

ANÁLISE DA UTILIZAÇÃO DE GARGALOS E FIOS DE GARRAFA PET COMO ENCHIMENTO DE TORRES DE RESFRIAMENTO

Andreza Carolina Carneiro Tomás Oliveira, andreza.carol@ig.com.br¹
Ana Rosa Mendes Primo, armprimo@ufpe.br²

¹Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos S/N CTG – Departamento de Eng. Mecânica, Recife – PE, Brasil

²Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos S/N CTG – Departamento de Eng. Mecânica, Recife – PE, Brasil

Resumo: Em alguns processos industriais e de condicionamento de ar há a necessidade do resfriamento de equipamentos que geram calor durante sua operação. O fluido geralmente utilizado para dissipar o calor gerado é a água, devido às suas características físicas (alto calor específico, baixa viscosidade, alta condutividade térmica e alta densidade), além da facilidade de obtenção, baixo custo e atoxicidade. Uma Torre de Resfriamento de água é um equipamento que utiliza processos de transferência de calor e massa para resfriar a água, a qual é aspergida sobre um enchimento que tem a finalidade de aumentar a área de contato entre o ar e a água. Os materiais comumente empregados nos enchimentos de torres de resfriamento são materiais a base de plástico. O tipo de enchimento influencia bastante no preço de uma torre de resfriamento, podendo ser responsável por até 40% do custo total de uma torre. Neste trabalho, o enfoque é dado na avaliação de enchimentos de fios e gargalos de garrafas PET, com as seguintes configurações: dois arranjos para fios e dois arranjos de gargalos. Os resultados foram comparados com dois enchimentos comerciais, fabricados pela ALPINA: o enchimento industrial do tipo corrugação vertical off-set e o enchimento de grades trapezoidais. Foi construído um protótipo de uma torre de resfriamento em contracorrente e analisados os efeitos da temperatura de entrada da água, da vazão de ar e da vazão de água sobre a eficiência da torre, para os tipos de enchimento acima citados. Os resultados indicam que os enchimentos testados apresentaram resultados satisfatórios para serem utilizados como enchimentos de torres de resfriamento. Uma simulação numérica através do software EES (Engineering Equation Solver) foi conduzida mostrando boa concordância com os dados experimentais.

Palavras-chave: torre de resfriamento, gargalos PET, transferência de calor e massa, enchimentos evaporativos, psicrometria.

1. INTRODUÇÃO

Decorridos apenas 90 anos de sua primeira aplicação, as torres de resfriamento representam hoje um item importante e às vezes até essencial à maioria dos processos industriais, principalmente em indústrias de unidades de geração de potência, sistemas de refrigeração e ar condicionado, além de indústrias química e petroquímica, com o objetivo de rejeitar o calor absorvido nos processos.

Basicamente, as torres de resfriamento visam transferir ao ar o calor residual dos processos industriais, evitando inicialmente a poluição térmica e química dos cursos d'água e, em segundo lugar, possibilitando usar a mesma água em um ciclo quase fechado, economizando o líquido, que pode ser convenientemente tratado, a um custo menor.

Uma torre de resfriamento de água é um equipamento de operação contínua que utiliza transferência de massa e energia para resfriar a água. Como essas transferências se processam através de superfícies, conclui-se que em uma torre de resfriamento deseja-se sempre a formação máxima de superfícies de água expostas ao ar, o que é conseguido através de: (a) pulverização - para produzir gotículas; (b) enchimento: criam um filme ou gotas devido ao efeito do respingo. As primeiras torres de resfriamento tinham ventilação natural, pouca eficiência e concepções simples. Nesses dispositivos, a água entrava no nível superior da torre, era pulverizada, aumentando sua área de contato com a corrente de ar, cuja vazão era controlada por venezianas localizadas nas paredes laterais. À medida que caía ao longo da torre, a água entrava em contato com o ar evaporando-se parcialmente. A água resfriada em certo volume era acumulada na bandeja inferior, de onde voltava para o processo e era novamente reutilizada como fonte fria.

Para se conseguir melhores resultados, essa concepção tornava necessário que as torres de circulação natural fossem bastante altas e situadas em ângulo reto em relação aos ventos dominantes. Nesses equipamentos ocorriam relativamente grandes perdas de água. Mais tarde, verificou-se que a introdução de obstáculos no seu interior

(“enchimento”) permitia aumentar as disposições superficiais na torre, quer por espalhar o líquido através de uma maior superfície ou retardar o ritmo de queda da gotícula através do aparato. A introdução do conceito de “enchimento” reduziu substancialmente os custos de construção, na medida em que possibilitou a mesma dissipação de calor, utilizando torres menores. O enchimento deve ser forte, leve e resistente à deterioração. Os sarrafos de madeira são um material comum para enchimento, mas o material plástico está se tornando muito popular.

Neste estudo, foram utilizados como matéria-prima para o material de enchimento gargalos e fios de garrafa PET. Trata-se de um material reciclável, resistente à temperatura de operação de torres de resfriamento, de baixo custo e de fácil moldagem. Vários estudos sobre análise de torres de resfriamento foram elaborados com diferentes pontos de vista.

Kloppers & Kroger (2005a) investigaram o efeito do fator de Lewis, ou relação Lewis, na previsão do desempenho de torres de resfriamento natural e mecânica. O Fator de Lewis diz respeito a taxas relativas de transferência de calor e massa nas torres de resfriamento. A história e o desenvolvimento do fator de Lewis e sua aplicação na torre de resfriamento e nas análises de transferência de calor e massa foram amplamente discutidas. A relação do fator de Lewis e o número de Lewis também foram investigados. A influência do fator de Lewis sobre a previsão do desempenho da torre de resfriamento foi subsequentemente investigada. Na análise da transferência de calor e massa do resfriamento evaporativo, Poppe (1991) considerou que o fator de Lewis pode ser especificado explicitamente. Verificou-se que se a mesma definição ou o valor do fator de Lewis é empregado na análise do enchimento teste e posteriormente na análise do desempenho da torre de resfriamento, a temperatura de saída da água será rigorosamente previsível. A quantidade de água que evapora, no entanto, é uma função do valor real do fator Lewis. Se a temperatura de entrada do ar ambiente é relativamente elevada, a influência do fator de Lewis, na performance da torre diminui. É muito importante, na opinião do fator de Lewis, que qualquer enchimento testado na torre de resfriamento seja feito sob condições que estão tão perto quanto possível das condições de funcionamento especificadas da torre de resfriamento.

Kloppers & Kroger (2005b) demonstraram uma derivação detalhada das equações de transferência de calor e massa do resfriamento evaporativo em torres de resfriamento. As equações que regem o rigoroso método de análise de Poppe (1991) foram obtidas. O método de Poppe (1991) é bem adaptado para a análise das torres com o estado da saída do ar determinado com rigor. As equações que regem o método de análise de Merkel (1925) são posteriormente derivadas e algumas hipóteses simplificadoras são feitas. As equações do método de efetividade e - NTU aplicado a torres de resfriamento são também apresentadas. As equações que regem o método de Poppe (1991) são estendidas para dar uma representação mais detalhada do número de Merkel. As diferenças em análises de transferência de calor e massa e técnicas de solução dos métodos de Merkel e Poppe são descritos com o auxílio de diagramas de entalpia e da carta psicrométrica. A carta psicrométrica é ampliada para acomodar ar no estado supersaturado.

Costa (2006) estudou o comportamento de materiais alternativos como enchimento de torres de resfriamento. Foram utilizados os seguintes materiais: Bucha vegetal (*Luffa Cylindrica*), fibra de coco (*Cocos nucifera* Linnaeus), bobes plásticos e gargalos de garrafas PET. Para a investigação do desempenho desses materiais foi construída uma torre de resfriamento experimental, do tipo contra-corrente. Foram analisados os efeitos da vazão mássica da água, da variação da vazão de ar e da carga térmica sobre os enchimentos em comparação a um enchimento padrão, tipo grades trapezoidais de polipropileno utilizado na indústria para águas tipo “problemáticas”. São apresentados resultados do efeito do tipo de enchimento sobre a capacidade de resfriamento (ΔT) e do *approach* da torre. O enchimento de grades trapezoidais apresentou o melhor desempenho com uma efetividade de 46,40%, seguido do Bobe com 40,30%, do PET com 33,61%, da Fibra de Coco com 27,8% e por fim a lufa com 20,97% para vazão de ar de 0.49 m³/s e de água de 0.11 l/s.

Jin et al (2006) apresenta uma nova modelagem matemática para torre de resfriamento mecânica. Validando o modelo por dados reais de operação de uma torre de resfriamento de um hotel. Os resultados dos testes mostram que o desempenho da torre de resfriamento varia devido a diferentes condições de operação. Com o modelo proposto pode-se refletir essas alterações ajustando seus parâmetros. Com esta funcionalidade, o modelo proposto pode ser simplesmente usado para prever com precisão o desempenho da torre em tempo real de funcionamento.

Lucas et al (2008) estudou o desempenho térmico de uma torre de resfriamento mecânica contra-corrente utilizando vários arranjos de eliminadores de gotas, acessório utilizado para minimizar a perda de água do sistema, através da saída do ar de exaustão da torre, por arraste. Os dados experimentais foram obtidos variando as vazões de ar e as vazões de água. Através dos dados chegou-se à conclusão de que o arranjo dos eliminadores de gotas influencia o desempenho térmico da torre de resfriamento para uma mesma vazão de ar e de água.

Hajidavalloo et al (2010) utiliza o modelo matemático convencional, de acordo com a teoria de Merkel, para prever o comportamento térmico de uma torre de resfriamento de fluxo cruzado sob temperatura de bulbo úmido variável; os resultados são comparados com dados experimentais em diferentes condições de funcionamento. Verifica-se que, quando aumenta a temperatura de bulbo úmido, com a temperatura de bulbo seco constante, o *approach*, diferença entre a temperatura da água que sai da torre e a temperatura de bulbo úmido, diminui e as perdas por evaporação aumentam consideravelmente. Verifica-se também, o efeito da colocação de um separador de impacto na frente das grelhas de entrada de ar para reduzir a quantidade de sólidos em suspensão do ar, onde se observa que não há uma perda considerável no desempenho da torre.

2. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

2.1. Tipos de Enchimentos Utilizados

Foi utilizado como material de enchimento a garrafa PET. O PET é um material reciclável, e sua reutilização contribui para preservação do meio ambiente, além de ser uma alternativa de investimento, geração de trabalho e renda.

O PET - Poli (Tereftalato de Etileno) - é um polímero termoplástico. Os polímeros têm sido usados extensivamente em torres de resfriamento, seja na estrutura como fibra de vidro, seja na fabricação de enchimentos. Os polímeros mais utilizados em enchimentos são o PVC (Policloreto de Vinila) e o Polipropileno.

2.1.1. Garrafa PET como enchimento e Enchimentos Industriais

Foram utilizados os fios e os gargalos de PET, a garrafa foi cortada em um torno mecânico para obter os fios com 3 mm de largura. Os gargalos e os fios foram organizados em suportes com dimensão total de 47cm x 47cm x 50cm feito de perfis "L" de 1/4" de alumínio. Foram testados 4 tipos de enchimentos alternativos: enchimento de fio cruzado, Fig. (1), enchimento fio solto, Fig. (2), enchimento gargalo 1, Fig. (3) e enchimento gargalo 2, Fig. (4).



Figura 1. Enchimento Fio Cruzado.



Figura 2. Enchimento Fio Solto.



Figura 3. Enchimento Gargalo 1.



Figura 4. Enchimento Gargalo 2.

Foram utilizados os enchimentos tipo filme de corrugação vertical, Fig. 5 e o enchimento de grades trapezoidais, Fig. 6, estes enchimentos foram usados como padrão comparativo de desempenho para os outros enchimentos.

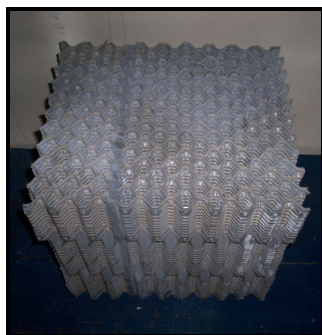


Figura 5. Enchimento corrugação vertical industrial.

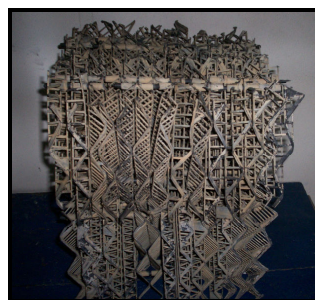


Figura 6. Enchimento tipo trapezoidal industrial.

Foram medidas as principais temperaturas do protótipo da torre de resfriamento, as vazões de ar e as vazões de água, conforme mostra a Fig. (7). A partir destas medições foi possível calcular a faixa de resfriamento, a aproximação

(*approach*), a efetividade e a relação vazão de água/ vazão de ar (L/G) da torre de resfriamento, sendo estes dados necessários para avaliar o desempenho de cada enchimento testado.

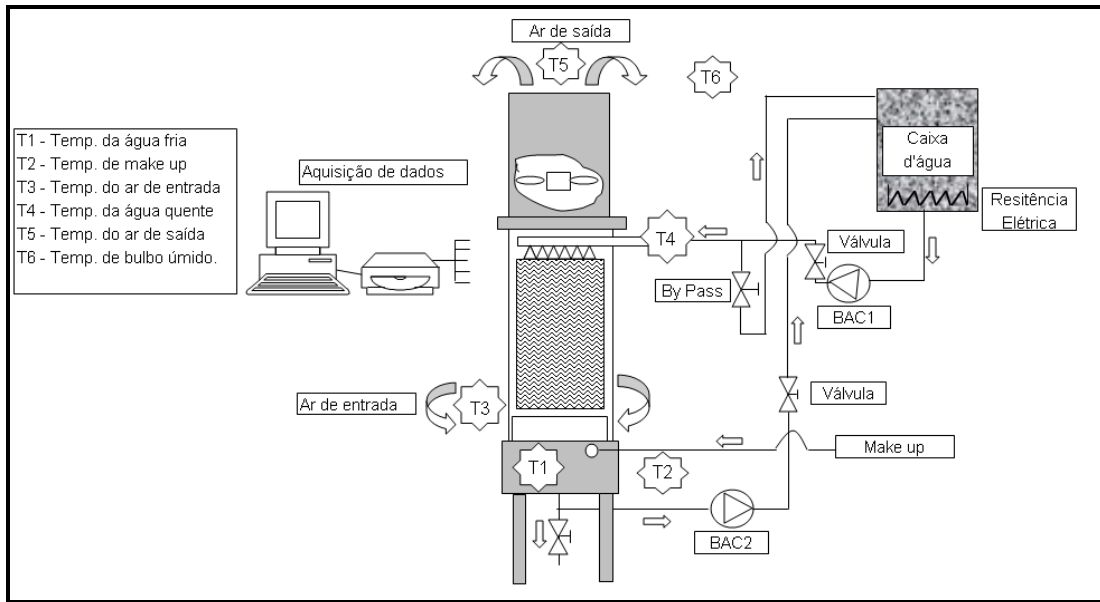


Figura 7. Esquema do protótipo da torre de resfriamento.

Para análise do desempenho dos enchimentos descritos, variaram-se as temperaturas de entrada da torre de resfriamento, as vazões de água e as vazões de ar. Foram feitas 27 medições para cada tipo de enchimento. As temperaturas de entrada da torre foram escolhidas baseadas nas temperaturas de operação de torres reais utilizadas em sistemas de refrigeração.

3. MODELAGEM MATEMÁTICA E SIMULAÇÃO NUMÉRICA DE UMA TORRE DE RESFRIAMENTO

3.1 Modelagem Matemática de Torres de Resfriamento Contracorrente

Tabela 1. Letras e símbolos.

A	Área de contato entre o fluido e a superfície, [m ²]	\dot{m}_v	Taxa de transferência de vapor de água, [kg/s]
C_p	Calor específico a pressão constante, [kJ/kgK]	\dot{m}_{aq}	Taxa de transferência de água, [kg/s]
$C_{p,ar}$	Calor específico do ar seco, [kJ/kgK]	\dot{m}_a	Massa de ar seco, [kg]
$C_{p,ar}$	Calor específico do ar úmido, [kJ/kgK]	\dot{m}_v	Massa de vapor de água, [kg]
$C_{p,ág}$	Calor específico da água, [kJ/kgK]	Mep	Número de Merkel
h_{ar}	Entalpia específica do ar seco, [kJ/kg]	NUT	Número de Unidades de transferência
h_{aq}	Entalpia específica da água, [kJ/kg]	PET	Poli Tereftalato de Etileno
h_i	Entalpia do ar saturado a temperatura da água, [°C]	Q	Taxa de troca de calor, [W]
h_c	Coefficiente de transferência de calor por convecção, [W/m ² °C]	δQ	Calor total transferido, [kJ]
Lef	Fator de Lewis	δQ_s	Calor sensível, [kJ]
Le	Número de Lewis	T_{aq}	Temperatura da água, [°C]
$\dot{m}_{saída}$	Fluxo mássico de água de saída, [kg/s]	T_{ar}	Temperatura do ar, [°C]
$\dot{m}_{entrada}$	Fluxo mássico de água de entrada, [kg/s]	ϵ	Efetividade, [°C]

A modelagem matemática da torre de resfriamento contracorrente permitiu avaliar a relação da temperatura de saída da água da torre com a temperatura de bulbo úmido do ar de insuflamento, através do número de Merkel (Mep) ou NUT, número de unidades de transferência. A característica das torres contracorrente é a direção descendente do fluxo de água em direção oposta ao fluxo ascendente de ar, provocada pelo ventilador.

Considere uma torre de resfriamento e seu volume de controle conforme mostrada na Fig. (9). Um fluxo de água de vazão mássica, \dot{m}_{ag} , à temperatura T1, deve ser resfriado até a temperatura T2. Devido ao contato entre o ar e a água, a umidade do ar aumenta em virtude da evaporação da água aquecida, que vai sendo resfriada. Vazão mássica de ar \dot{m}_{ar} circula pela torre. A vazão de água é considerada constante ao longo da torre, devido ao fluxo de massa de água evaporada ser pequeno quando comparado com o fluxo total de água do processo.

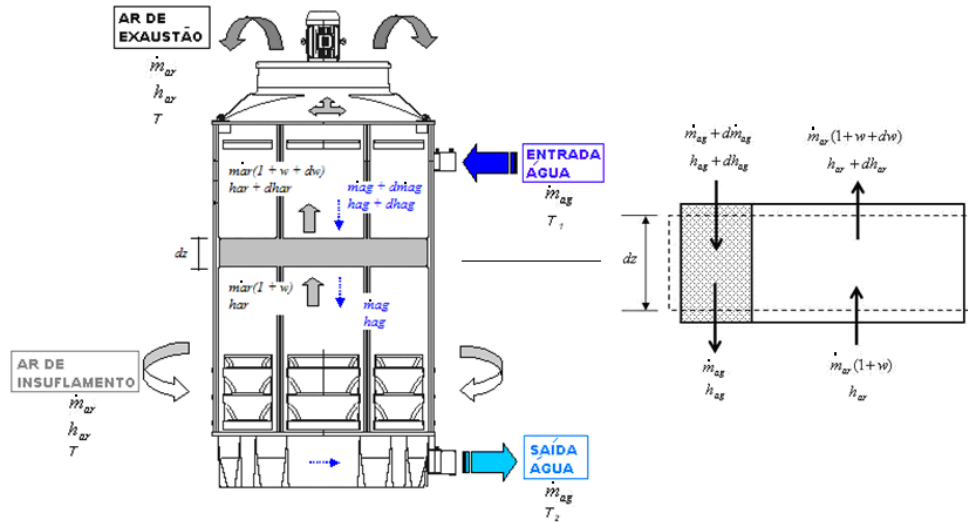


Figura 8. Volume de controle do enchimento em contra corrente (Costa, 2006).

Fazendo um balanço de energia no volume de controle mostrado na Fig. 8 tem-se:

Pela 1ª Lei:
$$\frac{dE}{dt} = \Sigma H_e - \Sigma H_s + \Sigma Q - \Sigma W \quad (1)$$

Considerando que a torre opera em regime permanente, $\frac{dE}{dt} = 0$. Como não há trabalho realizado pela torre e considerando-a adiabática, tem-se:

$$\Sigma H_e = \Sigma H_s \quad (2)$$

$$0 = m_{ar} h_{ar} + (m_{ag} + dm_{ag})(h_{ag} + dh_{ag}) - m_{ag} h_{ag} - m_{ar} (h_{ar} + dh_{ar}) \quad (3)$$

Simplificando e reorganizando tem-se:

$$m_{ar} dh_{ar} - m_{ag} dh_{ag} - h_{ag} dm_{ag} = 0 \quad (4)$$

Como não será considerada a perda de água por evaporação, o fluxo de calor total removido da água será dado por:

$$\delta Q = m_{ar} dh_{ar} = m_{ag} dh_{ag} \quad (5)$$

Esta análise é feita somente pelo balanço de energia e precisa ser suplementada com a Eq. (6).

$$\delta Q = \frac{h_c dA}{c_{p_u}} (h_i - h_{ar}) \quad (6)$$

A Eq. (6) é a equação que rege a transferência de calor total entre um fluxo de ar em torno de uma parede molhada, considerando que Le_f é igual a 1, para considerar os efeitos de transferência de calor e massa, onde:

$$\delta Q = \frac{h_c dA}{c_{p_u}} (h_i - h_{ar}) = m_{ar} dh_{ar} = m_{ag} dh_{ag} \quad (7)$$

De acordo com a simplificação adotada, $dh = c_p dT$ tem-se:

$$\delta Q = \frac{h_c dA}{c_{p_u}} (h_i - h_{ar}) = m_{ag} c_{p_{ag}} dT \quad (8)$$

Integrando-se a equação acima, obtém-se:

$$m_{ag} \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_{p_{ag}} dT}{(h_i - h_{ar})} = \int_0^A \frac{h_c dA}{c_{p_u}} = \frac{h_c A}{c_{p_u}} \quad (9)$$

$$\frac{h_c dA}{c_{p_u}}$$

A expressão $\frac{h_c dA}{c_{p_u}}$ é definida como o número de Merkel (Mep) ou o NUT, número de unidades de transferência, então:

$$Mep = m_{ag} \int_{T_1}^{T_2} \frac{c_{p_{ag}} dT}{(h_i - h_{ar})} \quad (10)$$

O número de Merkel é aproximadamente constante ao longo de uma dada torre de resfriamento, ele depende da geometria do contato ar-água, do regime, da velocidade, da viscosidade, ou seja, das características do escoamento, implícitas dentro do coeficiente de transferência de calor, h_c . A área de contato inclui a interface do filme de líquido-ar, bem como também das superfícies das gotas presentes. Um valor elevado do número de Merkel indica que a temperatura da água de saída da torre se aproxima da temperatura de bulbo úmido do ar de insuflamento, Moreira (1999).

De posse do número de Merkel, calculado a partir de dados experimentais, calcula-se as condições de saída da água para diferentes situações de operação da torre. Discretizando a Eq. (10) e dividindo a torre de resfriamento na região do enchimento em n seções de áreas de contato, tem-se:

$$m_{ag} c_{p_{ag}} \Delta T \sum \frac{1}{(h_i - h_{ar})_m} = \frac{h_c}{c_{p_u}} \sum A_i \quad (11)$$

O índice “m” significa que se devem tomar as médias das entalpias específicas entre as seções adjacentes.

$$Me = \frac{h_c}{c_{p_u}} \sum A_i = \frac{m_{ag} c_{p_{ag}} \Delta T}{\left(\frac{h_{(n)i} + h_{(n+1)i}}{2} - \frac{h_{(n)ar} + h_{(n+1)ar}}{2} \right)} \quad (12)$$

Através da Eq. (12) calcula-se o número de Merkel ou NUT, a partir da diferença das entalpias médias do ar e da superfície molhada para cada seção. Supondo que a torre de resfriamento seja preenchida uniformemente, ou seja, com mesma área de contato em cada seção, sendo integrada de baixo para cima. O fluxo de calor sensível é responsável pela variação da temperatura de bulbo seco do ar, onde,

$$\delta Q_S = m_a C_{pu} dT \quad (13)$$

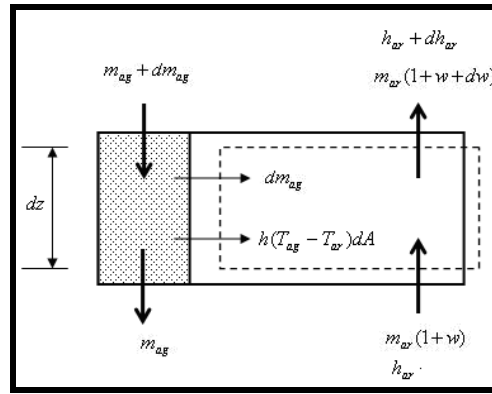


Figura 9. Volume de controle para o ar da torre.

Fazendo um balanço de energia no volume de controle da Fig. (9) obtém-se calor sensível, onde, substituindo na Eq. (13), tem-se:

$$h_c(T_{ag} - T_{ar})A_i = m_a C_{pu} \Delta T \quad (14)$$

Discretizando a equação acima, isolando a temperatura do ar de saída e manipulando a equação tem-se:

$$T_{(n+1)ar} = \frac{T_{(n)ar} + (Me_i / 2m_a) \times (T_{(n)ag} + T_{(n+1)ag} - T_{(n)ar})}{1 + (Me_i / 2m_a)} \quad (15)$$

Com a Eq. (15) pode-se calcular o estado do ar através da torre de resfriamento. A temperatura de saída da água é determinada atribuindo-se um valor inicial, um valor usual é a temperatura de bulbo úmido do ar, com este valor calcula-se o Merkel, se o valor calculado for maior (ou menor), então se aumenta (ou diminui) a temperatura da água na saída. Este procedimento se repete até o critério de convergência ser satisfeito, sendo um processo iterativo.

3.2 Lógica de Modelagem Numérica: EES

O Mep (ou o NUT) é calculado para cada enchimento do protótipo da torre de resfriamento a partir de dados experimentais. Conhecido o NUT, são simuladas situações diferentes das condições ensaiadas para prever as condições de operação da torre, como por exemplo, a temperatura de saída da água. Os cálculos são feitos por um procedimento iterativo. Esses cálculos foram feitos no software de simulação “Engineering Equation Solver” (EES), software para resolução de sistema de equações que contém propriedades térmicas do ar úmido.

O método exige que se admita uma temperatura de saída da água. Um bom valor inicial é admitir que a temperatura de saída da água é equivalente à TBU do ar de entrada. Com este valor, o procedimento é executado para se calcular o NUT correspondente. Se o NUT calculado for maior ou menor, então se aumenta ou diminui a temperatura da água na saída. Novos cálculos são efetuados até que a aproximação desejada seja alcançada.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Fig. (10) mostra um gráfico do Resfriamento (°C) em função da temperatura da água de entrada na torre. Observa-se que os resultados apresentados pelos enchimentos ficaram próximos uns dos outros, sendo o enchimento de fio cruzado o que apresentou melhor resultado para esse tipo de simulação. Seguido do fio solto, industrial águas problemáticas, gargalo 2, gargalo 1 e industrial de corrugação vertical. Os enchimentos de gargalos 1 e 2 apresentaram um resfriamento próximo ao enchimento industrial. O enchimento industrial de corrugação vertical apresentou o menor resfriamento, muito provavelmente devido a esse tipo de enchimento necessitar de uma aspersão de água uniforme ao longo do enchimento, o que não se conseguiu com o aspersor de água utilizado no protótipo. Salienta-se, entretanto, que a diferença entre os melhores e piores valores apresentados está em torno de um grau Celsius. Pode-se também observar que a faixa de resfriamento é influenciada pela temperatura da água que entra na torre. Isto se deve ao fato de que, com uma temperatura elevada na água de entrada, aumenta-se a diferença de temperatura entre o ar de entrada e a água, o que leva a um aumento no desempenho.

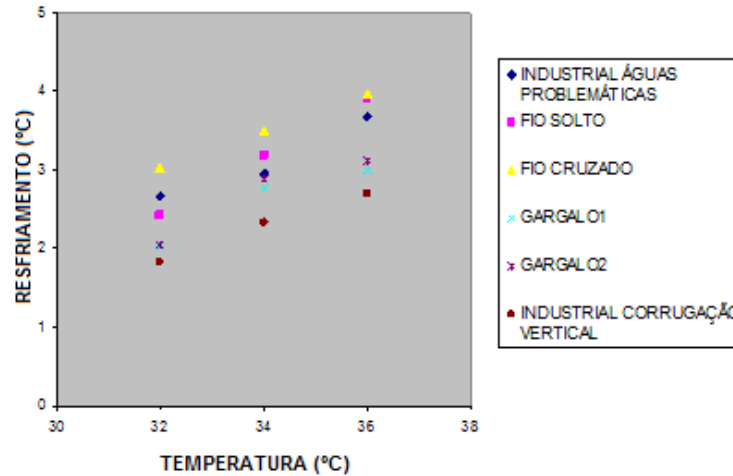


Figura 10. Resfriamento (°C) versus temperatura (°C) - Comparação entre enchimentos para uma vazão de ar de 0,49 m³/s e uma vazão de água de 0,22 l/s.

Na Fig. 11 pode ser visto um gráfico da Efetividade (%) em função da temperatura da água de entrada da torre (°C). Pode-se perceber que o enchimento de fio cruzado teve a melhor eficiência, seguido de perto pelo fio solto, para as mesmas condições dos gráficos anteriores. Isto mostra a importância de se ter uma menor aproximação (*approach*) possível, pois o mesmo influencia na análise global do enchimento. O enchimento de gargalo 2 teve sua eficiência próxima do enchimento industrial para águas problemáticas. As eficiências dos enchimentos testados estão próximas umas das outras, em uma faixa de 15%.

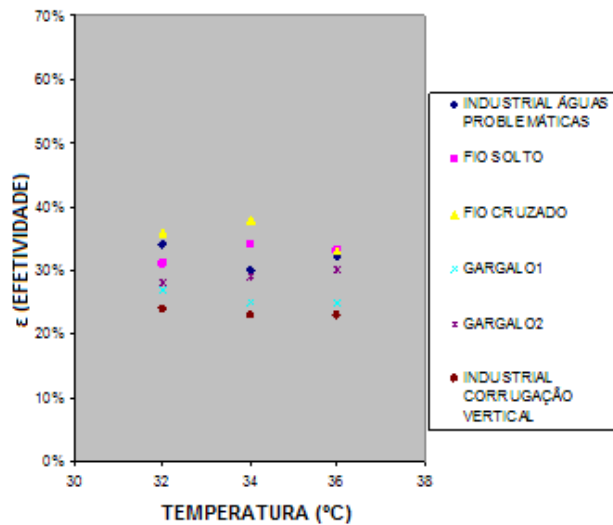


Figura 11. Efetividade versus temperatura (°C) - Comparação entre enchimentos para uma vazão de ar de 0,49 m³/s e uma vazão de água de 0,22 l/s.

O programa desenvolvido no EES é utilizado para prever o comportamento térmico de uma torre de resfriamento contra corrente, variando as condições meteorológicas. O valor do NUT ao longo da torre é praticamente constante para um valor fixo de vazão mássica de água e vazão mássica de ar, a relação entre estas vazões é conhecida na literatura especializada como L/G. Na Fig. (12) é mostrado o valor do NUT versus temperatura de entrada da água da torre de resfriamento para três relações L/G diferentes e para diferentes enchimentos. Observa-se o comportamento quase linear do NUT para cada relação L/G. Existe uma dependência clara do NUT com a relação L/G, à medida que ela aumenta, o NUT diminui e vice-versa. Através da comparação do NUT calculado entre os enchimentos foi observado que o enchimento FIO SOLTO é maior, seguido do FIO CRUZADO, INDUSTRIAL ÁGUAS PROBLEMÁTICAS, GARGALO 2, GARGALO 1 e INDUSTRIAL CORRUGAÇÃO VERTICAL, semelhante aos resultados experimentais para a efetividade. Estes resultados concordam com os resultados experimentais que quanto maior o NUT, mais próxima é a temperatura da água da temperatura de bulbo úmido (aproximação menor), e melhor é o desempenho do enchimento para várias situações atmosféricas.

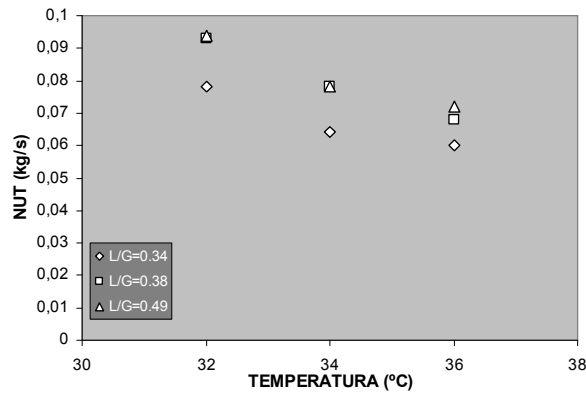


Figura 12. Resultados numéricos do cálculo do NUT para enchimento GARGALO 2.

Foram feitas comparações entre Dados Numéricos e Experimentais, apresentando as variações do resfriamento, da aproximação e da efetividade em função da temperatura de entrada da água para cada enchimento.

Os pontos experimentais e numéricos apresentam as mesmas condições. Os resultados mostram uma boa concordância entre dados numéricos e experimentais. A Fig. (13) mostra um resultado.

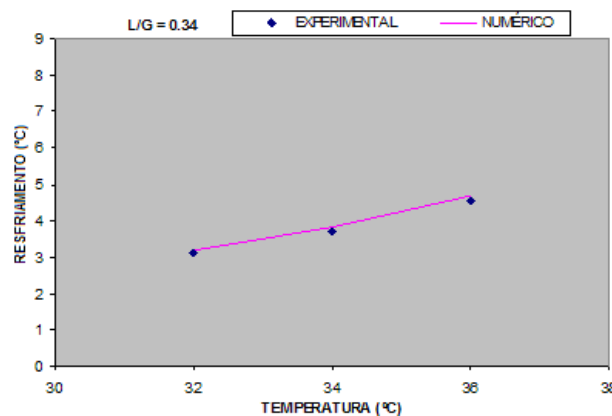


Figura 13. [FIO CRUZADO] Resfriamento (°C) versus temperatura da água de entrada (°C) - Comparação entre os resultados experimentais e numéricos para um L/G de 0,34.

5. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos observou-se que a temperatura da água de entrada da torre influenciou em todas as medições: quanto maior a temperatura da água de entrada, maior o resfriamento e maior a aproximação (*approach*). Observou-se que a efetividade nem sempre aumentou com o aumento da temperatura da água de entrada e quase sempre se manteve como uma linha reta.

Verifica-se que a vazão de ar tem influência direta sobre as temperaturas da torre, verifica-se também que grandes áreas superficiais implicam numa obstrução da passagem do ar e reduzem os parâmetros analisados neste estudo, isto é, a efetividade, o resfriamento e a aproximação (*approach*). Devido a isto, deve-se aumentar a área de contato do enchimento com o cuidado de oferecer boas condições para a passagem de ar.

A distribuição de água sobre o enchimento também influencia no desempenho do sistema. Observou-se que, quanto maior a vazão de água menor a faixa de resfriamento e maior a aproximação (*approach*), reduzindo assim a efetividade. O programa feito no EES, utilizado para calcular o NUT para cada enchimento, apresentou boa concordância com os resultados experimentais. Os enchimentos que obtiveram o maior NUT foram os que tiveram a maior eficiência. Com o NUT calculado, é possível através do programa simular situações diferentes das obtidas nos experimentos, como variação da umidade relativa, variação da temperatura da água de entrada da torre e variação da temperatura de bulbo úmido. Este programa mostrou-se uma ferramenta valiosa no projeto e simulação de torres de resfriamento contracorrente, utilizando os materiais alternativos deste projeto.

Pelas razões técnicas mostradas no presente trabalho, as garrafas PET têm grande potencial como material de enchimento de torres de resfriamento, tendo suas condições de operação próximas do enchimento industrial. Deste modo esse material pode se tornar uma alternativa viável para enchimento de torres de resfriamento.

6. AGRADECIMENTOS

A CAPES pelo suporte financeiro durante o período de realização deste trabalho e a ARCLIMA pelos materiais e pela mão de obra fornecida.

7. REFERÊNCIAS

- Costa, J.A.P.D., 2006, “Utilização de Materiais Alternativos como Enchimento de Torres de Resfriamento”, Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica – UFPE.
- CREDER, H., 2004, “Instalações de Ar condicionado”, LTC, 6a Edição.
- Hajidavalloo E., Shakeri R., Mehrabian, M. A., 2010, “Thermal performance of cross flow cooling towers in variable wet bulb temperature”, Energy Conversion and Management, Article in Press.
- Jin G., Cai W., Lu L., Lee, E. L., Chiang A., 2006, “A simplified modeling of mechanical cooling tower for control and optimization of HVAC systems”, Energy Conversion and Management, Vol. 48, pp. 355–365.
- Kloppers, J.C., Kroger, D.G., 2005, “The Lewis Factor and its Influence on the Performance Prediction of wet-cooling Towers”, International Journal of Thermal Sciences, Vol. 44, pp. 879–884.
- Kloppers, J.C., Kroger, D.G., 2005, “A critical investigation into the heat and mass transfer analysis of counterflow wet-cooling towers”, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 48, pp. 765–777.
- Lucas M., Martínez, P.J., Viedma A., 2008, “Experimental study on the thermal performance of a mechanical cooling tower with different drift eliminators”, Energy Conversion and Management, Vol. 50, pp. 490–497.
- Moreira, J.R.S., 1999, “Fundamentos e Aplicações da Psicrometria”, RPA Editora Ltda. São Paulo.

8. DIREITOS AUTORAIS

Os autores são os únicos responsáveis pelo conteúdo do material impresso incluído no seu trabalho.

ANALYSIS ON THE UTILIZATION OF P.E. T. BOTTLES AS PACKING FOR COOLING TOWERS.

Andrezza Carolina Carneiro Tomás Oliveira, andrezza.carol@ig.com.br¹
Ana Rosa Mendes Primo, armprimo@ufpe.br²

¹Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos S/N CTG – Departamento de Eng. Mecânica, Recife – PE, Brasil

²Universidade Federal de Pernambuco - UFPE, Av. Acadêmico Hélio Ramos S/N CTG – Departamento de Eng. Mecânica, Recife – PE, Brasil

Abstract: *Some industrial processes as well as air conditioning processes need to refrigerate their equipments that generate heat. Generally, the fluid utilized to remove heat is water, due to the physical properties (high specific heat, low viscosity, high thermal conductivity and high density), besides its facility to be obtained, low cost and non toxicity. A cooling tower is an equipment that utilizes processes of heat and mass transfer to refrigerate water, which is spread over a cooling pad, which has the function of increase the contact area between air and water. The materials commonly used as cooling pads are plastic based. The kind of the pad influences the price of a cooling tower, that can rise 40% depending of the used cooling pad. This work investigates the performance of cooling pads of recycled PET bottles, with the following configuration: two cooling pads made of threads of PET bottles and two cooling pads made of PET neck bottles. The results were compared with two industrial cooling pads from ALPINA, the first one with off set vertical corrugation and the second one with trapezoidal grids. In order to compare the results, a prototype of a cooling tower in counter flow was built to analyse the effects of water inlet temperature, air flow and water flow at the entrance of the cooling tower for the above mentioned cooling pads. The results indicate that the tested alternative cooling pads showed similar or even a better performance than the tested industrial cooling pads. A numerical simulation was carried out using the software EES (Engineering Equation Solver) showing a good agreement with the experimental results.*

Key words: *cooling tower, PET neck bottles, heat and mass transfer, cooling pads, psicrometry*