

**Modelamento Térmico de uma Torre de Resfriamento Híbrida
e Comparação com Resultados Experimentais de um Protótipo
EVR2021 - 030**

Leticia Z. Klaiber ¹, Marco Paiva ^{1,*}, Felipe A. Sinigoi ¹, Lizandra F. dos Santos ¹

¹ Instituto Mauá de Tecnologia

São Caetano do Sul, São Paulo, Brasil, CEP: 09580 900

* Autor para correspondência: marco.paiva@maua.br

Resumo

O trabalho apresenta um modelo matemático desenvolvido com a finalidade principal de realizar o dimensionamento termofluido simplificado de uma torre de resfriamento híbrida. São apresentadas todas as premissas admitidas assim como as equações utilizadas, as quais foram implementadas no programa acadêmico EES para a simulação numérica. Para validação do modelo matemático, foi construído um protótipo que permitiu avaliar a precisão do modelo matemático desenvolvido.

Palavras-chave: torre de resfriamento, torre híbrida, modelagem matemática.

Introdução

As torres de resfriamento e os condensadores evaporativos são sistemas frequentemente utilizados na rejeição de calor para o meio ambiente. O presente trabalho apresenta os principais aspectos e resultados de um estudo teórico e experimental realizado para uma torre de resfriamento de circuito misto, a qual opera de modo equivalente a um condensador evaporativo. A principal diferença é que o fluido resfriado é água contaminada.

Utilizadas em centrais de ar condicionado e diversos processos industriais, as torres de resfriamento são conhecidas como equipamentos para rejeição de calor de sistemas de potência e de refrigeração. A operação é realizada por meio da transferência de calor e massa e o desempenho da torre depende do projeto/tecnologia utilizados e a forma como os fluidos são distribuídos.

A demanda industrial ampliou a variedade de torres de resfriamento atualmente existentes, sendo possível classificá-las e selecioná-las de acordo com a maneira em que ocorre a transferência de calor no circuito, ou seja, circuito aberto, circuito fechado ou circuito híbrido.

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo matemático de uma torre de resfriamento híbrida e a simulação numérica por meio do software EES (F-Chart, 2018). Existem processos industriais onde fluidos contaminados precisam ser resfriados, em que uma torre de resfriamento comum não pode ser utilizada. Como as torres de circuito fechado (*dry coolers*) limitam a temperatura de resfriamento à temperatura de bulbo seco do ar ambiente, as torres de resfriamento híbridas são uma solução interessante quando é desejável obter temperaturas menores.

Metodologia

O modelo matemático a seguir apresentado tem por objetivo determinar o número de passes de um tubo (uma serpentina) necessários para atingir uma determinada variação de temperatura entre a entrada e a saída do fluido de

processo. Em um equipamento industrial, a capacidade real requerida será alcançada mediante um número maior de tubos.

Para a criação do modelo foram admitidos os seguintes parâmetros: 1) temperatura de entrada e saída da água contaminada: respectivamente de 40°C e 35°C; 2) comprimento de cada passe da serpentina: 800mm mais 100mm de folga lateral; 3) tubo classe 1, com diâmetro externo de 15mm e espessura de 0,7mm; 4) o distanciamento entre passes é de 24,6 mm, para uma formação adequada do filme da água de resfriamento (CHEN, ZHANG e RUNPING, 2014); 5) propriedades de entrada do ar externo: conforme a norma ASHRAE, com dados do aeroporto de Congonhas, foram consideradas TBS de 27,7°C e TBU de 23,2°C.

A modelagem matemática desenvolvida considera o transitório inicial do processo, no qual a temperatura de entrada da água do *spray* que forma o filme ao redor do tubo é admitida igual à TBS do ar ambiente. Na simulação matemática, essa temperatura varia ao longo do tempo até obter-se a condição de regime permanente, que é aquela que realmente interessa no estudo.

Nas equações a seguir apresentadas, as variáveis que indicam as propriedades do fluido são: C_p , o calor específico a pressão constante; ρ , a massa específica; k , a condutibilidade térmica; μ , a viscosidade dinâmica; Pr , o número de Prandtl. Os adimensionais, Re e Nu são, respectivamente, o número de Reynolds e o de Nusselt. Os índices esclarecem a qual fluido eles se aplicam em cada equação. A variável $\dot{m}$ indica vazão mássica.

Foi admitido no modelo matemático uma relação $L/G = 0,5$, sendo L a vazão mássica de água e G a vazão mássica do ar. Em seguida:

$$\dot{m}_{ar} = A_{torre} \cdot V_{ar} \cdot \rho_{ar} \quad (1)$$

$$A_{torre} = (comp_{tubo} + folga) + (n\acute{u}m_{serpentina} \cdot (\phi_{ext;tubo} + dist_{fileiras})) \quad (2)$$

onde, A_{torre} representa a área da seção transversal de escoamento do ar, V_{ar} , a velocidade do ar no centro da torre, $comp_{tubo}$, o comprimento de cada passe da serpentina, $folga$, a folga lateral entre a tangente da curva dos tubos e a parede interna da torre, $n\acute{u}m_{serpentina}$, o número de serpentinas utilizadas na torre, $\phi_{ext;tubo}$, o diâmetro externo dos tubos e $dist_{fileiras}$, a distância entre os passes da serpentina. Por meio da relação L/G , é possível obter a vazão mássica de água do filme, $\dot{m}_{filmetotal}$, necessária para criar um filme contínuo ao redor dos tubos.

$$\dot{m}_{filmetotal} = \dot{m}_{ar} \cdot 0,5 \quad (3)$$

Os dados de entrada são indicados na Figura 1:

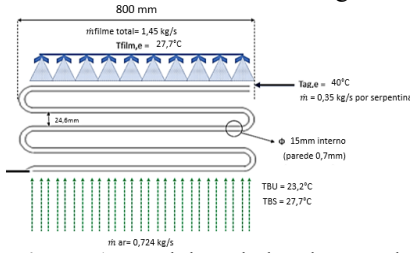


Figura 1: Modelo e dados de entrada

Foi utilizado o software *EES - Engineering Equation Solver* (F-Chart, 2018) para implementação do modelo matemático proposto e realização de simulações numéricas.

O modelo matemático proposto consiste basicamente em analisar a transferência de calor e/ou massa do fluido contaminado sob resfriamento, que escoar no interior da serpentina de cobre para a água de resfriamento, e desta para o ar que escoar em contracorrente à água contaminada e à água de resfriamento. O objetivo é determinar o número de passes necessários para produzir um resfriamento de 5°C na água contaminada. A análise inicia-se pelo modelamento do processo para um elemento de comprimento Δx da serpentina (foi considerado um valor de 10 mm no estudo realizado), conforme mostrado na Figura 2.



Figura 2: Ilustração do elemento x

A Figura 3 é uma representação do elemento Δx em corte longitudinal.

A análise térmica consiste na avaliação do escoamento do interno e do escoamento externo, conforme Figura 4, utilizando as equações de transferência de calor e massa e os balanços de energia detalhados a seguir.

Para cada elemento Δx , os dados de entrada são: $T_{ag,e}$ (temperatura de entrada da água contaminada), $H_{ar,e}$ (entalpia do ar na entrada do elemento, obtida pelas temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido da região,

conforme citado anteriormente) e $T_{film,e}$ (temperatura de entrada da água do filme). Como variáveis calculadas, tem-se: $T_{ag,s}$ (temperatura de saída da água contaminada), $H_{ar,s}$ (entalpia do ar na saída), $T_{ar,s}$ (TBS de saída do ar), $w_{ar,s}$ (umidade absoluta de saída do ar) e $T_{film,s}$ (temperatura de saída do filme).

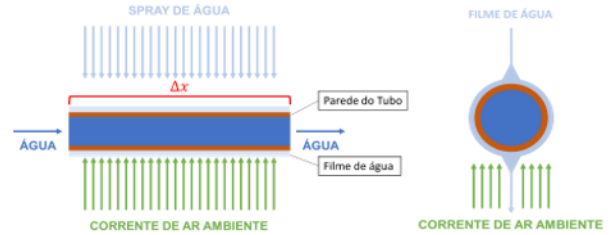


Figura 3: Fluxos no elemento x

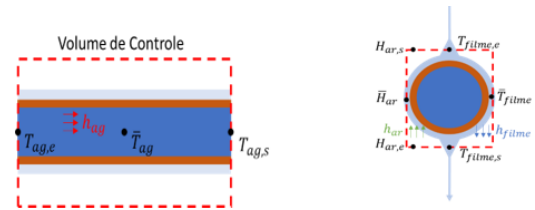


Figura 4: Variáveis no elemento x

O cálculo inicia-se pela primeira passe da serpentina e determina-se $T_{ag,s}(x)$, $T_{film,s}(y)$, $T_{ar,s}(y)$ e $w_{ar,s}(y)$ do primeiro passe, sendo x a posição ao longo do comprimento do tubo e y a variação no sentido vertical da torre. A seguir, passa-se aos cálculos do segundo passe, e assim sucessivamente, até se obter $T_{ag,s} = 35^\circ\text{C}$.

As equações de transferência de calor e massa são apresentadas a seguir. A equação (4) refere-se à transferência de calor da água contaminada para a água de resfriamento (filme). A equação (5) refere-se à transferência combinada de calor e massa entre o filme e o ar. A resistência térmica da equação (4) é a combinação em série das resistências térmicas: convecção entre a água interna e o tubo, condução no tubo e convecção entre o tubo e o filme.

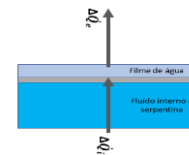


Figura 5: Fluxo de calor do tubo

$$\Delta \dot{Q}_i = \frac{\bar{T}_{ag} - \bar{T}_{film}}{R_{ag;film}} \quad (4)$$

$$\Delta \dot{Q}_e = h_{conv;ar} \cdot \Delta A_{ar;film} \cdot \left[\frac{\bar{H}_i - \bar{H}_{ar}}{c_{par;umido}} \right] \quad (5)$$

onde, na equação 4, para um trecho elementar: $\bar{T}_{ag}$, é a temperatura média da água contaminada; $\bar{T}_{film}$ é a

temperatura média do filme; e $\Delta\dot{Q}_i$ é a taxa de transferência de calor elementar entre água contaminada e o filme.

Na equação 5, para um trecho elementar, $\bar{H}_i$ e $\bar{H}_{ar}$ são as entalpias específicas médias do ar, respectivamente, na interface com o filme e na corrente livre; $h_{conv;ar}$ é o coeficiente convectivo do ar; e $\Delta\dot{Q}_e$ é a taxa de transferência de energia por calor e massa (evaporação da água do filme) entre o ar e o filme.

As resistências térmicas utilizadas para o cálculo de $R_{ag,film}$ são apresentadas a seguir. Convecção interna ao tubo:

$$R_{ag} = \frac{1}{h_{conv;ag} \cdot \Delta A_{int;t}} \quad (6)$$

Condução através da parede do tubo de paredes finas:

$$R_t = \frac{e_t}{k_t \cdot \left[\frac{\Delta A_{int;t} + \Delta A_{ext;t}}{2} \right]} \quad (7)$$

Convecção entre a parede do tubo e o filme de água de resfriamento:

$$R_{film} = \frac{1}{h_{conv;t,film} \cdot \Delta A_{ext;t}} \quad (8)$$

A associação destas resistências térmicas configuradas em série:

$$R_{ag,film} = R_{ag} + R_t + R_{film} \quad (9)$$

O coeficiente convectivo entre o ar e o filme:

$$h_{conv;ar} = \frac{k_{ar} \cdot Nu_{ar}}{\phi_{ext;t}} \quad (10)$$

Nu_{ar} pode ser calculado por meio da equação (11) a seguir. Os coeficientes c e n , denominados constantes de Grimison, podem ser obtidos em tabela sempre publicadas em livros texto dos cursos de transferência de calor.

$$Nu_{ar} = c \cdot Re_{max,ar}^n \quad (11)$$

As constantes c e n dependem de L_T - distância entre fileiras e L_L - distância entre os passes da serpentinas.

$$L_T = Dist_{fileiras} + \phi_{ext;t} \quad (12)$$

$$L_L = Passo + \phi_{ext;t} \quad (13)$$

O coeficiente L_D pode ser assim determinado:

$$L_D = \sqrt{L_L^2 + \left(\frac{L_T}{2}\right)^2} \quad (14)$$

O número de Reynolds para o escoamento do ar:

$$Re_{escar} = \frac{\rho_{ar} \cdot V_{max,ar} \cdot \phi_{ext;t}}{\mu_{ar}} \quad (15)$$

A determinação da velocidade máxima para o escoamento de ar, $V_{max,ar}$, é feito da seguinte forma:

$$a = 2 \cdot (L_D - \phi_{ext;t}) \quad (16)$$

$$b = Dist_{fileiras} \quad (17)$$

Se $a \geq b$, utiliza-se a equação (18):

$$V_{max,ar} = \frac{V_{ar} \cdot L_T}{(L_T - \phi_{ext;t})} \quad (18)$$

Se $a < b$, utiliza-se a equação (19):

$$V_{max,ar} = \frac{V_{ar} \cdot L_T}{2 \cdot (L_T - \phi_{ext;t})} \quad (19)$$

Para avaliar o modo de escoamento do fluido no interior da serpentina, utiliza-se:

$$Re_{agua} = \frac{\rho_{agua} \cdot V_{agua} \cdot \phi_{int;t}}{\mu_{agua}} \quad (20)$$

Para escoamento laminar, o número de Nusselt é igual a 4,364. Para o caso de escoamento turbulento, é necessário utilizar a equação de Dittus-Boelter:

$$Nu_{agua} = 0,023 Re_{agua}^{0,8} Pr_{agua}^{0,3} \quad (21)$$

Com o do número de Nusselt definido é possível obter o valor do coeficiente convectivo da água contaminada:

$$h_{conv;agua} = \frac{k_{agua} \cdot Nu_{agua}}{\phi_{int;tubo}} \quad (22)$$

Para $h_{conv;t,film}$, admitiu-se nesta fase do estudo, um valor bem elevado, ou seja, essa resistência térmica é pequena. A equação da energia aplicada ao escoamento do ar:

$$\Delta\dot{Q}_e = \Delta\dot{m}_{ar} \cdot [H_{ar,s} - H_{ar,e}] \quad (23)$$

onde $H_{ar,s}$ e $H_{ar,e}$ são as entalpias específicas do ar, respectivamente, na saída e na entrada do trecho elementar.

$\Delta\dot{Q}_e$ é a taxa de calor elementar trocada entre o filme e ar.

A equação da energia aplicada ao escoamento da água contaminada (interior da serpentina):

$$\Delta\dot{Q}_i = \dot{m}_{ag} \cdot Cp_{ag} \cdot [T_{ag,e} - T_{ag,s}] \quad (24)$$

A equação da energia aplicada ao escoamento do filme:

$$\dot{Q}_{film} = \dot{m}_{film} \cdot Cp_{ag} \cdot [T_{film,e} - T_{film,s}] \quad (25)$$

$$\dot{Q}_{film} = \Delta\dot{Q}_i - \Delta\dot{Q}_e \quad (26)$$

onde $\dot{Q}_{film}$ é a taxa líquida de calor transferida pelo filme.

As equações anteriormente apresentadas formam um sistema consistente que pode ser resolvido simultaneamente para todos os elementos Δx da torre por meio do EES (Fchart, 2018). Foram utilizados valores médios para as propriedades de cada elemento discreto, inclusive para a temperatura de filme. Esse aplicativo (EES) mostrou-se muito valioso na implantação do modelo matemático desenvolvido. A transformação do modelo matemático em um código numérico fica muito prática. As equações são digitadas da

mesma forma como manuscritas, facilitando o entendimento e eventuais correções. O código computacional consistiu basicamente de uma rotina contendo todas as equações anteriormente descritas para um elemento discreto e a montagem do sistema completo por meio de uma indexação relacionando a posição do ar com a posição do filme e da água contaminada.

Resultados

A primeira simulação realizada com o modelo matemático desenvolvido utilizou os parâmetros citados inicialmente. Foram necessários 20 passes de serpentina para reduzir a temperatura em cerca de 5°C. A Figura 6 apresenta os resultados obtidos para as condições da primeira simulação numérica. Cada linha vertical escura do gráfico indica o final de um passe da serpentina.

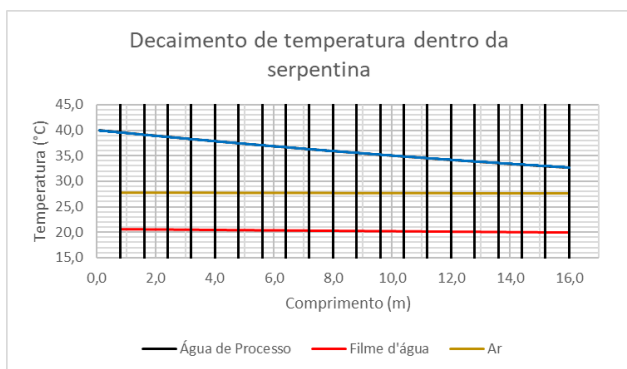


Figura 6: Resultados da simulação 1

Nota-se que a variação de temperatura do ar e do filme d'água é mínima, ou seja, a maior parte do calor transferido do fluido interno é utilizado para evaporar água do filme.

Com o modelo de simulação é possível variar os dados do ar de entrada para estudar o desempenho do equipamento em diferentes condições climáticas. Uma segunda simulação foi feita variando as condições do ar de entrada, a Figura 7 apresenta os dados obtidos neste segundo ensaio. É possível notar que em condições de ar seco, o equipamento consegue atingir temperaturas mais baixas.

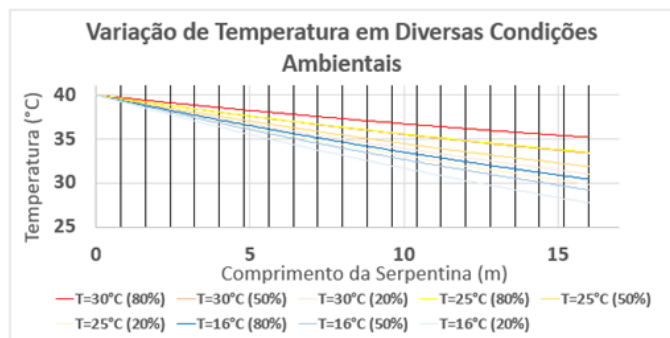


Figura 7: Resultados da simulação 2

Para a validação do modelo matemático desenvolvido foi construído e instrumentado um protótipo no qual se pudesse obter resultados experimentais.

A Tabela 1 apresenta os resultados numéricos e os experimentais para algumas condições de operação. Em relação à precisão dos resultados experimentais apresentados,

foram utilizados termopares com incerteza de $\pm 0,3^\circ\text{C}$. Para as demais variáveis, não foi possível obter as incertezas, um fator limitante no estudo.

Condições do ar na entrada		Condições de Teste			Experimental	Númérico
Temperatura (°C)	Umidade Relativa (%)	Vazão de água da serpentina (m³/h)	Vazão de água do chuveiro (m³/h)	Vazão de Ar (m³/h)	Temp. Entrada (°C)	Temp. de Saída (°C)
22,9	78,0	3,0	3,0	1,7	40	34,3
					35	30,5
26,7	39,0	3,0	3,0	1,7	40	33,3
					35	29,4
15,2	81,0	3,0	3,0	1,7	40	31,7
					35	27,9
25,4	59,0	3,0	3,0	1,7	40	32,5
					35	30,2

Tabela 1: Comparação simulação x real

Conclusões

Ao comparar os resultados da simulação numérica com os resultados experimentais do protótipo construído, nota-se que a simulação numérica é capaz de fornecer resultados com boa precisão. Não obstante há espaço para melhorias.

As divergências entre os resultados podem ter decorrido das hipóteses simplificadoras utilizadas e das incertezas experimentais. Outro fator que pode ter influenciado isso é a forma construtiva do protótipo, onde foi observada uma certa falta de uniformidade nas distâncias entre os passes. Essa alteração no espaçamento afeta diretamente a formação do filme d'água ao redor dos tubos e ela pode influenciar o desempenho do equipamento.

Tomando como referência a pesquisa desenvolvida, é possível sugerir algumas ações para sua continuidade. Uma delas é a análise de sensibilidade do desempenho da torre à variação de algumas variáveis independentes como, por exemplo, a geometria e a relação L/G . O modelo matemático desenvolvido considerou que o ar é misturado após cada passe da serpentina. Esse aspecto também deveria ser objeto de mais investigação. O aprimoramento da instrumentação utilizada no protótipo poderia igualmente contribuir para o melhor entendimento de como o processo real se desenvolve.

Referências

- Chen, J.; Zhang, R.; Runping, N. Numerical simulation of horizontal tube bundle falling film flow pattern transformation. Beijing University. Beijing, p. 7. 2014.
- F-Chart, Engineering Equation Solver Program (EES), 2018.
- Jahangeer, K. A.; Tay, A. A. O.; Islam, M. R. Numerical investigation of transfer coefficients of an evaporatively-cooled. National University of Singapore. Singapore, p. 9. 2011.
- Walther, F. M. Condensador evaporativo em escala: projeto, construção e análise experimental. Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre, p. 27. 2009.

Aviso de responsabilidade

Os autores são os únicos responsáveis pelo material incluído neste documento.