

MODELAGEM EMPÍRICA DA PRESSÃO DE VAPOR DE SOLUÇÕES AQUOSAS DE CLORETO DE SÓDIO

Bruno Lacerda de Oliveira Campos¹, Mariana Myriam Fraga², Esly Ferreira da Costa Junior³

1. Discente do Curso de Engenharia Química. (brunolacerdaoc@gmail.com)
2. Discente do Curso de Engenharia Química
3. Docente do Curso de Engenharia Química, UFMG – Universidade Federal de Minas Gerais, Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 – Pampulha, Belo Horizonte - MG, BRASIL. CEP: 31270-901

Recebido em: 03/10/2016 – Aprovado em: 21/11/2016 – Publicado em: 05/12/2016
DOI: 10.18677/EnciBio_2016B_153

RESUMO

Devido a fatores como o aquecimento global, o crescimento populacional e a degradação ambiental, o acesso à água potável tem se tornado um problema em diversas regiões do planeta, especialmente em locais de clima seco. No Brasil, além do sertão nordestino, outras regiões também têm sofrido com a falta de água, como o Espírito Santo e as regiões oeste e norte do Rio Grande do Sul. Uma solução bem desenvolvida é a dessalinização de água salgada ou salobra. Na dessalinização térmica, a pressão de vapor da água do mar, que pode ser aproximada por uma solução de cloreto de sódio, é um parâmetro muito importante em modelagem e otimização. Tendo sido verificado a escassez de correlações empíricas com grande faixa de validade e baixa complexidade, foi proposto nesse trabalho uma correlação empírica não-linear para relacionar a pressão de vapor de uma solução aquosa de cloreto de sódio em função da temperatura e da concentração de soluto. Essa correlação basicamente corrige a equação de Antoine para a água pura ao adicionar um termo relativo à concentração de soluto. A otimização dos parâmetros foi feita por um método linear e um não-linear. O método não-linear proporcionou um resultado melhor, e seu desvio máximo dos dados da literatura foram de apenas 0,62%. Essa função pode ser utilizada em diversas aplicações, em especial na modelagem e otimização de dessalinizadores, já que mais de 85% da composição de sais da água do mar é composta de cloreto de sódio.

PALAVRAS-CHAVE: pressão de vapor, regressão não-linear, solução de cloreto de sódio.

STUDY OF THE VAPOR PRESSURE OF SODIUM CHLORIDE SOLUTIONS

ABSTRACT

Due to factors like global warming, population growth and environment degradation, the access to drinking water has become a problem in many regions of the planet, specially where the weather is dry. In Brazil, besides the northeast semi-arid region, the lack of water has brought suffering somewhere else, like Espírito Santo and the west and north of Rio Grande do Sul. A well-developed solution is the desalination of salt and brackish water. In thermal desalination, the vapor pressure of seawater,

which can be approximated as sodium chloride solution, is a very important parameter in modelling and optimization. After verifying the lack of empirical correlations with wide range of validity and low complexity, a non-linear empirical correlation was proposed to express the vapor pressure of an aqueous sodium chloride solution as a function of temperature and solute concentration. This correlation basically corrects Antoine's equation for pure water by adding a term related to solute concentration. The parameters were optimized by a linear and a non-linear method. The non-linear method showed better results, and its maximum deviation from literature data was only 0,62%. This function can be widely used, specially in modeling and optimization of desalinators, since more than 85% of seawater salt concentration consists of sodium chloride.

KEYWORDS: vapor pressure, sodium chloride solution, non-linear regression.

INTRODUÇÃO

Em muitas regiões do planeta, o acesso a água potável é um problema sério, especialmente em locais de clima seco e em ilhas. Estima-se que em 2025 cerca de 1,8 bilhão de pessoas terão escassez de água e por volta de dois terços da população terá alguma deficiência no acesso à água potável (ELIASSON, 2015). No Brasil, o sertão nordestino sofre com a escassez de água potável e com a presença de água salobra no solo já há muito tempo. Entretanto, nos últimos anos este problema não está mais restrito a esta região. No estado do Espírito Santo, cerca de 19 cidades estão em situação hídrica extremamente crítica (período de seca), levando inclusive a um grande número de crimes para se ter acesso à água (FERNANDES, 2016). No Rio Grande do Sul, a população das regiões oeste e norte têm tido dificuldades na obtenção de água, levando inclusive a pesquisas de desumidificação do ar para produção de água potável (HENKER et al., 2014). Logo, o Brasil possui grande demanda para processos alternativos de obtenção de água.

A dessalinização de água salgada ou salobra é uma técnica muito bem desenvolvida para a purificação de água. Brião et al. (2014) propôs a implantação de uma planta de osmose inversa na região do Aquífero Guarani para a dessalinização de água salobra do subsolo, de forma a dar suporte ao abastecimento da população na época da seca. Além da osmose inversa, outras técnicas disponíveis são: destilação de múltiplos efeitos, dessalinização por energia solar, entre outros.

Nas técnicas de dessalinização térmica, uma variável muito importante nos cálculos é a pressão de vapor. A pressão de vapor de uma substância é a pressão exercida pelo vapor quando em equilíbrio termodinâmico com o líquido que lhe deu origem, ou seja, quando a fase gasosa está saturada por esse componente. A equação de Antoine descreve a pressão de vapor (p^*) em função da temperatura (T) para líquidos puros. A Equação (1) mostra a equação de Antoine para a água (SMITH, 2007):

$$p^* = e^{\left(16,3872 - \frac{3885,7}{220,17+T}\right)} \quad (p^* \text{ em kPa, } T \text{ em } ^\circ\text{C}) \quad (1)$$

A adição de um soluto não-volátil em um líquido puro promove a formação de interações soluto-solvente, estabiliza a solução e abaixa a pressão de vapor, o que é chamado de efeito tonoscópico. Em uma solução aquosa de sais, a formação de interações do tipo íon-dipolo pode alterar significativamente a pressão de vapor da solução, se a solução não for muito diluída. A água do mar possui concentração média de 3,5 % kg sais/ kg solução (TUREKIAN, 1968) e é composta por diversos

sais. No processo de dessalinização, esta concentração é aumentada, devido à separação da água pura. Logo, considerar que a pressão de vapor é a mesma da água pura pode trazer erros significativos nos cálculos de modelagem e otimização de sistemas de dessalinização. A Tabela 1 mostra a concentração média dos principais sais presentes na água dos oceanos.

TABELA 1: Concentração média dos principais sais contidos nos oceanos

Componentes	Concentração (g/kg solução)	% (g/ g sais totais)
Cl ⁻	19,53	55,28
Na ⁺	10,76	30,46
SO ₄ ²⁻	2,72	7,70
Mg ²⁺	1,294	3,66
Ca ²⁺	0,413	1,17
K ⁺	0,387	1,10
HCO ₃ ⁻	0,142	0,40
Br ⁻	0,067	0,19
Sr ²⁺	0,008	0,00
B _x O _y ^{z-}	0,004	0,00
F ⁻	0,001	0,00

Fonte: TUREKIAN (1968)

Ao observar os dados da tabela, percebe-se que o cloreto de sódio corresponde a mais de 85% dos sais contidos na água do mar. AL-SULAIMAN (1995) fez uma análise exergética de plantas de dessalinização por destilação flash multi-estágio, em cuja análise foi considerada que as propriedades térmicas da água do mar, como calor específico e pressão de vapor, são equivalentes as de uma solução de cloreto de sódio, visto que esse é o principal soluto. Sendo assim, o presente estudo também considera que a pressão de vapor da água do mar se comporta como a pressão de vapor de uma solução de cloreto de sódio.

No sistema de dessalinização solar por umidificação e desumidificação, a água do mar (ou salobra) é parcialmente aquecida, no trocador de calor do desumidificador, em contracorrente com o ar quente e úmido proveniente da câmara de umidificação. O aquecimento da água é completado no coletor solar. A água aquecida é alimentada no topo da coluna de umidificação em contracorrente com o ar frio, alimentado na base. A água aquece o ar e é parcialmente evaporada, perdendo calor sensível e latente, tendo o conteúdo de sólidos aumentado e sendo descartada. O ar quente e úmido que sai da câmara de umidificação alimenta a câmara de desumidificação, fechando o ciclo. A água dessalinizada condensada no desumidificador é o produto do processo (FARID et al., 2002; HERMOSILLO, 2012; HAMED et al., 2015).

A operação de umidificação é limitada pela pressão de vapor da solução, que é a pressão parcial máxima que a água pode chegar. Na operação de desumidificação, a condensação ocorre com o ar saturado, ou seja, a pressão parcial da água é a pressão de vapor. Logo, é extremamente importante ter correlações que descrevam a pressão de vapor da água pura, para a coluna de desumidificação, e para a água do mar, para a coluna de umidificação.

Tendo sido feita uma pesquisa na literatura, percebeu-se a escassez de correlações empíricas com baixa complexidade e que representem bem dados de pressão de vapor de soluções de cloreto de sódio para amplas faixas de temperatura e concentração de soluto. Este tipo de correlação é necessária para a modelagem matemática e posterior otimização dos dessalinizadores. Em razão disso, esse trabalho teve como objetivo a elaboração de uma função matemática da pressão de vapor dessa solução a partir de dados da literatura.

MATERIAL E MÉTODOS

A ideia deste trabalho foi aproveitar a Equação de Antoine para a descrição da pressão de vapor da água pura (Equação 1) e inserir uma correção para o efeito da presença do cloreto de sódio. A partir da análise gráfica de dados da literatura, a correlação proposta para a pressão de vapor (p^*) de uma solução de cloreto de sódio é a mostrada na Equação (2), em que T é a temperatura da solução e W é a concentração de soluto:

$$p^* = e^{\left(16,3872 - \frac{3885,7}{-42,98+T}\right)} \cdot \left(2 - e^{D \cdot W + E \cdot W^2}\right) \quad (2)$$

(p^* em kPa, T em K, W em kg/kg solução)

Verifica-se nesta Equação (2) que quando a concentração de soluto é nula, o segundo termo entre parênteses se iguala a 1 e assim a pressão de vapor desse sistema é igual à pressão de vapor da água pura (fornecida pela Equação (1)). Para a estimação dos dois parâmetros da correlação proposta, define-se a variável auxiliar Z , função da pressão de vapor e da temperatura, apresentada na Equação (3):

$$Z = 2 - \frac{p^*}{e^{\left(16,3872 - \frac{3885,7}{-42,98+T}\right)}} \quad (3)$$

Comparando-se as Equações (2) e (3) verifica-se que a variável auxiliar Z corresponde a:

$$Z = e^{D \cdot W + E \cdot W^2} \quad (4)$$

Para a estimação dos parâmetros D e E , utilizou-se os dados de CLARKE (1985) com intervalo de temperatura entre 298 e 383K e intervalo de concentração de soluto entre 0 e 20% kg/kg solução, totalizando $n = 370$ pontos. A partir destes dados, os valores de Z foram calculados para serem empregados na regressão dos parâmetros. Ressalta-se que a Equação (4), embora não linear nos parâmetros é linearizável. Desta forma, optou-se adotar dois procedimentos de estimação: regressão linear múltipla e regressão não linear.

REGRESSÃO LINEAR MÚLTIPLA

A regressão linear múltipla pode ser feita quando há mais de uma variável independente e/ou quando há termos não-lineares no sistema, mas a função

continua linear nos parâmetros. Melo (2011) ajustou uma correlação por regressão linear múltipla para o rendimento da reação de transesterificação etílica de sebo bovino. As variáveis independentes foram X_1 , X_2 , X_3 e X_4 e a variável dependente foi Y . O modelo obtido foi:

$$Y = 22,63 + 2,44X_1 + 6,66X_2 + 3,94X_3 - 1,13X_2X_3 - 2,94X_1X_2X_3 + 1,88X_4 + 3,31X_2X_4 - 2X_1X_2X_4 + 1,13X_1X_3X_4 - X_2X_3X_4 - 0,94X_1X_2X_3X_4 \quad (6)$$

Pela equação, percebe-se a equação é linear nos parâmetros, mesmo havendo termos de interação e termos de maior grau. Para transformar o sistema em estudo em uma equação que possa ter seus parâmetros estimados por regressão linear múltipla, é necessário um procedimento de linearização. Para isso, o logaritmo natural foi inserido de ambos os lados da Equação (5), resultando na Equação (7):

$$\ln[Z(W)] = D \cdot W + E \cdot W^2 \quad (7)$$

Com o sistema já linearizado, pode-se fazer uma regressão linear múltipla, pois embora haja um termo de concentração não-linear, os parâmetros são lineares (MONTGOMERY, 2014). Seja β o vetor dos parâmetros:

$$\beta = \begin{bmatrix} D \\ E \end{bmatrix} \quad (8)$$

Seja Y o vetor de dados de $\ln[Z(W)]$:

$$Y = \begin{bmatrix} \ln[Z(W_1)] \\ \ln[Z(W_2)] \\ \vdots \\ \ln[Z(W_n)] \end{bmatrix} \quad (9)$$

E seja X a matriz de regressão linear múltipla:

$$X = \begin{bmatrix} W_1 & W_1^2 \\ W_2 & W_2^2 \\ \vdots & \vdots \\ W_n & W_n^2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

O sistema a ser resolvido se torna:

$$Y = X \cdot \beta \quad (11)$$

Multiplicando ambos os lados pela matriz transposta de X :

$$X^t \cdot Y = X^t \cdot X \cdot \beta \quad (12)$$

Invertendo a matriz $(X^t \cdot X)$, tem-se:

$$\beta = (X^T \cdot X)^{-1} \cdot (X^T \cdot Y) \quad (13)$$

Após o cálculo dos parâmetros, o coeficiente de determinação (R^2) foi calculado. Este é uma medida de ajuste de parâmetros do modelo estatístico em relação aos dados utilizados (MONTGOMERY, 2014). Sendo $\hat{p}_i^*$ o i ésimo termo calculado pelo modelo, p_i^* o i ésimo termo coletado na literatura e $\bar{p}^*$ a média aritmética de todos os termos coletados na literatura, tem-se:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{p}_i^* - p_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i^* - \bar{p}^*)^2} \quad (14)$$

Como o R^2 é aumentado pela inserção de qualquer parâmetro, mesmo tendo pouco poder explicativo, é importante calcular o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{ajust.}$), pois penaliza a ingestão de parâmetros pouco significativos (MONTGOMERY, 2014). A Equação (15) mostra esse cálculo, sendo $n = 370$ o número de dados coletados da literatura e $p = 2$ o número de parâmetros estimados.

$$R^2_{ajust.} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{p}_i^* - p_i^*)^2}{\sum_{i=1}^n (p_i^* - \bar{p}^*)^2} \cdot \frac{(n-1)}{(n-p)} \quad (15)$$

Calculou-se também o desvio percentual (d) ponto a ponto, bem como a média dos desvios e o desvio máximo. A Equação (16) mostra o cálculo desse desvio percentual:

$$d(\%) = 100 \cdot \frac{\sqrt{(\hat{p}_{dados} - \hat{p}_{modelo})^2}}{\hat{p}_{dados}} \quad (16)$$

REGRESSÃO NÃO-LINEAR

A regressão não-linear também pode ser aplicada para a estimação dos parâmetros em uma correlação. Desuque (2016) utilizou a regressão não-linear para a estimação da pressão de vapor do sistema ternário composto por água, cloreto de sódio e sorbitol. O modelo conta com 16 parâmetros e sua função objetivo utilizada foi a minimização da soma dos erros do modelo ao quadrado.

No sistema em estudo, foi montado um problema de otimização não-linear que teve como função objetivo (F) a minimização da soma dos erros do modelo ao quadrado, descrita na Equação (17):

$$F_{min} = \sum_{n=1}^{370} (Z_{dados} - Z_{modelo})^2 \quad (17)$$

Os parâmetros foram otimizados através do solver do Microsoft Excel. Da mesma forma que na otimização linear, calculou-se os coeficientes de determinação comum e ajustado, bem como o desvio percentual médio e máximo do modelo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foi feita a estimação dos parâmetros tanto por regressão linear múltipla como por regressão não-linear. Os resultados obtidos com a otimização dos parâmetros são mostrados na Tabela 2.

TABELA 2: Parâmetros estimados para a correlação proposta

Otimização	Parâmetro	Valor	Unidade
Linear	D	$5,3907 \cdot 10^{-3}$	kg solução/ kg soluto
Linear	E	$1,0619 \cdot 10^{-4}$	(kg solução/ kg soluto) ²
Não-linear	D	$5,3851 \cdot 10^{-3}$	kg solução/ kg soluto
Não-linear	E	$1,0658 \cdot 10^{-4}$	(kg solução/ kg soluto) ²

Verifica-se na Tabela 2 que embora os valores dos parâmetros por regressão linear múltipla e por regressão não-linear sejam muito próximos, há uma pequena diferença entre estes. Esta diferença é esperada pelo fato das funções objetivo de cada estratégia serem diferentes (na regressão não-linear, tem-se o somatório dos resíduos ao quadrado da variável Z e no caso da regressão linear múltipla tem-se o somatório dos resíduos ao quadrado da variável Z linearizada). Os coeficientes de determinação comum e ajustado foram calculados e são mostrados na Tabela 3.

TABELA 3: Coeficientes de determinação das correlações otimizadas

Otimização	R^2	$R^2_{\text{ajust.}}$
Linear	0,9999972	0,9999971
Não-linear	0,9999987	0,9999987

Os resultados dos coeficientes de determinação mostram que mais de 99,999% da variância dos dados é explicada por ambos os modelos e menos de 0,001% não são explicados. Esse resultado é devido a grande dispersão dos dados, contendo pressões próximas de 3kPa e pressões maiores que 140kPa. A Figura 1 mostra os dados calculados pelos modelos em função dos dados da literatura.

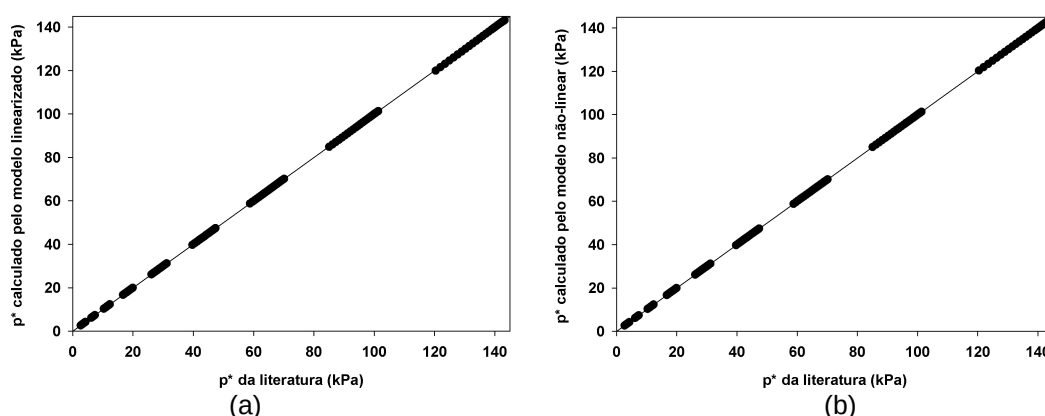


FIGURA 1: Pressão de vapor (p^*) calculada pelo modelo linearizado (a) e não-linear (b) em função dos valores de p^* da literatura.

De acordo com as Figuras 1a e 1b, os pontos se encontram muito próximos à bissetriz, mostrando a proximidade de ambos os modelos em relação aos dados de CLARKE (1985). Percebe-se então, a eficácia do modelo em retratar os dados. Os

desvios percentuais médio e máximo foram calculados e são mostrados na Tabela 4.

TABELA 4: Desvios percentuais médio e máximo das correlações otimizadas

Otimização	Desvio médio (%)	Desvio Máximo (%)
Linear	0,34566	2,0006
Não-linear	0,31525	0,61955

Os desvios percentuais médios de ambos os modelos são baixos, mostrando a coerência do modelo proposto. O desvio máximo do modelo linear (2%) é significativamente superior ao do modelo não-linear (0,62%). Esse é um resultado esperado, pois a função objetivo do método linearizado é a minimização da soma de resíduos (diferença entre os valores calculado e experimental do logaritmo natural da variável de saída) ao quadrado, de forma que esta sempre vai apresentar um resultado igual ou inferior ao de uma função cujos parâmetros foram otimizados por um método não-linear (resíduos da própria variável de saída ao quadrado, sem a linearização).

OSMARI et al. (2013) compararam regressões lineares e não-lineares para descrever as isotermas de Langmuir e Freundlich. Em ambos os casos, a regressão não-linear apresentou resultados melhores, levando a conclusão de que não há razões para se utilizar a regressão linear na área de adsorção. Sendo assim, se a função proposta for não-linear nos parâmetros, é preferível resolvê-la por um método não-linear a linearizá-la, para a obtenção de um resultado melhor.

Os bons resultados obtidos mostram que a escolha do termo exponencial para expressar a dependência da pressão de vapor em relação à concentração de soluto foi correta. A função completa contém apenas cinco parâmetros, um número baixo quando comparado com a correlação de DESUQUE (2016) para o sistema ternário água-NaCl-sorbitol (mais complexo que o do presente trabalho), que contém 16 parâmetros.

CONCLUSÕES

Uma correlação para a pressão de vapor de uma solução de cloreto de sódio em função de temperatura e concentração de soluto foi obtida com sucesso. Esta correlação parte da Equação de Antoine com parâmetros da literatura para a água pura e possui um fator de correção para a presença do soluto. Como este fator de correção é passível de ser linearizado, os parâmetros da correlação foram estimados por dois métodos regressão: um linear, por meio de linearização da função, e outro não-linear. A regressão não-linear apresentou resultados melhores do que os obtidos na regressão linear, mostrando que a linearização pode prejudicar o procedimento de estimação dos parâmetros. Considerando-se os parâmetros obtidos por regressão não-linear, o desvio máximo do modelo foi de apenas 0,62% em relação aos dados da literatura. Esse modelo tem a seguinte faixa de validade: temperatura entre 298 e 383K e concentração de soluto entre 0 e 20% kg/kg solução. Sua utilidade engloba cálculos em diversos processos, em especial a dessalinização, já que a água do mar é composta por mais de 85% de cloreto de sódio, de forma que suas propriedades possam ser aproximadas às de uma solução aquosa desse sal.

REFERÊNCIAS

AL-SULAIMAN, F.A.; ISMAIL, B. Exergy analysis of major recirculating multi-stage flash desalting plants in Saudi Arabia. **Desalination**, v. 103, p. 265-270, 1995. Disponível em: <[http://dx.doi.org/10.1016/0011-9164\(95\)00079-8](http://dx.doi.org/10.1016/0011-9164(95)00079-8)>. doi: 10.1016/0011-9164(95)00079-8.

BRIÃO, V.B.; MAGOGA, J.; HEMKEMEIER, M.; BRIÃO, E.B.; GIRARDELLI, L.; SBEGHEN, L.; FAVARETO, D.P.C. Reverse osmosis for desalination of water from the Guarani Aquifer System to produce drinking water in southern of Brazil. **Desalination**, v. 344, p. 402-411, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.04.008>>. doi: 10.1016/j.desal.2014.04.008.

CLARKE, E.C.W.; GLEW, D.N. Evaluation of the thermodynamics functions for aqueous sodium chloride from equilibrium and calorimetric measurements below 154°C. **Journal of Physical and Chemical Reference Data**, v.14, n.2, p. 489-610, 1985. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1063/1.555730>>. doi: 10.1063/1.555730.

DESUQUE A.M.; PASSAMONTI F.J.; CHIALVO, A.C. Evaluation of the vapor pressure of aqueous NaCl-sorbitol solution and correlation of the water activity on composition and temperature. **Fluid Phase Equilibria**, v. 415, p. 84-87, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.fluid.2016.01.048>> doi: 10.1016/j.fluid.2016.01.048.

ELIASSON, J. The rising pressure of global warming shortages. **Nature**, v. 517, p. 6, Nature Publishing Group, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1038/517006a>>. doi: 10.1038/517006a

FARID, M.M.; PAREKH, S.; SELMAN, J.R.; AL-HALLAJ, S. Solar desalination with a humidification-dehumidification cycle: mathematical modeling of the unit. **Desalination**, v. 151, p. 153-164, 2002. Disponível em: <[https://doi.org/10.1016/s0011-9164\(02\)00994-3](https://doi.org/10.1016/s0011-9164(02)00994-3)>. doi: 10.1016/s0011-9164(02)00994-3

FERNANDES, V. Crimes disparam na guerra pela água devido à seca no Espírito Santo. **Gazeta Online**. Disponível em: <http://gazetaonline.com.br/_conteudo/2016/09/noticias/cidades/3977303-crimes-disparam-na-guerra-pela-agua-devido-a-seca-no-espirito-santo.html>. Acesso em 19 de setembro de 2016.

HAMED, M.H.; KABEEL, A.E.; OMARA, Z.M.; SHARSHIR, S.W. Mathematical and experimental investigation of a solar humidification-dehumidification desalination unit. **Desalination**, v. 358, p. 9-17, 2015. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2014.12.005>>. doi: 10.1016/j.desal.2014.12.005

HENKER, E.; RODRIGUES, F.S.; COSTA, B.M.; KEARCHER, J.; MACHADO, E.L. Água potável com desumidificação do ar e energia solar: adaptação ao stress hídrico no RS. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n.3, p. 345-352, 2014. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1590/S1413-41522014019000000741>>. doi: 10.1590/S1413-41522014019000000741

HERMOSILLO, J.J.; ARANCIBIA-BULNES, C.A.; ESTRADA, C.A. Water desalination by air humidification: Mathematical model and experimental study. **Solar Energy**, v.86, p. 1070-1076, 2012. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2011.09.016>>. doi: 10.1016/j.solener.2011.09.016

MELO, T.C.; BEGNINI, M.L.; FERREIRA, D.C. Estudo paramétrico das variáveis envolvidas na reação de transesterificação etílica do sebo bovino. **Enciclopédia Biosfera**, v.7, n.13, Goiânia, 2011.

MONTGOMERY, D.C.; RUNGER, G.C. **Applied statistics and probability for engineers**. Wiley, 6th edition, Danvers, 2014, 811p.

OSMARI, T.A.; GALLON, R.; SCHWAAB, M.; BARBOSA-COUTINHO, E.; SEVERO JR., J.B.; PINTO, J.C. Statistical analysis of linear and non-linear regression for the estimation of adsorption isotherm parameters. **Adsorption Science & Technology**, v. 31, n. 5, p. 433-458, 2013. Disponível em: <<https://doi.org/10.1260/0263-6174.31.5.433>>. doi: 10.1260/0263-6174.31.5.433

SMITH, J.M.; VAN NESS, H.C.; ABBOTT, M.M. **Introdução à termodinâmica da engenharia química**. LTC, Rio de Janeiro, 2007, 626p.

TUREKIAN, K.K.; **Oceans**. Prentice-Hall, Michigan, 1968. 120p.