage of grains and oilseeds**. Westport : AVI, 1992. 450p.
- BRESSAN FILHO, A. **A geração termoelétrica com a queima do bagaço de cana-de-açúcar no Brasil – Análise do Desempenho da Safra 2009 – 2010**. Brasília, CONAB. 2011. 157p.
- FERREIRA, M. F. P.; PENA, R. S. Estudo da secagem da casca do maracujá amarelo. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.12, n.1, p.15-28, 2010.
- FIORENTIN, L. D.; MENON, B. T.; BARROS, S. T. D.; PEREIRA, N. C.; LIMA, O. C. M.; MODENES, A. N. Isotermas de sorção do resíduo agroindustrial bagaço de laranja. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande. v.14. n.6, p. 653-659, 2010.
- GONELI, A.L.D.; NASU, A.K.; GANCEDO, R.; ARAÚJO, W.D.; SARATH, K.L.L. Cinética de secagem de folhas de erva baleeira (*Cordia verbenacea* DC.). **Revista Brasileira de Plantas Mediciniais**, Botucatu, v.16, n.2, p.434-443. 2014.
- INSTITUTO ADOLFO LUTZ. **Métodos físico-químicos para análise de alimentos**. 4. ed. São Paulo, 2008. p. 98-99.
- LAM, P.S.; SOKHANSANJ, S.; BI, X.T.; LIM, C. J.; LARSSON, S.H. Drying characteristics and equilibrium moisture content of steam-treated Douglas fir (*Pseudotsuga menziesii* L.). **Bioresource Technology**, New York, v.116, p.396-402, 2012.
- LI, X.; CAO, Z.; WEI, Z.; FENG, Q.; WANG, J. Equilibrium moisture content and sorption isosteric heats of five wheat varieties in China. **Journal of Stored Products Research**, v.47, n.1, p.39-47, 2011.
- LOMAURO, C.J.; BAKSHI, A.S.; LABUZA, T.P. Evaluation of food moisture sorption isotherm equations. Part I: Fruit, Vegetable and meat products. **Lebensmittel-Wissenschaft und Technologie**, Zurich, v.18, n.2, p.111-117, 1985.
- MOHAPATRA, D.; RAO, P.S. A thin layer drying model of parboiled wheat. **Journal of Food Engineering**, New York, v. 66, n. 4, p.513-518, 2005.
- OLIVEIRA, D.E.C.; RESENDE, O.; SMANIOTTO, T. A.S.; SOUSA, K. A.; CAMPOS, R. C. Propriedades termodinâmicas de grãos de milho para diferentes teores de água de equilíbrio. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 50-56, 2013.
- PARK, K. J. B.; PARK, K. J.; CORNEJO, F. E. P.; DAL FABBRO, I. M. Considerações termodinâmicas das isotermas. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, Campina Grande, v.10, n.1, p.83-94, 2008.
- QIAOFANG, Z, DENG YUN, T, LI, L, & QIONG, G. Variation of equilibrium moisture content of heat-treated couratari oblongifolia, fraxinus excelsior, and quercus rubra wood. **Bioresources**, Raleigh, v.8, n.1, p.182-188, 2013.
- SANTOS, M.L.; LIMA, O.J.; NASSAR, E.J.; CIUFFI, K.J.; CALEF, P.S. Estudo das condições de estocagem do bagaço de cana-de-açúcar por análise térmica. **Química Nova**, São Paulo, v. 34, n. 3, p.507-511, 2011.
- SAUER, D.B. Storage of cereal grains and their products. 4th ed. St. Paul: Ed. American Association of Cereal, 1992. p. 615. 1995.
- SILVA, A. S.; ALMEIDA, F. A. C.; ALVES, M. C.; MELO, K. S.; GOMES, J. P. Característica higroscópica e termodinâmica do coentro desidratado. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 237-244. 2010.
- STATSOFT. **Statistica for Windows computer program manual**. Tulsa: StatSoft, 1995.

TEIXEIRA, L. P.; ANDRADE, E. T. ; SILVA, P. G. L. Determinação do equilíbrio higroscópico e do calor isostérico da polpa e da casca do abacaxi (*Ananas comosus*). **Engevista**, Niterói, v. 14, p. 172-184, 2012.

WANG, N.; BRENNAN, J.G. Moisture sorption isotherm characteristics of potatoes at four temperatures. **Journal of Food Engineering**, New York, v.14, n.1, p. 269 – 287, 1991.