

Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente

EVAPORATIVE COOLING AIR CONDITIONING SYSTEM: SAVING ENERGY AND THE ENVIRONMENT

José Rui Camargo

Departamento de Engenharia Mecânica
Universidade de Taubaté

RESUMO

O condicionamento de ar por resfriamento evaporativo é um método ambientalmente amigável e energeticamente eficiente, que utiliza água como fluido de trabalho e pode ser uma alternativa econômica aos sistemas convencionais de ar condicionado em muitos casos. Este trabalho apresenta os princípios básicos de funcionamento e considerações técnicas para a utilização do resfriamento evaporativo em condicionamento de ar para conforto térmico, discorrendo a respeito do modo de operação dos sistemas de resfriamento evaporativo direto e indireto, de sistemas multiestágios e de sistema híbridos, que utilizam a refrigeração por compressão mecânica como apoio. Apresenta, ainda, alguns benefícios ambientais e econômicos resultantes da utilização eficiente desses sistemas.

PALAVRAS-CHAVE

resfriamento evaporativo; energia e meio ambiente; sistemas híbridos.

INTRODUÇÃO

O condicionamento do ar é responsável tanto pelo aumento da eficiência do homem no trabalho quanto pelo seu conforto, principalmente nos períodos mais quentes do ano. Atualmente o sistema de refrigeração mais utilizado para esse fim é o sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor. No entanto, o resfriamento evaporativo pode ser uma alternativa econômica em muitos casos, podendo substituir o sistema convencional sob algumas condições ou ser utilizado como pré-resfriador no sistema convencional. Isso leva a uma redução dos custos de operação com relação aos sistemas que utilizam somente

a refrigeração mecânica (SCHIBUOLA, 1997).

O resfriamento evaporativo opera utilizando fenômenos naturais através de processos induzidos nos quais a água e o ar são os fluidos de trabalho. Consiste na utilização da evaporação de água através da passagem de um fluxo de ar, provocando uma redução na temperatura do ar.

Esse processo possui como principal característica o fato de ser mais eficiente quando as temperaturas são mais elevadas, ou seja, quando a necessidade de resfriamento é maior para o conforto humano. Além disso, o aumento da umidade é benéfico em regiões secas e, em outras regiões, com a umidificação, o ar insuflado deixa de causar o desconfortável ressecamento da pele e mucosas do corpo que os sistemas convencionais proporcionam.

O resfriamento evaporativo tem ainda como atrativos e benefícios o baixo consumo de energia, facilidades de manutenção, instalação e operação, sendo facilmente integrável em sistemas de condicionamento de ar já instalados. Por não utilizar gases CFC ou HFC não agride o meio ambiente. Por ser um sistema que opera com renovação total do ar, elimina-se a recirculação e a proliferação de fungos e bactérias, problema constante nos sistemas de condicionamento de ar convencionais, aumentando a qualidade do ar interior. Por poupar energia reduz a demanda de potência de pico e também a emissão de CO₂ de plantas termelétricas.

O RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

O processo de resfriamento evaporativo, embora largamente utilizado em torres de resfriamento de água, lavadores de ar, condensadores evaporativos e

resfriadores de líquidos, ainda é pouco explorado e difundido para o conforto térmico humano.

As aplicações para o resfriamento evaporativo são, entre outras, grandes áreas com grande quantidade de público, áreas onde funcionam equipamentos que produzem calor, áreas de trabalho industrial em processos de manufatura, em indústrias têxteis, em alguns processos industriais que requerem um controle preciso da umidade, em minas, em abrigos de animais, no armazenamento de produtos hortifrutigranjeiros, no cultivo de plantas e para condicionamento de ar residencial e comercial (CAMARGO *et al.*, 2000).

Os equipamentos de resfriamento evaporativo podem ser de refrigeração evaporativa direta (RED) ou de refrigeração evaporativa indireta (REI).

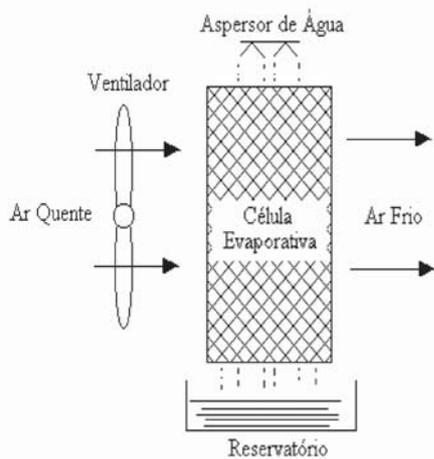


Figura 1. Resfriador evaporativo direto (RED)

Equipamentos de refrigeração direta resfriam o ar por contato direto ou com uma superfície líquida ou com uma superfície sólida molhada ou, ainda, através de *sprays*. A Fig. 1 mostra esquematicamente um resfriador evaporativo direto.

Assim, em um RED, a água é vaporizada dentro da corrente de ar e o calor e massa transferidos entre o ar e a água reduzem a temperatura de bulbo seco do ar e aumentam sua umidade, mantendo constante a entalpia (resfriamento adiabático). No RED, não há redução na entalpia e a mínima temperatura que se pode atingir é a de bulbo úmido do ar que entra no sistema. É possível, no entanto, obter menores temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída mas, para isso, a água recirculada que supre o equipamento deve antes ser resfriada (CARDOSO *et al.*, 1999).

Um avanço na tecnologia do resfriamento evaporativo deve-se à introdução dos equipamentos de resfriamento indireto, nos quais o ar, relativamente seco, é mantido separado do ar do lado molhado, onde o líquido está sendo vaporizado. No resfriador evaporativo indireto (REI), o ar que será utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) transfere calor para uma corrente de ar secundária ou para um líquido, que foram resfriados evaporativamente. A entalpia do ar do lado seco é assim reduzida, em contraste à redução adiabática de temperatura de um refrigerador evaporativo direto.

A Fig. 2 mostra dois sistemas de resfriamento evaporativo indireto: tipo placa (Fig. 2a) e tipo tubo (Fig. 2b) (CHEN *et al.*, 1991).

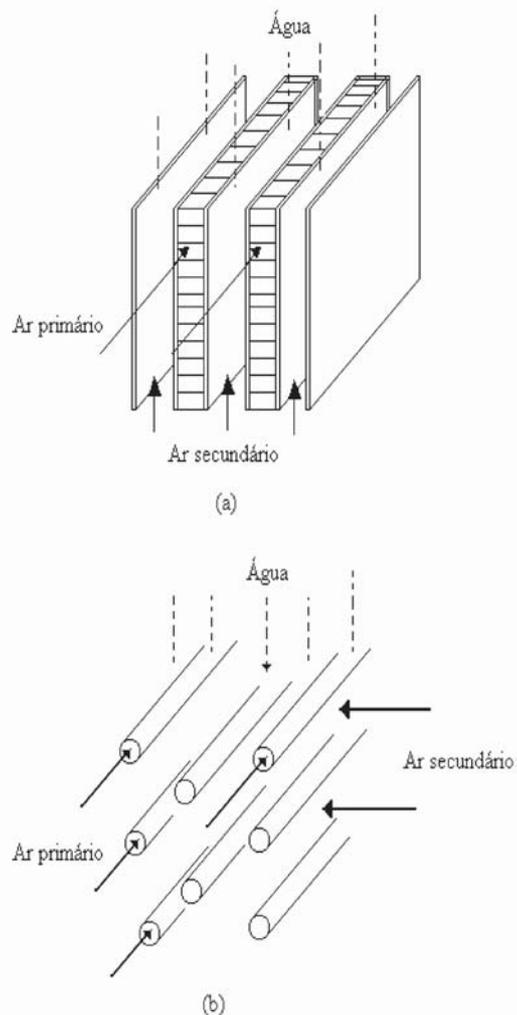


Figura 2. Resfriador evaporativo indireto: (a) tipo placa, (b) tipo tubo.

A efetividade de um resfriador evaporativo é definida como a taxa entre a queda real de temperatura de bulbo seco e a máxima queda teórica que a temperatura de bulbo seco poderia ter se o resfriador fosse 100% eficiente e o ar saísse saturado. Neste caso a temperatura de bulbo seco na saída seria igual à temperatura de bulbo úmido do ar na entrada (TRANE, 1978).

Para um resfriador ideal, isto é, com 100% de efetividade, as temperaturas de bulbo seco e de ponto de orvalho tenderiam a ser iguais à temperatura de bulbo úmido.

REFRIGERAÇÃO EM UM, DOIS OU TRÊS ESTÁGIOS

Pode-se utilizar o sistema de resfriamento evaporativo com somente um estágio (direto ou indireto), com dois estágios (indireto/direto, indireto/apoio ou direto/apoio) ou com três estágios (indireto/direto/apoio). A Fig. 3 mostra um esquema de resfriamento evaporativo em dois estágios. O primeiro estágio corresponde ao processo indireto e o segundo ao direto.

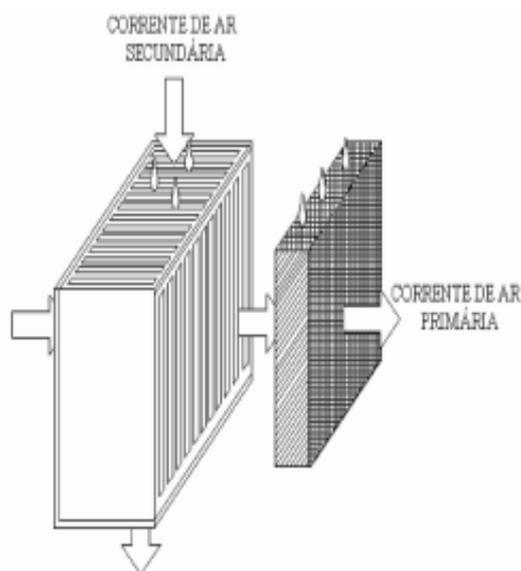


Figura 3: Resfriamento evaporativo em dois estágios: indireto/direto

Assim, tem-se que a temperatura de bulbo seco do ar na saída do estágio evaporativo indireto é dada por:

$$T_{ps} = T_{pe} - \varepsilon_i (T_{pe} - T_w)$$

onde ε_i é a efetividade da unidade indireta (ASHRAE Handbook Applications, 1995, p. 47.5), T_{pe} é a temperatura na entrada do ar primário, T_{ps} é a temperatura na saída do ar primário e T_w é a temperatura da água. Sendo T_{si} a temperatura de bulbo seco do ar deixando a unidade indireta e T_{sd} a do ar deixando unidade direta tem-se:

$$T_{sd} = T_{si} - \varepsilon_d (T_{si} - T_{sd}')$$

onde ε_d é a efetividade da unidade direta e T_{sd}' é a temperatura de bulbo úmido na saída do estágio direto e é igual àquela na saída do estágio indireto pois o processo direto é adiabático.

A utilização de um estágio auxiliar com refrigeração mecânica por expansão direta ou água gelada (resfriamento de apoio) é feita quando o resfriamento evaporativo não é suficiente para atingir a condição final desejada.

A Fig. 4 mostra processos de resfriamento em 3 estágios em uma carta psicrométrica. O processo 1-2 é realizado em uma unidade de resfriamento evaporativo indireto e, neste caso, não há umidificação, ou seja, a umidade absoluta permanece constante. Os processos 2-3 e 4-5 são realizados em uma unidade direta e, nestes casos, a entalpia permanece constante. O processo 2-4 equivale à refrigeração de apoio quando a serpentina é colocada antes da unidade direta e o processo 3-5 quando a serpentina é colocada após a unidade direta.

A Fig. 5 mostra, esquematicamente, os equipamentos componentes de um resfriador evaporativo de 3 estágios (indireto/apoio/direto) onde a serpentina do resfriamento de apoio (auxiliar) está colocada antes da unidade direta (processo 1-2-4-5 mostrado na Fig. 4).

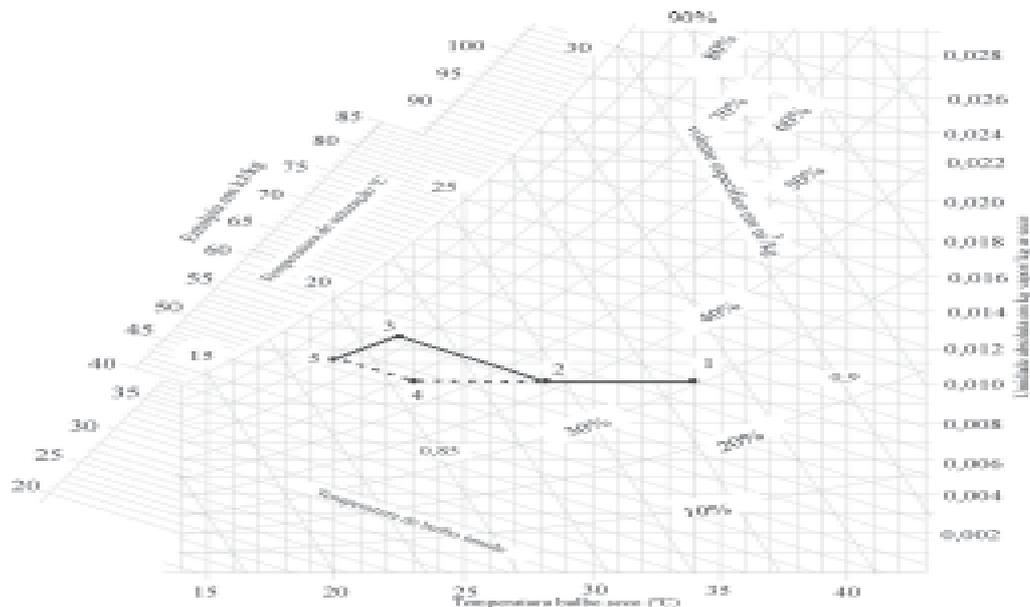


Figura 4. Processos de resfriamento em 3 estágios

- 1- Ventilador (corrente de ar primário)
- 2- Resfriador evaporativo interno
- 3- Serpentina de resfriamento auxiliar
- 4- Resfriador evaporativo direto
- 5- Corrente de ar secundário

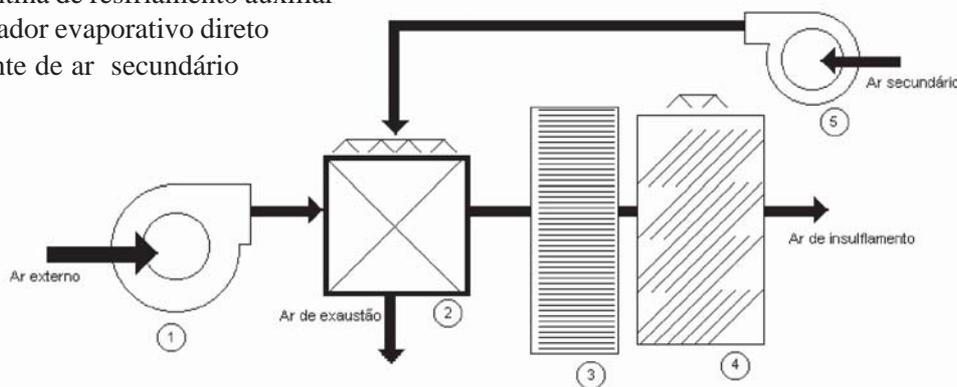


Figura 5. Resfriador em 3 estágios

DESEMPENHO DOS SISTEMAS INDERETO E DIRETO PARA ALGUMAS LOCALIDADES

O desempenho esperado para os sistemas de resfriamento evaporativo direto e indireto é mostrado na Tab. 1. Ela foi determinada para condições externas com temperatura de bulbo seco de projeto e temperatura de bulbo úmido coincidente de 1% para as cidades selecionadas. A efetividade do sistema direto foi assumida como 70% e a do sistema indireto como 90% (MUNTERS, 1999).

Um outro modo de avaliar rapidamente o desempenho de sistemas evaporativos é a utilização do “Índice de Desempenho do Resfriamento Evaporativo (ID)”, definido por:

$$ID = TBU - \Delta T$$

onde $\Delta T = T(TBS - TBU)$ é chamada de depressão de bulbo úmido. TBS e TBU são, respectivamente, as temperaturas de bulbo seco e de bulbo úmido do ar externo.

Esse índice será tanto menor quanto menor for a umidade relativa do ar, indicando o potencial do resfriamento evaporativo para o local. Watt e Brown (1997) recomendam que, de um modo geral, índices

(menores ou iguais a 10 indicam resfriamento para conforto, entre 11 e 16 resfriamento lenitivo (alívio) e índices acima de 16 classificam o local como não recomendado para utilização de sistemas de resfriamento evaporativo somente.

Tabela 1. Temperaturas nas saídas dos estágios

	TBU coincidente (1%)	Estágio indireto (°C)	estágio direto (°C)
(1) Belém	32,3/27	28,6	26,4
(2) Belo Horizonte	30/24,4	26,1	23,7
(3) Brasília	30/22	24,4	22,7
(4) Curitiba	30/23	25,1	22,1
(5) Florianópolis	32/27,1	28,6	26,6
(6) Fortaleza	31,4/26	27,6	25,4
(7) Maceió	32/25,7	27,6	24,6
(8) Natal	31,5/25,7	27,5	25,0
(9) Porto Alegre	35/26,3	28,9	25,4
(10) Recife	31,6/25,8	27,6	25,1
(11) Rio de Janeiro	35,3/27,3	29,7	26,5
(12) Salvador	31,2/26,1	27,6	25,5
(13) São Luis	32,5/26,5	28,3	25,8
(14) São Paulo	30,6/23	25,3	22,0
(15) Vitória	33,5/27,4	29,3	26,7

ECONÔMIA

Existem, atualmente em operação, mais de 20 milhões de resfriadores evaporativos residenciais em todo o mundo, economizando aproximadamente 60 milhões de barris de petróleo e evitando a emissão de 27 bilhões de libras de CO₂ anualmente. Nos E.U.A., somente o mercado de resfriadores evaporativos residenciais movimenta US\$ 180 milhões por ano, com mais de 4 milhões de unidades instaladas. O custo unitário do equipamento varia desde US\$ 35 para os sistemas diretos mais simples até US\$ 2000 para os sistemas completos com dutos, sendo o custo médio de US\$ 300 a US\$ 700.

O arranjo direto reduz os custos de operação entre 25% e 40% quando comparado aos custos de refrigeração mecânica somente (ASHRAE Handbook Applications, 1995), para produzir o mesmo efeito de resfriamento. Um sistema indireto/direto pode economizar entre 40% e 50% de energia em zonas moderadamente úmidas.

RESULTADOS

Os sistemas de resfriamento evaporativo podem ser: direto, indireto ou de mais de um estágio. Sistemas multiestágios utilizam combinações de sistemas indireto/direto ou indireto/direto/refrigeração de apoio, onde o apoio é realizado por sistemas de refrigeração convencionais. Com o avanço tecnológico e o desenvolvimento das células evaporativas os equipamentos atuais apresentam efetividades entre 70% e 75% para o sistema indireto e entre 90% e 95% para o sistema direto (MUNTERS, 1999; GLACIER-COR, 1999).

Através do emprego dos “Índices de Desempenho (ID) do Resfriamento Evaporativo”, que permitem diagnosticar a possibilidade de obtenção de resfriamento para conforto ou para alívio, pode-se verificar que valores de índice de desempenho menores ou iguais a 10 são obtidos para as cidades que apresentem, por exemplo, TBU de projeto menor ou igual a 22 °C com TBS igual ou maior que 34 °C, caracterizando uma umidade relativa de, aproximadamente, 35%. Para o

Brasil encontramos índices entre 11 e 16, que caracterizam resfriamento lenitivo, para Petrolina (PE), Uberlândia (MG), Campinas (SP), Pirassununga (SP), Brasília (DF), Campo Grande (MT), Londrina (PR), Caxias do Sul (RS) e Santa Maria (RS), entre outras.

Algumas cidades cujas condições climáticas permitem atingir a zona de conforto ASHRAE apenas por resfriamento evaporativo são: Belo Horizonte (MG), Brasília (DF), Campinas (SP), Caxias do Sul (RS), Curitiba (PR), Londrina (PR), São Paulo (SP) e Uberlândia (MG), entre outras. Para localidades com condições climáticas que não permitem atingir a zona de conforto apenas através do resfriamento evaporativo pode ser utilizado um processo de pré-desumidificação do ar por adsorção ou refrigeração mecânica de apoio.

CONCLUSÕES

Os sistemas de resfriamento evaporativo, embora ainda pouco utilizados no Brasil, possuem grande potencial para propiciar conforto térmico em locais onde a temperatura de bulbo úmido é relativamente baixa. Podem também ser uma alternativa aos sistemas convencionais em muitas situações ou serem utilizados em conjunto com os mesmos. Esse sistema torna possível reduzir o consumo de energia, sendo definitivamente vantajoso em ambientes que requerem grande quantidade de ar externo.

Conclui-se que, no Brasil, a utilização de sistemas evaporativos diretos encontra-se limitada devido a características climáticas regionais, porém o sistema indireto pode suprir as necessidades de conforto quando utilizado em conjunto com outros arranjos. Algumas alternativas viáveis são o uso do apoio da refrigeração mecânica por compressão de vapor tanto pós-resfriando o ar na saída da unidade evaporativa quanto pré-resfriando a água que será vaporizada, e ainda realização de uma pré-desumidificação do ar por adsorção, antes da entrada na unidade evaporativa.

Os sistemas evaporativos, além de melhorarem a qualidade do ar interior, devem ser explorados como conservadores de energia, gerenciadores de demanda e redutores de emissões de CFC e CO₂. O potencial de utilização desta tecnologia para condicionamento de ar para conforto é enorme pois ela é bastante simples a apropriada para inúmeras regiões do planeta.

ABSTRACT

The evaporative cooling process applied to air conditioning is an environmentally friendly system that uses air and water as working fluids. It can be an economical alternative to the vapor compression system in several applications. This paper presents the basic principles of the evaporative cooling process for human thermal comfort, the operation principles for direct, indirect, multi steps and hybrids evaporative cooling systems and presents technical considerations for the efficient use of these systems to air conditioning. It also presents some environmental and economical benefits proceeding of the utilization of this system.

KEY-WORDS

Evaporative cooling. Energy saves. Environmental support.

REFERÊNCIAS

- ASHRAE Handbook Applications, 1995. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, SI Edition, cap. 47.
- Camargo, J. R., Cardoso, S., Travelho, J. S., 2000. "Utilização do resfriamento evaporativo para conforto térmico humano em diversas cidades brasileiras", Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, CONEM 2000, Natal, RN.
- Cardoso, S., Camargo, J. R., Travelho, J. S., 1999. "Introdução à utilização do resfriamento evaporativo para condicionamento de ar automotivo", XV Congresso Brasileiro de Engenharia Mecânica, COBEM 99, Águas de Lindóia, SP.
- Chen, P. L. *et al.*, 1991. "A heat and mass transfer model for thermal and hydraulic calculations of indirect evaporative cooler performance", ASHRAE Transactions, v.97, part2, p. 852 - 865.
- Glacier-Cor Cellulose Evaporative Cooling Pads, 1999. "Operation and maintenance manual". Catálogo do fabricante, Scottsdale, Arizona.
- Munters, 1999. "Sistema de ventilação com resfriamento do ar através do processo natural de

eporação da água”, apostila, Curitiba, mimeo.

Schibuola, L., 1997. “High-efficiency recovery for air-conditioning applications in a mild climate: a case study”, *Applied Thermal Engineering*, vol. 17, n. 5, p.447-454.

TRANE, 1978. “Manual de ar condicionado”. The Trane Company, La Crosse, Wisconsin.

Watt, J. R. ; Brown , W. K., 1997. “Evaporative air conditioning handbook”. 3ª ed., The Fairmont Press, Inc., Lilburn, GA.