

TRANSFERÊNCIA DE CALOR E MASSA NA INTERFACE ÁGUA-ATMOSFERA

Alexandre Silveira – alexsilv@sc.usp.br

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento.

Caixa Postal 359 – CEP 13560-970 - São Carlos, SP, Brasil

Marcus F. Giorgetti – marciusg@sc.usp.br

Universidade de São Paulo, Escola de Engenharia de São Carlos, Departamento de Hidráulica e Saneamento.

Caixa Postal 359 – CEP 13560-970 - São Carlos, SP, Brasil

Resumo. *O objetivo geral do presente trabalho foi o desenvolvimento de uma nova metodologia para a determinação do coeficiente global de transferência de calor e de massa na interface água-atmosfera. Buscou-se desenvolver uma tecnologia visando simplificar os métodos tradicionais para a determinação dos coeficientes de troca interfaciais, baseados em longas séries temporais obtidas a partir de respostas a perturbações transientes. O trabalho apresenta uma metodologia para a determinação do coeficiente global de transferência através da interface gás-líquido para um sistema em regime permanente. Esta técnica reúne vantagens significativas se comparada com os métodos clássicos baseados na resposta dos sistemas a estímulos transientes. Uma aplicação comparativa dos dois métodos é apresentada. O coeficiente global de transferência de calor entre a água e a atmosfera é determinado usando-se os dois métodos. Os primeiros ensaios consistiram no resfriamento transiente de uma massa líquida pré-aquecida, mantida sob diferentes condições de agitação em um tanque. As paredes e o fundo do tanque foram isolados termicamente, de modo a permitir trocas de calor apenas entre a superfície livre do líquido e o ar ambiente. O método alternativo baseia-se no balanço térmico em regime permanente; uma fonte térmica fornece uma potência constante à água, deslocando seu estado de equilíbrio térmico. O coeficiente de transferência de calor é determinado a partir das medidas da temperatura de equilíbrio da água (deslocada em função da fonte de calor), da temperatura do ar ambiente e da potência térmica da fonte. Esta técnica alternativa é aqui denominada método do regime permanente “MRP”. O método é aplicado neste trabalho apenas para a determinação do coeficiente de transferência de calor na interface, no entanto pode ser extrapolado com segurança, conforme detalhado na íntegra do artigo, para transferência de massa através da interface água-atmosfera. Os resultados obtidos com o novo método são compatíveis com os da metodologia clássica, validando assim o MRP. São apresentadas ainda no artigo algumas sugestões e limitações para a continuação dos trabalhos nesta linha, tanto em transferência de calor como de massa através da interface água-ar.*

Palavras chave: Engenharia ambiental, Processos de transporte, Fenômenos de transporte, Interface gás-líquido, Turbulência.

1. INTRODUÇÃO

Os processos de transferência interfaciais aqui considerados, são relativos ao transporte de calor ou massa através da interface ar-água, sendo de grande interesse para a engenharia ambiental e sanitária. O conhecimento sobre o processo de transferência de calor na interface água-atmosfera encontra grande aplicação no desenvolvimento de tecnologia voltada para a adequação térmica de águas residuárias decorrentes de atividades industriais (Franzotti,1998). Entre os processos de transferência de massa de interesse para o saneamento ambiental se incluem a absorção e dessorção através da superfície líquida, do oxigênio atmosférico e compostos orgânicos voláteis (Momesso, 1996). O mecanismo de transporte através da interface gás-líquido ou líquido-gás é quantificado por um parâmetro denominado coeficiente de transferência interfacial, aqui simbolizado por k (tempo^{-1}), que indica a velocidade do transporte.

Um modelo matemático representativo do fenômeno pode ser produzido a partir de uma formulação fundamentada nas leis de conservação (massa ou energia) além de outras relações subsidiárias. A solução da equação diferencial gerada pelo modelo permite o ajuste do parâmetro k , geralmente feito a partir de uma análise de regressão em que se ajusta uma curva teórica aos pontos obtidos experimentalmente (metodologia clássica). Em processos de transferência lentos, os recursos consumidos para a determinação de k , pela metodologia clássica, podem ser elevados devido ao longo tempo necessário para a realização dos ensaios transientes. Atuando para de diminuir o tempo e recursos para determinação de coeficientes de transferência interfacial, propõe-se neste artigo uma técnica simplificada se comparada com a metodologia clássica. O novo método é aqui denominado “Método do Regime Permanente” (MRP).

2. PRINCÍPIO DO MÉTODO

O método do regime permanente pode ser aplicado na determinação de coeficientes de transferência tanto de calor quanto de massa.

A idéia do método teve como origem um trabalho publicado por Giorgetti et al (1996), no qual os autores investigaram o processo de transferência de massa através da interface ar-água. Examinou-se a reoxigenação superficial em água limpa e água residuária sob condições de agitação induzida por um rotor. A concentração de oxigênio dissolvido na massa líquida contida no tanque foi previamente reduzida, acompanhando-se a sua regeneração. A Figura 1 ilustra a curva de reoxigenação em ambos casos:

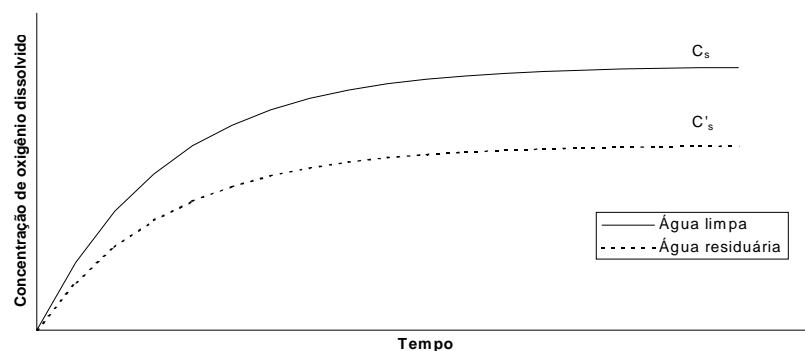


Figura 1. Representação esquemática do processo de reoxigenação em água limpa e água residuária

Observa-se que o valor de equilíbrio da concentração de oxigênio dissolvido para água residuária é menor que o valor para água limpa. Isto ocorre devido ao sumidouro representado pelo consumo de oxigênio pelos microrganismos presentes na água residuária.

O MRP é desenvolvido com base nesta observação. A existência de uma fonte ou sumidouro adicional, além da interface superficial, determina um deslocamento, para cima ou para baixo, respectivamente, do patamar de equilíbrio. O valor do coeficiente de transferência k pode ser calculado em função do deslocamento no patamar de equilíbrio não sendo necessário o acompanhamento do processo ao longo da fase não permanente, motivo pelo qual é chamado de método do regime permanente. Como o deslocamento no patamar é causado pela fonte ou sumidouro adicional, sua contribuição deve ser também perfeitamente quantificada.

Pode-se prever a provável ordem de grandeza do novo patamar de equilíbrio que a perturbação (fonte ou sumidouro) causará no fenômeno. O tempo de ensaio necessário para o cálculo do coeficiente k pode ser drasticamente reduzido, se o meio se encontrar próximo ao patamar de equilíbrio perturbado.

Os fatores operacionais induziram a realização de ensaios, em escala de laboratório, de transferência de calor ao invés de transferência de massa. Os ensaios realizados para verificar a viabilidade do emprego do MRP, consistiram no resfriamento transiente de uma massa líquida pré-aquecida, mantida sob condições de agitação. A técnica MRP foi empregada utilizando-se fonte de calor.

No resfriamento sem fonte de calor a temperatura da água tende para o valor do ar ambiente enquanto que no resfriamento com fonte de calor o novo patamar é proporcional à magnitude da fonte utilizada. A Figura 2 ilustra os dois processos.

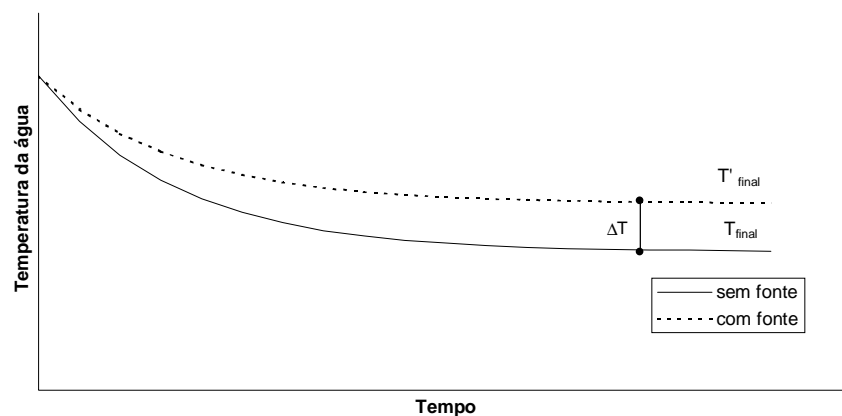


Figura 2. Resfriamento de uma massa líquida com e sem fonte de calor.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Os ensaios foram realizados no Laboratório de Fenômenos de Transportes do Departamento de Hidráulica e Saneamento da Escola de Engenharia de São Carlos, USP.

O sistema para armazenar água é composto por um tanque cilíndrico de aço inoxidável e um agitador mecânico. O agitador usado para promover a agitação é um rotor axial aberto, tipo turbina com 4 pás de aço inoxidável. O tanque com agitação hidrodinâmica foi projetado e construído por Barbosa (1989), com 0,61m de diâmetro e 0,41m de altura. O tanque possui estatores (baffles), com forma de placas radiais destinados a inibir o movimento principal de circulação induzido pelo rotor. O eixo do agitador é acoplado a um motor elétrico que é apoiado em uma estrutura suporte.

Para que não ocorresse perda de calor através das paredes e do fundo do tanque foi feito um isolamento térmico utilizando-se lã de vidro aplicada externamente às paredes e ao fundo do tanque. O isolamento térmico é complementado com placas de poliuretano expandido, com 0,05m de espessura, fixadas na estrutura suporte formando quatro paredes. As juntas das placas são vedadas com cola de silicone. O espaço vazio existente entre a lã de vidro e as placas é preenchido com bolinhas também de poliuretano expandido. O sistema de isolamento é completado com tampas horizontais de poliuretano expandido. O esquema do isolamento pode ser visualizado na Figura 3. O equipamento foi montado dentro de uma sala com 12m² de área, climatizada com um aparelho de ar condicionado que mantinha a temperatura do ar ambiente em aproximadamente 22±1°C.

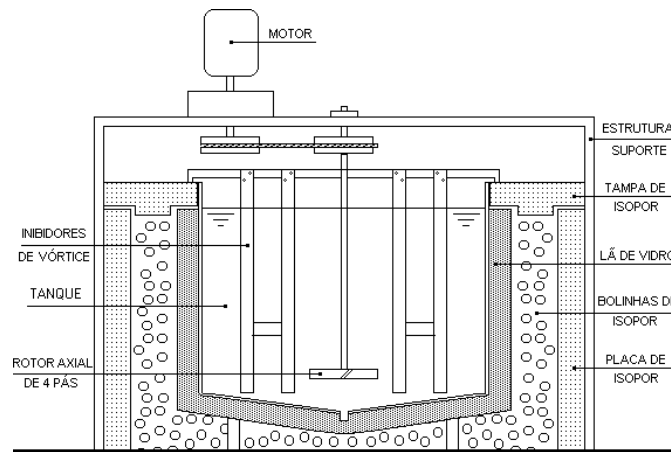


Figura 3. Montagem experimental

Para cada ensaio, enche-se o tanque com água até o nível correspondente a 0,112 m³. A velocidade de rotação do agitador é ajustada e a água é aquecida acima de 50°C. O sistema de aquecimento é retirado e o subsequente resfriamento da água é monitorado coletando-se as temperaturas em diversos pontos do tanque durante um intervalo de tempo de 20 horas. Um ventilador posicionado ao lado do tanque provoca um escoamento de ar paralelo à superfície de água, promovendo a convecção forçada de calor.

Dados referentes ao resfriamento da água são coletados sob oito condições de turbulência, correspondentes a oito velocidades de rotação diferentes, no intervalo de 50 a 251rpm. São executados dois conjuntos distintos de experimentos. No primeiro conjunto os ensaios consistem apenas no resfriamento da água perdendo calor através da interface água-ar. No segundo conjunto, o estado final de equilíbrio é deslocado introduzindo-se no sistema uma fonte de calor, o que faz com que a temperatura final seja um valor mais elevado do que no resfriamento dito natural. A fonte de calor é provida por uma resistência elétrica imersa na água. São utilizadas três potências na resistência (106, 240 e 270W) sob as mesmas oito condições de agitação turbulenta, totalizando 24 ensaios. No total têm-se 32 ensaios. Os ensaios realizados sem fonte de calor são aqui chamados resfriamento transiente natural enquanto os demais são denominados resfriamento transiente com fonte de calor.

Para se medir a temperatura foi utilizado um sistema automatizado de aquisição de dados cujo sensores térmicos são semicondutores modelo Philips KTY84-100. Foram medidas as temperaturas do ar ambiente, da água e do lado de dentro e de fora da chapa de aço do tanque.

Para se determinar o valor da potência fornecida pela resistência elétrica, utilizou-se um multímetro digital para medidas de tensão e corrente elétrica. O produto destas duas grandezas quantifica a potência elétrica dissipada no interior do sistema.

4. MODELO MATEMÁTICO

A elaboração de um modelo matemático descritivo do fenômeno de resfriamento transiente natural baseia-se na primeira lei da termodinâmica. A energia térmica do sistema é trocada com o ambiente através da superfície líquida, principalmente por três mecanismos paralelos: convecção forçada, radiação e calor latente na evaporação como ilustra a Figura 4.

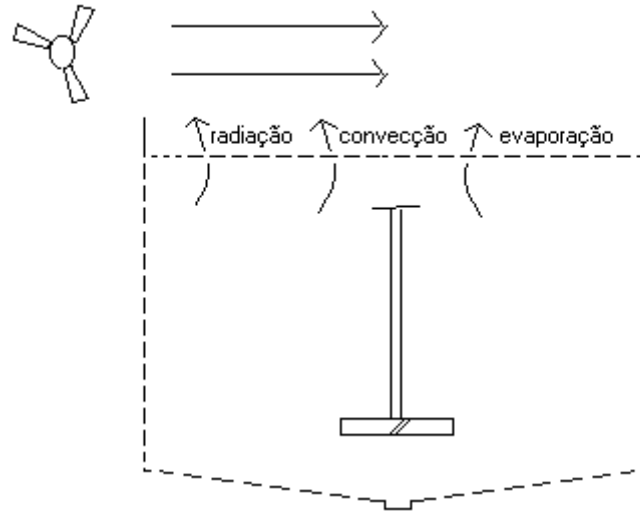


Figura 4. Mecanismos de transferência de calor e energia

No primeiro caso, a taxa temporal de transferência de calor por convecção ($\dot{Q}_{convecção}$) é proporcional à diferença entre a temperatura da superfície da água e a temperatura do ar ambiente, sendo expressa pela lei do resfriamento de Newton:

$$\dot{Q}_{convecção} = h_m \cdot A_s \cdot (T - T_a) \quad (W) \quad (1)$$

Em que: h_m é o coeficiente de película médio ($W/m^2\text{°C}$), A_s é a área superficial (m^2), T é a temperatura da água (°C) e T_a é a temperatura do ar ambiente (°C)

No segundo caso, a taxa temporal de transferência de calor por radiação ($\dot{Q}_{radiação}$) pode ser expressa pela lei de Stefan-Boltzmann:

$$\dot{Q}_{radiação} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s (\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4) \quad (W) \quad (2)$$

Em que: ε é a emissividade da água e σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($W/m^2\text{°C}$)

A Eq.2 prevê que a $\dot{Q}_{radiação}$ é proporcional a diferença ($\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4$), mas:

$$(\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4) = (\bar{T}^2 - \bar{T}_a^2) \cdot (\bar{T}^2 + \bar{T}_a^2) = (\bar{T} - \bar{T}_a) \cdot (\bar{T} + \bar{T}_a) \cdot (\bar{T}^2 + \bar{T}_a^2) \quad (3)$$

Para a faixa de temperatura da pesquisa (20 a 50 °C) têm-se os seguintes valores extremos para ($\bar{T}^4 - \bar{T}_a^4$):

$$20\text{°C}(293K) \Rightarrow (\bar{T} - \bar{T}_a) \cdot (293 + 293) \cdot (293^2 + 293^2) = (\bar{T} - \bar{T}_a) \cdot 1,006 \cdot 10^8$$

$$50\text{°C}(323K) \Rightarrow (\bar{T} - \bar{T}_a) \cdot (323 + 293) \cdot (323^2 + 293^2) = (\bar{T} - \bar{T}_a) \cdot 1,171 \cdot 10^8$$

Portanto, dada a pequena variabilidade relativa de temperatura nos experimentos, a taxa de radiação (Eq.2) entre os dois extremos da faixa de temperatura em questão pode ser escrita como:

$$\dot{Q}_{radiação} = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_s \cdot (\bar{T} - \bar{T}_a) \cdot (1,089 \pm 0,083) 10^8$$

Ou seja, utilizando-se o valor médio de $1,089 \cdot 10^8$ a variação em torno dele é menor ou igual a 7.62%. Como esta variação é pequena supõe-se o termo $(\bar{T} + \bar{T}_a) \cdot (\bar{T}^2 + \bar{T}_a^2)$ constante.

Os outros termos (ϵ , σ , A_s) também são constantes, o que torna possível dizer que a troca por radiação pode ser expressa como uma função da diferença ($T-T_a$).

No terceiro caso como a taxa de evaporação é necessariamente proporcional ao sobreaquecimento da água com relação à temperatura ambiente faz-se a hipótese que a taxa temporal de transferência de calor $\dot{Q}_{evaporação}$ seja proporcional a diferença entre a temperatura da interface e a do ar ambiente.

Considera-se que k_T como sendo o coeficiente global de transferência de calor, ou seja, k_T é relativo a todos os mecanismos de troca de calor e energia considerados relevantes no processo: convecção forçada, radiação e evaporação (pois todos são proporcionais a diferença entre a temperatura da superfície líquida e do ar ambiente). A condução de calor através das paredes do tanque assim como o trabalho fornecido pelo agitador foram desprezados com base nos dados experimentais. Esses dados assim como maiores detalhes da modelagem são encontrados em Silveira (1999).

Então

$$\frac{dT}{dt} = -k_T \cdot (T - T_a) \quad (4)$$

A solução analítica clássica da equação 4, para uma temperatura inicial T_i , é:

$$T = (T_i - T_a) \cdot e^{-k_T t} + T_a \quad (5)$$

A modelagem para o fenômeno do resfriamento transiente com fonte de calor segue a mesma formulação do resfriamento natural com a adição de um termo (fonte) constante que não depende da temperatura nem do tempo. Sendo $P(W)$ a potência fornecida pela resistência, $m(kg)$ a massa de água e $C (W.s/kg^\circ C)$ o calor específico da água, a equação gerada pode ser apresentada na forma:

$$\frac{dT}{dt} + k_T \cdot (T - T_a) = \frac{P}{m \cdot C} \quad (6)$$

E sua solução é:

$$T = \left(T_i - T_a - \frac{P}{m \cdot C \cdot k_T} \right) \cdot e^{-k_T t} + \frac{P}{m \cdot C \cdot k_T} + T_a \quad (7)$$

Observando-se as soluções dadas pelas equações 5 e 7, pode se concluir que:

Quando $t \rightarrow \infty$, o termo $e^{-k_T t}$ tende a zero e a temperatura da água tende para uma temperatura de equilíbrio T_e . No resfriamento natural esta temperatura T_e é igual a temperatura do ar ambiente T_a , enquanto que no resfriamento com fonte de calor é igual a:

$$T_e = T_a + \frac{P}{m \cdot C \cdot k_T} \quad (8)$$

A diferença entre as temperaturas de equilíbrio com fonte de calor e no ensaio natural é igual ao termo $P/m \cdot C \cdot k_T$.

Isolando-se k_T da Equação 8 têm-se:

$$k_T = \frac{P}{m \cdot C \cdot (T_e - T_a)} \quad (9)$$

Como o calor específico e a massa da água são conhecidos e os outros valores são medidos, em condições de regime permanente, o valor de k_T é calculado.

5. RESULTADOS

Os valores para o coeficiente global de transferência de calor $k_T (h^{-1})$ obtidos pela metodologia clássica, são apresentados na Figura 5, onde são apresentados em função da potência específica dissipada “ ϵ ” definida pelo quociente da potência gasta na agitação da água “ P ” pelo volume de líquido “ V ”, ($\epsilon = P/V$). A potência dissipada é quantificada a partir do número de potência, constante para as velocidades de rotação deste trabalho, e igual a 1

(Stamato, 1993). Nestas condições, a potência dissipada é proporcional ao cubo da velocidade de rotação ou seja, $P = \rho \cdot D^5 \cdot N^3$, em que D é o diâmetro do rotor (14.6cm).

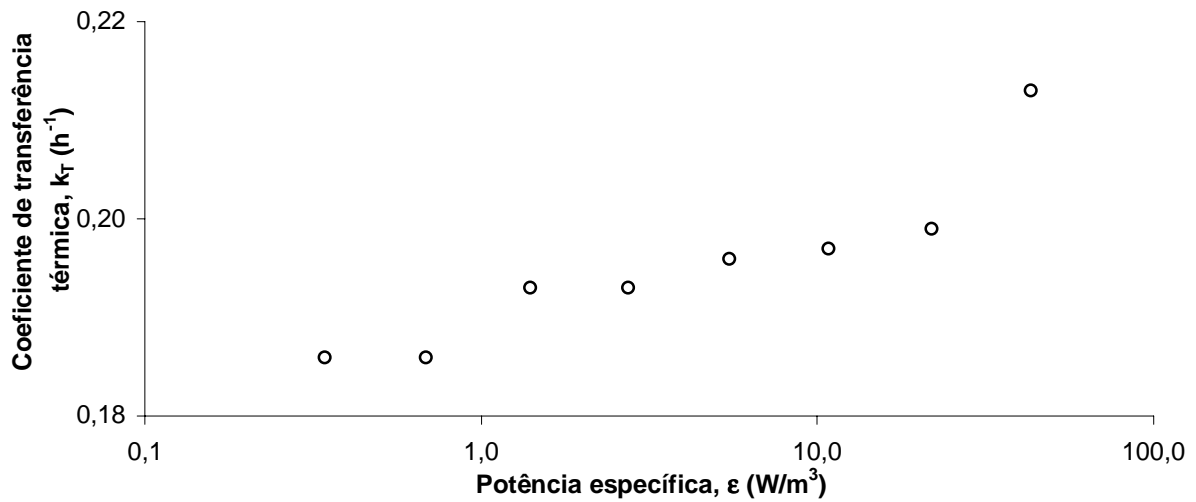


Figura 5. Valores de k_T obtidos pela metodologia clássica

Os valores obtidos pelo MRP são mostrados na Figura 6 juntamente com os valores da metodologia clássica, o que permite uma comparação entre os métodos. Os valores da metodologia clássica estão unidos por uma linha contínua apenas para facilitar a visualização. São apresentados os resultados do MRP obtidos com a adição de três fontes distintas de calor.

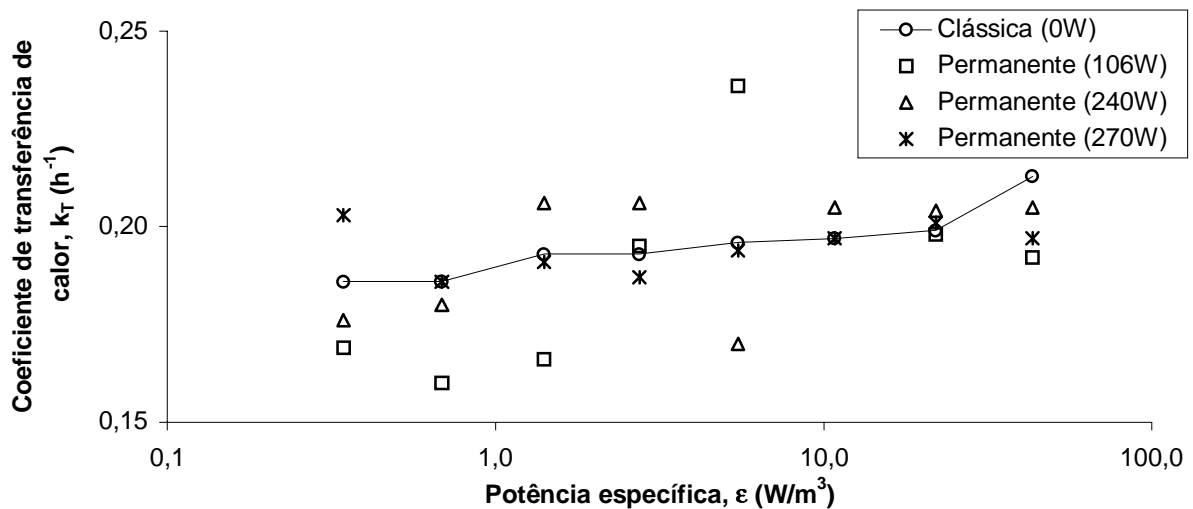


Figura 6. Comparação entre os valores de k_T obtidos pela metodologia clássica e MRP em função da potência específica

O valor de k_T é mostrado na figura 7 em função da intensidade da fonte de calor, quantificada pela potência dissipada na resistência elétrica.

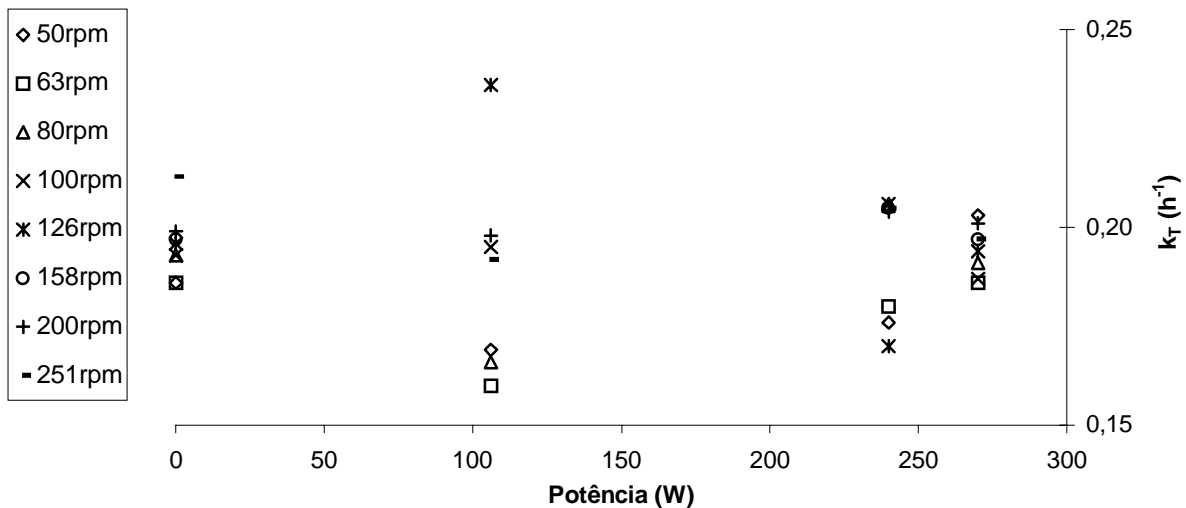


Figura 7. Comparação entre os valores de k_T obtidos pela metodologia clássica e MRP em função da fonte de calor

A Tabela 1 mostra os valores de k_T representados nas figuras 6 e 7.

Tabela 1. Valores de k_T (h^{-1}) obtidos pela metodologia clássica e pelo MRP para três potências

Potência Específica ϵ (W/m^3)	Velocidade de rotação (rpm)	Metodologia clássica	MRP (106W)	MRP (240W)	MRP (270W)
0,3	50	0,186	0,169	0,176	0,203
0,7	63	0,186	0,160	0,180	0,186
1,4	80	0,193	0,166	0,206	0,191
2,7	100	0,193	0,195	0,206	0,187
5,5	126	0,196	0,236	0,170	0,194
10,8	158	0,197	0,377	0,205	0,197
21,9	200	0,199	0,198	0,204	0,201
43,4	251	0,213	0,192	0,205	0,197

6. DISCUSSÕES E CONCLUSÕES

Pode-se observar na figura 6, uma tendência crescente do valor de k_T com o aumento da velocidade de rotação. No entanto, calculando-se o valor médio para os extremos do coeficiente k_T , pode se dizer que a variação do coeficiente para todas as velocidades de rotação é igual a $0,199 \pm 0,0135$ (h^{-1}), ou seja, a diferença em torno do valor médio é 6.8%. Este fato sugere que a influência da agitação sobre o valor do coeficiente k_T , na faixa de 50 a 251rpm, é pequena.

A relação entre os coeficientes de transferência global de transferência de calor para as velocidades de rotação de 251 e 50rpm é representado por R, em que:

$$R = \frac{k_{T,251}}{k_{T,50}} = \frac{0,213}{0,186} = 1,14 \quad (10)$$

Os resultados obtidos por Barbosa (1989, p.153) para o coeficiente de reaeração k_2 (transferência de oxigênio), obtidos na mesma configuração experimental, indicam que para a mesma faixa de velocidade de rotação, o valor de R é igual a 7,6.

O aumento do coeficiente k_2 em função do nível de agitação no tanque verificado em Barbosa (1989), como explica a teoria dos dois filmes (Whitman, 1923), se deve à diminuição da resistência oferecida pelo filme líquido. Essa observação sugere que, em aumentando-se a agitação, o processo de transferência do oxigênio pode evoluir significativamente para uma situação controlada pela fase líquida.

Este fato não é verificado na transferência de calor aqui estudada, devido ao baixo valor de R (1,14) se comparado ao valor obtido em Barbosa (1989). Essa observação permite concluir que, para o intervalo de agitação investigado, ao contrário da transferência de oxigênio, o processo de transferência de calor parece ser governado principalmente pelas características do filme gasoso.

Observa-se ainda na figura 6 que os valores de k_T apresentam menor dispersão nos maiores níveis de agitação (200 e 251rpm).

Os valores de k_T obtidos pelo MRP estão distribuídos em torno dos valores da metodologia clássica com um erro máximo relativo de $\pm 10\%$

Do gráfico apresentado na figura 7 a conclusão mais relevante refere-se à diminuição da dispersão obtida com o aumento da potência na resistência. Os dados experimentais do resfriamento transiente com fonte de calor sugerem que os valores da temperatura de equilíbrio da água podem não ter sido atingidos para a potência de 106W. Uma amostra deste fenômeno observado é visualizada no gráfico da figura 8, para ensaios típicos, em que a tangente horizontal para o tempo máximo de ensaio só é efetivamente verificada para as potências de 240 e 270W. Isto indica claramente que a temperatura de equilíbrio da água utilizada para calcular k_T pelo MRP (Equação 9) pode não ter sido efetivamente medida – para a potência de 106W - afetando os resultados.

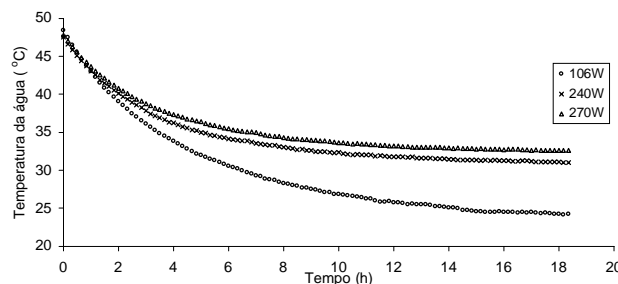


Figura 8. Ensaios típicos do resfriamento com fonte de calor

Considerando todos os resultados apresentados, inclusive para a potência de 106 W, o MRP apresentou-se bastante eficiente para a determinação de k_T . O erro máximo de 10% foi considerado baixo, para um trabalho inicial.

Este trabalho sugere o uso de potências mais elevadas na continuação de trabalhos nesta linha, pois o equilíbrio da água é atingido mais rapidamente, e conseqüentemente a temperatura medida aproxima-se mais do valor real.

A aplicação do MRP para a determinação do coeficiente de transferência de massa se revela perfeitamente possível com a adição ou sumidouro da massa e está sendo estudada pelos autores na investigação da transferência de oxigênio na interface água-atmosfera.

Devem ser feitas investigações preliminares sobre a magnitude da fonte ou sumidouro aplicada no método do regime permanente, garantindo-se, assim, a qualidade do cálculo dos coeficientes de transferência.

7. AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP, pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Barbosa Jr, A. R. - Desenvolvimento de metodologia para a determinação de coeficiente de reaeração dos escoamentos naturais da água com o emprego de traçador gasoso. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1989.
- Danckwerts, P. V. – Significance of Liquid-Film Coefficients in Gas Absorption. *Industrial and Engineering Chemistry*, 1951. V.43, N.6, P.1460-67, 1951.
- Dewulf, J., Heireman, B., Langenhove, H. V. - The Air/Water Exchange of Volatile Organic Compounds from Water in the Transient and Turbulent Regime. *Water Resources Vol.* 32 No. 7 pp 2106-2112. Belgium, 1998.
- Doebelin, E.O. - *Measurement Systems: Application and Design*. McGraw-Hill. , 1990
- Franzotti, C. L. - Desenvolvimento de instrumentação automática de medida de temperatura e sua utilização em modelo reduzido de lagoa de resfriamento. Tese de doutorado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1998.
- Giorgetti, M.F., Côrtes, S.G.C., Manzolli, I.M., Roma, W.N.L., - Reoxygenation and deoxygenation of industrial waste water in a batch reactor – experiments and modeling. 1996 - Comunicação pessoal.
- Gulliver, J. S. – Introduction to Air-Water Mass Transfer. Second International Symposium on Gas Transfer at Water Surfaces. American Society Of Civil Engineering. Minneapolis, 1991.
- Momesso, A. M. - Absorção e dessorção de gases através da interface ar-água em sistemas de agitação mecânica. Dissertação de mestrado apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, 1996.
- Schulz, H. E. - Análise de uma Formulação Tentativa para Processos de Transferência em Escoamentos Turbulentos. XI Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, São Paulo, SP, 1991
- Schulz, H. E. - Investigação do Mecanismo de Reoxigenação da Água em Escoamento e sua Correlação com o Nível de Turbulência Junto a Superfície. Tese de Doutorado Apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, SP, 1989.
- Schulz, H. E. - Transferência de Gases em Superfícies Líquidas Altamente Agitadas . III Encontro Nacional De Ciências Térmicas Encit, Itapema, SC, 1990.
- Silveira, A. - Desenvolvimento de metodologia para determinação do coeficiente de transferência térmica na interface água-ar. Dissertação de Mestrado, Escola de Engenharia de São Carlos, EESC-USP, 1999.
- Silveira, P. E. - Desenvolvimento de Instrumentação para Medida de Deformações na Superfície de um Líquido. Dissertação de Mestrado Apresentada à Escola de Engenharia de São Carlos EESC-USP, SP, 1997.
- Stamato, G. C - Determinação Da Potência Introduzida Em Um Reator Por Um Agitador Rotativo. XII Congresso de Iniciação Científica e Tecnológica em Engenharia, CICTE, EESC-USP, São Carlos, SP, 1993.
- Whitman, W. E. – The Two-Film Theory of Gas Absorption. *Chemical and Metallurgical Engineering*. V.29,n.4, pp 146-148, 1923.

Heat and Mass Transfer at Air-Water Interface

Abstract. The general objective of the paper is the development of a novel methodology for the determination of global heat and mass transfer coefficients at the water-atmosphere interface.

A different technique was sought to simplify the traditional method for the determination of surface exchange coefficients, based upon lengthy temporal series registered as responses to transient inputs. The paper presents a methodology for the determination of global exchange coefficients at a gas-liquid interface for a steady state system. This technique shows palpable advantages when compared to the classical methods based on the response to transient stimuli. A comparative application of the two methods is presented. The global heat transfer coefficient between the water and the atmosphere is determined with the two methods. The first tests were done on the transient cooling of a pre-heated water body, kept at different stirring conditions in a tank. The walls and the bottom of the tank were thermally insulated, to permit heat exchange only between the water surface and the air. The alternate method is based on the thermal balance of the system at steady state; a heat source provides a constant heat power to the water, shifting its equilibrium state. The heat transfer coefficient is determined from the measured values of the water equilibrium temperature (shifted by the heat source), the air temperature, and heat source power. This alternate technique is referred to as steady state method "SSM." The SSM is applied in this work only for the determination of heat transfer coefficient at the interface, but can be extrapolated with confidence, as detailed in the paper, for the mass transfer through the water-atmosphere interface. The results obtained with the new method are compatible with the ones with the classical methodology, validating, thus, the SSM. Suggestions and limitations are pointed out in the paper for the continuation of research in this area, both for heat transfer as well as for mass transfer through the water-air interface.

Key-words: Environmental engineering, Transport process, Transport phenomena, Air-Water interface, Turbulence.

Artigo publicado no Encontro Nacional de Ciências Térmicas, ENCIT 2000.

Autores: Alexandre Silveira e Marcius Giorgetti

Título: Transferência de Calor e Massa na Interface Água-Atmosfera

Assunto: Publicação dos dados referentes à dissertação de mestrado do Eng. Alexandre Silveira intitulada “Desenvolvimento de Metodologia para “Determinação do Coeficiente de Transferência Térmica na Interface Água-Ar” – Método do Regime Permanente

Outubro de 2000
Porto Alegre – Rio Grande do Sul – Brasil