



20º POSMEC

SIMPÓSIO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA
UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Estudo da Evaporação de uma Superfície Livre com Convecção Forçada

Autor:
Cristiano PIMENTA

Orientador:
Aristeu DA SILVEIRA NETO

O processo natural de movimento da água entre os continentes, oceanos e a atmosfera é chamado de ciclo hidrológico. A água está em constante movimento e variando de estado, ou seja, passando de líquido para vapor, de vapor para sólido, de sólido para líquido novamente, numa alternância interminável que existe há bilhões de anos. A radiação solar é a fonte de energia que promove o aquecimento dos continentes e oceanos, portanto é responsável pela movimentação da água através do processo de evaporação, convecção vertical de massas de ar e, conseqüentemente, pelo processo de condensação do vapor d'água.

O processo físico de evaporação da água pode ser formulado através da teoria cinética molecular, que consiste num certo número de moléculas com energia maior que a energia média para uma dada temperatura e com energia suficiente para vencer as forças atrativas de coesão entre as moléculas, que supera a tensão superficial e evapora. Assim, quanto mais energia é fornecida às moléculas, mais rápido será o processo de evaporação. Se a evaporação ocorrer em um ambiente fechado, as moléculas que escapam do líquido acumulam-se em forma de vapor d'água acima do líquido, sendo que muitas dessas moléculas retornam ao líquido, assim quando esse processo de escape e retorno entrar em equilíbrio, o vapor d'água é denominado saturado.

Muitos fatores intervêm na intensidade de evaporação, dentre os quais se destacam a temperatura da superfície, a umidade relativa do ar e a velocidade do vento. A variação da intensidade de energia solar recebida na superfície produz variação de temperatura da superfície, modificando a energia cinética das moléculas, que resulta num aumento da taxa de evaporação. O grau de umidade relativa do ar atmosférico é a

relação entre a quantidade de vapor d'água aí presente e a quantidade de vapor d'água no mesmo volume de ar se estivesse saturado. Existe entre a superfície evaporante e a atmosfera um gradiente de concentração de vapor d'água, isto é, uma diferença entre a pressão de saturação de vapor à temperatura da superfície e a pressão de vapor do ar à temperatura ambiente. A elevação da temperatura atmosférica eleva o valor da pressão de saturação do vapor de água, o que permite maiores quantidades de vapor de água esteja presente no mesmo volume de ar. Na camada em contato com a superfície evaporante, aproximadamente 1mm, após as moléculas escaparem da superfície líquida, elas são transportadas por difusão molecular. A evaporação é muito maior quando se tem o transporte advectivo do vapor d'água evaporado provocado pela movimentação do ar. O transporte de vapor d'água para a atmosfera se dá pela combinação dos fenômenos da difusão molecular na camada próxima a superfície evaporante e pelos turbilhões do movimento turbulento do ar.

Para conseguir-se obter dados para avaliar o fluxo mássico em kg/dia.m² na evaporação de uma superfície livre, um meio alternativo para isso é a utilização de método empírico. Para avaliar a perda diária de água de uma superfície livre, inicialmente simplificando-se ao máximo o problema. Considera-se que o regime é estacionário, aplica-se a analogia de transferência de calor e de massa, onde o vapor d' água comporta-se como um gás ideal. As propriedades do ar, a massa específica do vapor d' água, e o coeficiente de difusão binária do vapor d' água, são retiradas de tabelas que contêm as propriedades termofísicas da matéria. Ao obter os valores das propriedades mencionadas, determina-se o número de Schmidt que representa a razão entre as difusividades de quantidade de movimento linear e mássica e o número de Reynolds que representa a razão entre as forças de inércia e as forças viscosas. Em função do número de Reynolds o escoamento é caracterizado em regime *laminar, transição, e turbulência*.

O número de Reynolds é dado pela Eq.1:

$$Re = \frac{U_{\infty} \cdot L}{\nu} . \quad (1)$$

onde U_{∞} é a velocidade da corrente livre de ar, L o comprimento característico da superfície, e ν a viscosidade cinemática do fluido.

O número de Schmidt é dado pela Eq.2:

$$Sc = \frac{\nu}{D_{AB}} . \quad (2)$$

onde D_{AB} é o coeficiente de difusão binária da espécie A na espécie B, no presente trabalho a espécie A é considerada como vapor d'água e a espécie B a corrente livre de ar.

Um novo parâmetro adimensional é definido como número de Sherwood (Sh) que representa para a camada-limite de concentração o que o número de Nusselt representa para a camada-limite térmica. Esse parâmetro fornece uma medida da transferência de massa convectiva que ocorre na superfície, e é dado pela formula empírica Eq.3:

$$\overline{Sh} = 0.037 \cdot Re^{4/5} \cdot Sc^{1/5} \quad (3)$$

Para determinar a taxa de evaporação de uma superfície é necessário obter o valor do coeficiente de transferência de massa por convecção médio ($\bar{h}_m$), que está relacionado com o número de Sherwood de acordo com a Eq.4:

$$\overline{Sh} = \frac{\bar{h}_m \cdot L}{D_{AB}} \quad (4)$$

Após determinar o valor do coeficiente de transferência de massa por convecção médio é possível encontrar a taxa de evaporação de vapor d'água em uma superfície livre através da Eq.5:

$$\eta_A = \bar{h}_m \cdot A \cdot (\rho_{A,S} - \rho_{A,\infty}) \quad (5)$$

onde os subscrito A, S, ∞ são referentes ao vapor d'água (espécie A), a superfície, e a corrente livre de ar (espécie B), respectivamente. A variável A é a área da superfície na qual se obtém a taxa de evaporação.

Todos os cálculos são realizados supondo-se equilíbrio termodinâmico na interface entre o gás e a fase líquida. Uma implicação do equilíbrio é que a temperatura do vapor na interface é igual à temperatura da superfície. Uma outra implicação é que o vapor d'água se encontra em um *estado saturado*, estado no qual as tabelas termodinâmicas para a água podem ser usadas para obter a sua densidade a partir do conhecimento da temperatura na superfície. O vapor d'água pode ser considerado com um gás ideal, assim é possível obter uma equação para a umidade relativa (ϕ), que é dada pela Eq.6:

$$\phi_\infty = \frac{\rho_{A,\infty}}{\rho_{A,sat}(T_\infty)} \quad (6)$$

Da hipótese de equilíbrio termodinâmico na interface, tem-se:

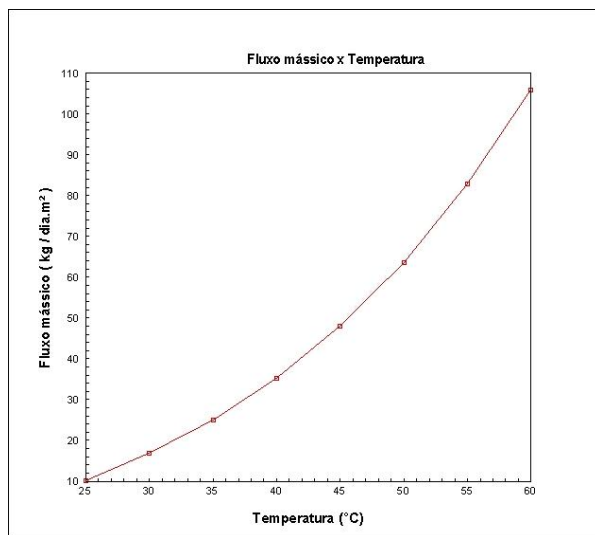
$$\rho_{A,S} = \rho_{A,sat}(T_S) \quad (7)$$

Substituído a Eq.6 e a Eq.7 na Eq.5, obtém-se uma nova equação que é dada pela Eq.8:

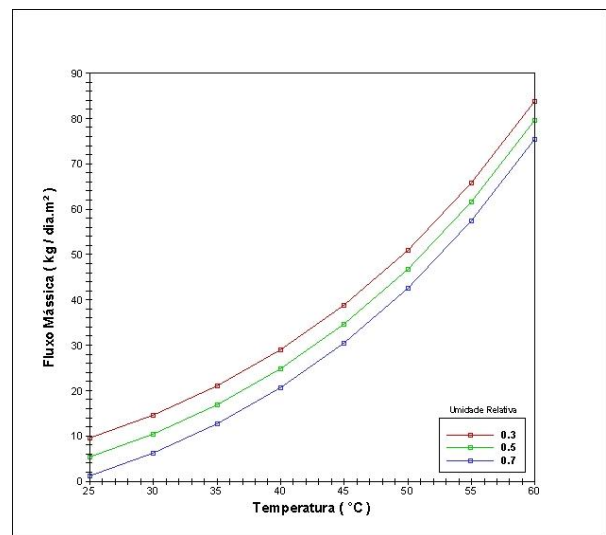
$$\eta_A = \bar{h}_m \cdot A \cdot [\rho_{A,sat}(T_S) - \phi_\infty \cdot \rho_{A,sat}(T_\infty)] \quad (8)$$

A taxa de evaporação dada pela Eq.8 é expressa em termos de fluxo mássico em (kg/dia.m²) e está levando em consideração a umidade relativa da corrente livre de ar. Alguns resultados serão apresentados considerando-se a variação da temperatura da superfície, a variação da umidade relativa da corrente livre de ar.

A Fig.1(a) apresenta que a taxa de evaporação de uma superfície varia de forma não linear com a temperatura da superfície. Essa análise foi feita considerando uma velocidade constante da corrente livre de ar e com umidade relativa constante, portanto variando somente a temperatura da superfície.



(a)



(b)

Figura 1: Variação do fluxo mássico com a temperatura da superfície e umidade relativa da corrente livre de ar. (a) Apenas com a temperatura. (b) Com a temperatura e a umidade relativa da corrente livre de ar.

A Fig.3 apresenta a forte influência da umidade relativa na corrente livre de ar. A medida que se aumenta a massa de vapor d'água na corrente livre de ar, a umidade relativa do mesmo aumenta e assim diminui o fluxo mássico na interface gás-líquido, ou seja, a taxa de evaporação passa a ser menor.

Os fatores que mais influenciam na taxa de evaporação de uma superfície expressa através do fluxo mássico é variação da temperatura na superfície, a variação do comprimento da superfície, a umidade relativa da corrente livre de ar, a velocidade da corrente livre de ar e a temperatura da corrente livre de ar. A medida que aumenta o comprimento da superfície a taxa de evaporação diminui, pois ao aumentar o comprimento modifica-se a característica do escoamento sobre a superfície, podendo passar de um escoamento laminar para turbulento. Neste trabalho, a velocidade da corrente livre de ar juntamente com a temperatura da mesma mantiveram-se constante ao longo de todas as análises feitas.

Referências

- INCROPERA, FRANK P. *Fundamentos de Transferência de Calor e de Massa*, 6. ed. Rio de Janeiro : LTC , 2008.
- ÇENGEL, Y.A. CIMBALA, J. M. *Mecânica dos fluidos: Fundamentos e aplicações*, 1. ed. São Paulo: McGraw-Hill, 2007.
- VILELA, SWAMI MARCONDES, *Hidrologia aplicada*. São Paulo, McGraw do Brasil, 1975. Cap. 3-6.