

# UTILIZAÇÃO DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO PARA CONFORTO TÉRMICO HUMANO EM DIVERSAS CIDADES BRASILEIRAS

**José Rui Camargo**

**Jerônimo dos Santos Travelho**

**Sebastião Cardoso**

Universidade de Taubaté, Departamento de Engenharia Mecânica, Rua Daniel Danelli, s/ nº, Jardim Morumbí, 12060-440, Taubaté, SP. Brasil. E-mail: [ru@engenh.mec.unitau.br](mailto:ru@engenh.mec.unitau.br)

## Resumo

Este trabalho apresenta os princípios básicos para a utilização de sistemas de condicionamento de ar por processos de resfriamento evaporativo, destinados ao conforto térmico humano. Discorre sobre os princípios de operação dos sistemas de resfriamento direto e indireto, sistemas multiestágios e a utilização do sistema de refrigeração por compressão mecânica de vapor como apoio. Analisando as referências bibliográficas a respeito do resfriamento evaporativo verifica-se a inexistência de um estudo metodológico efetivo com relação à utilização desse sistema aplicado às diferentes características climáticas regionais do Brasil. Por esse motivo, este trabalho apresenta dois métodos que podem ser utilizados para a determinação de referenciais para utilização eficiente de sistemas de resfriamento evaporativo, aplicando-os a diversas cidades.

**Palavras-chave:** Resfriamento evaporativo, Conforto térmico, Condicionamento de ar.

## 1- 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 o baixo consumo de energia, facilidades de manutenção, instalação e operação. 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.

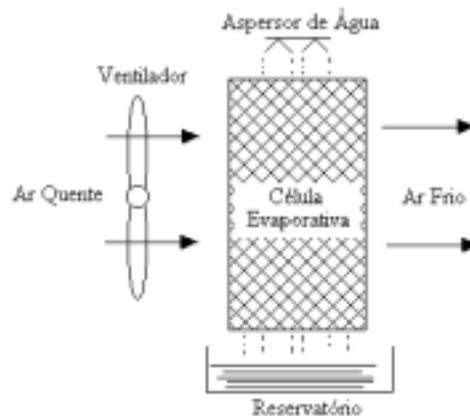
## 2. O RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

O processo de resfriamento evaporativo é largamente utilizado em torres de resfriamento de água, lavadores de ar, condensadores evaporativos, resfriadores de líquidos e também para amenizar a temperatura em ambientes onde existe grande geração de calor. No entanto 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.

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

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.

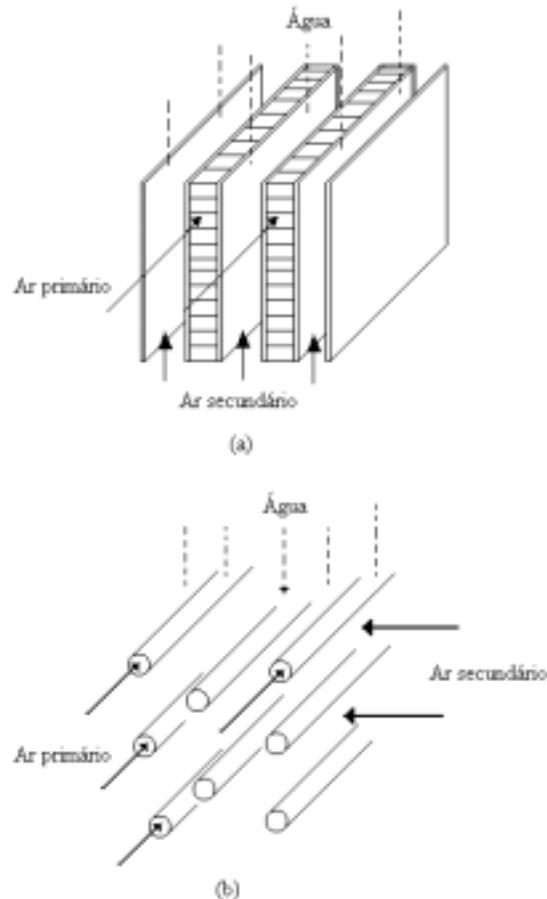


**Figura 1.** Resfriador evaporativo direto (RED)

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 tipos de 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).

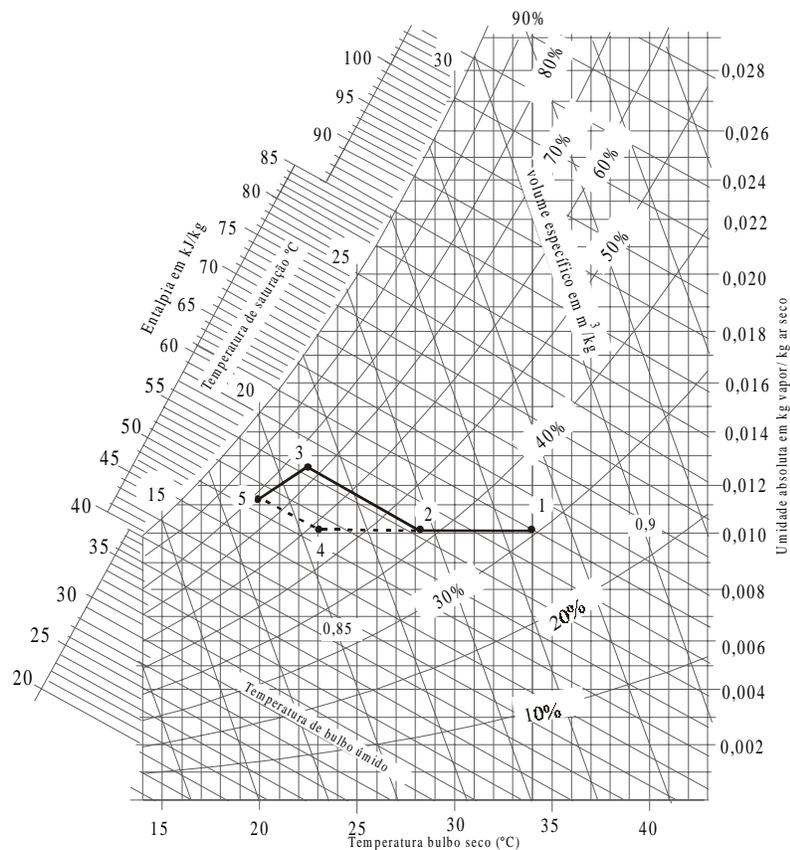
Para um resfriador ideal, isto é, com 100% de efetividade, as temperaturas de bulbo seco e de ponto de orvalho tenderiam a ser iguais à temperatura de bulbo úmido.

### 3. 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 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. 3 mostra processos de resfriamento em 3 estágios. O processo 1-2 é realizado em uma unidade de resfriamento evaporativo indireto. Os processos 2-3 e 4-5 são realizados em uma unidade direta. 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.



**Figura 3.** Processos de resfriamento em 3 estágios

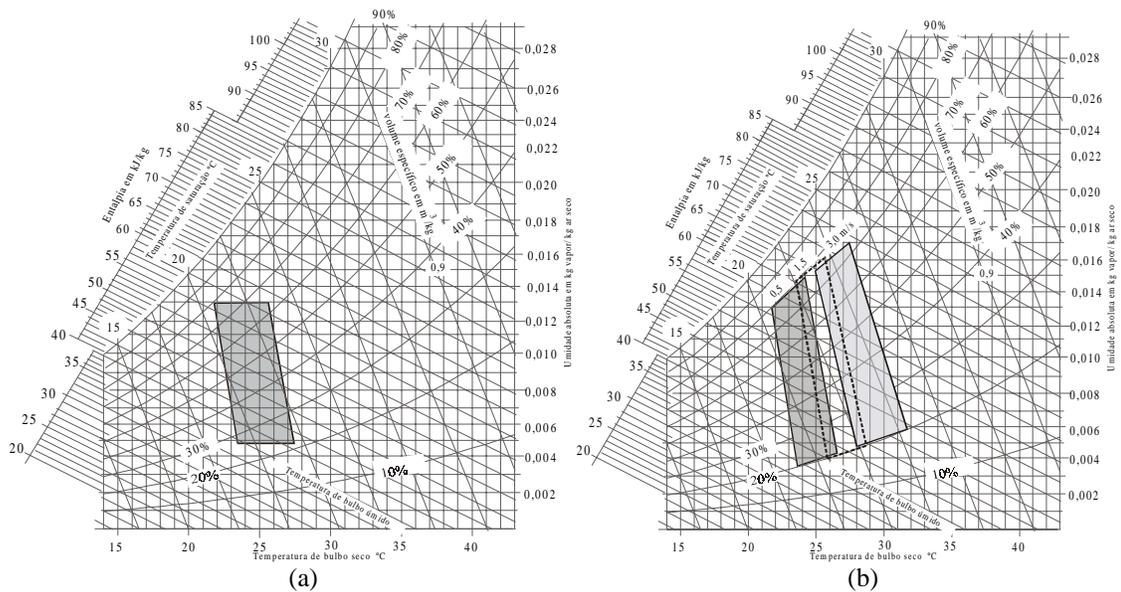
#### 4. ASPECTOS DE CONFORTO PARA CONDICIONAMENTO DE AR POR RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Uma vez que a temperatura, a umidade e a movimentação do ar interagem de forma independente, é necessário considerá-las juntas pois todos esses fatores contribuem para determinar a sensação de frio ou calor sentida pela corpo humano. A Temperatura Efetiva (TE) é uma composição desses fatores. McGregor (1995) relata que, apesar do grande número de índices empíricos biometeorológicos, o mais utilizado por toda a indústria de condicionamento de ar é a temperatura efetiva (TE). Ela é definida como a temperatura do ar já saturado que provoca a mesma sensação térmica que as condições ambientais. Esse índice, que integra os efeitos da temperatura, da umidade e da movimentação do ar tem sido usado para avaliar as condições bioclimáticas de localidade equatoriais e tropicais (Chowdhury e Ganesan, 1983).

Uma carta psicrométrica modificada, incluindo a zona de conforto da ASHRAE é mostrada na Fig. 4 (a). Esta zona de conforto foi depois expandida para resfriamento evaporativo (Fig.4 (b)), conforme apresentado por Crow (1972) e pela ASHRAE (1995).

Devido à forma da zona de conforto expandida da ASHRAE tem-se que a curva de umidade relativa de 80% é o limite superior para o resfriamento evaporativo, podendo ser usada a umidade relativa de 70% como um limite alternativo em ambientes com pouca ventilação ou onde a umidade pode prejudicar os produtos ou objetos dentro do ambiente.

Velocidades do ar abaixo de 1 m/s são recomendadas para pessoas em trabalho sedentário, sendo que velocidades maiores são utilizadas para atividades manuais e físicas.



**Figura 4.** Zonas de conforto ASHRAE. (a) representa a zona de conforto para inverno e verão de acordo com a temperatura efetiva e (b) representa a mudança relativa na zona de conforto para o resfriamento evaporativo.

## 5. ÍNDICES DE DESEMPENHO(ID) DO RESFRIAMENTO EVAPORATIVO

Um método rápido para se avaliar aproximadamente o potencial do resfriamento evaporativo é utilizar o índice de desempenho ID, definido por:

$$ID = TBU - \Delta T \quad (5.1)$$

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

Esse índice será tanto menor quanto maior for a diferença entre as temperaturas de bulbo seco e úmido, ou seja, quanto menor a umidade relativa do ar. Isso indica que, quanto menor o índice, mais efetivo é o resfriamento evaporativo local. Assim, esse número indica o potencial do resfriamento evaporativo.

Watt (1963) recomenda 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.

## 6. NOMOGRAMA E GABARITO

Este outro método é uma adaptação daquele proposto por Watt (1963) e por Watt e Brown (1997).

A Fig. 5 é uma carta termométrica adaptada que mostra a interrelação, no verão, da temperatura de bulbo seco, bulbo úmido e velocidade do ar na obtenção das temperaturas efetivas. A zona de conforto ASHRAE para a latitude de 41° Norte (a carta teve origem em Pittsburgh, que está nessa latitude) foi superposta sobre ela, em seu limite superior para a temperatura efetiva de 26,1 °C.

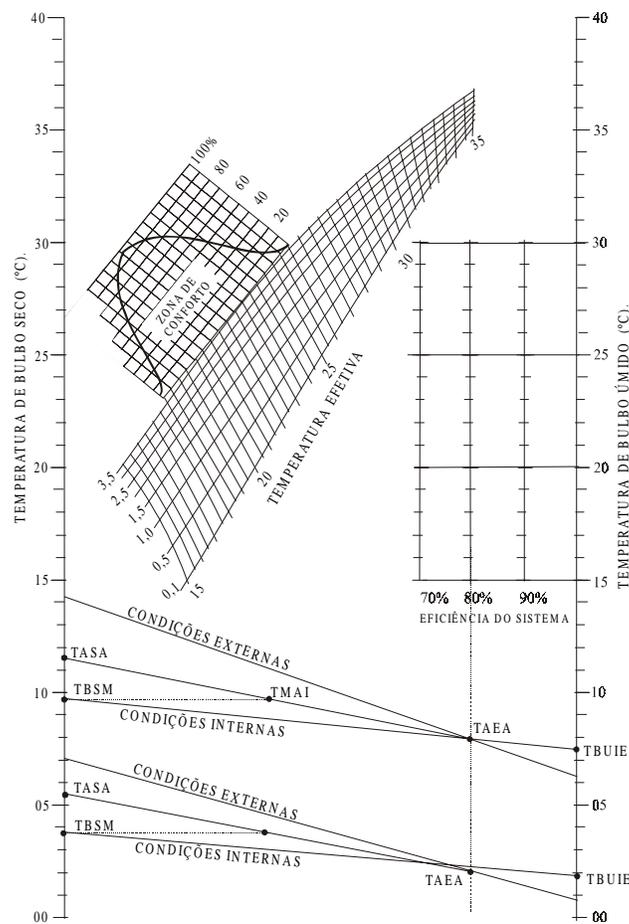
Como a carta de temperaturas efetivas não leva em conta a quantidade de radiação solar incidente, um aumento de aproximadamente  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  deve ser feito na temperatura efetiva para cada 5 graus de redução na latitude a partir da latitude de  $41\text{ }^{\circ}$ , ou seja, a zona de conforto mostrada na Fig. 5 move-se para a direita aproximadamente de  $0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$  a cada redução de 5 graus na latitude.

Para determinar as condições climáticas externas necessária à obtenção do resfriamento para conforto, desenvolveu-se, neste trabalho, um gabarito calculador auxiliar, mostrado na parte inferior da figura, e serve para fixar os limites de resfriamento para conforto (gabarito superior) e para alívio (gabarito inferior).

Para utilizar o gabarito copie-o em uma folha transparente e coloque-o sobre a carta com a linha de “condições internas” cruzando a intersecção da máxima velocidade permissível do ar com a máxima temperatura efetiva da zona de conforto regional. A intersecção mais abaixo à direita representa a máxima temperatura de bulbo úmido externa capaz de prover conforto, sob as condições dadas. A máxima diferença entre a temperatura de bulbo seco e a de bulbo úmido do gabarito indica a mínima depressão de bulbo úmido requerida.

Pela definição de temperatura de projeto (Goulart *et al.*, 1998), as localidades que possuem esses requisitos, provavelmente desfrutarão de resfriamento na zona de conforto ao menos 80% a 90% de todas as horas quentes. O mesmo procedimento deve ser seguido para o resfriamento lenitivo.

Watt (1963) cita que o resfriamento para conforto por RED na latitude de  $41\text{ }^{\circ}$  deve obter TE igual a  $26,1\text{ }^{\circ}\text{C}$ , requerendo TBU de projeto não acima de  $24,8\text{ }^{\circ}\text{C}$ .



**Figura 5.** Nomograma e gabarito

## 7. 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.

O nomograma mostrado na Fig. 5 foi adaptado de Watt (1963) o qual, por sua vez, foi elaborado para a latitude de 41° de latitude norte. Nessa latitude o resfriamento para conforto por resfriamento evaporativo direto deve obter uma temperatura efetiva máxima igual a 26,1 °C, requerendo uma TBU de projeto não acima de 24,8 °C. Similarmente, uma vez que cada mudança de 5° na latitude muda a zona de conforto de 0,5 TE, resfriadores evaporativos localizados no norte da Argentina, Uruguai e sul do Rio Grande do Sul devem obter TE máxima de 26,8 °C, requerendo TBU de projeto de 24,4 °C ou menor, para velocidade do ar de 0,1 m/s. Correspondentemente, para a mesma velocidade do ar, localidades no norte do Rio Grande do Sul, em Santa Catarina e sul do Paraná devem ter TE de 27,3 °C ou menor, nas quais 24,9 °C é a máxima TBU de projeto permissível. No norte do Paraná, São Paulo, Rio de Janeiro, Mato Grosso do Sul e sul de Minas Gerais o resfriamento para conforto precisa obter TE de 27,8 °C ou menor, requerendo uma TBU de projeto máxima de 25,5 °C. O norte de Minas Gerais, o sul do Mato Grosso e Goiás requerem TBU máxima de projeto de 26 °C. A Bahia, sul de Tocantins, norte do Mato Grosso, Rondônia e Acre requerem TBU máxima de projeto de 26,6 °C. O sul do Maranhão, o norte de Tocantins, o sul do Pará e o sul do Amazonas requerem TBU de projeto máxima de 27,3 °C. Finalmente, o norte dos estados do Maranhão, Pará, Ceará e Amazonas, além de Amapá e Roraima requerem TBU máxima de projeto de 27,9 °C. Ressalta-se que os valores apresentados acima referem-se à máxima TBU de projeto requerida, ou seja, a temperatura que leva ao limite superior da zona de conforto apresentada no nomograma da Fig. 5. Para valores de TBU que proporcionem o conforto para 100% dos ocupantes as temperaturas apresentadas deve ser reduzidas de aproximadamente 4,5 °C.

## 8. 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.

O importante é que o engenheiro, quando considerar o uso de resfriadores evaporativos, utilize registros climáticos atualizados do local para determinar o que pode ser conseguido em

termos de conforto. Localidades com temperatura de bulbo úmido de projeto menores que 24 °C são candidatas naturais aos sistemas de ar condicionado por resfriamento evaporativo.

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.

Ressalta-se que uma maior atenção deve ser dada às regiões de clima tropical úmido pois são ambientes marginais em termos de conforto humano. E será, talvez, nessas áreas marginais que o impacto negativo de uma mudança bioclimática, provocada pelo efeito estufa, será sentida mais intensamente.

## 9. REFERÊNCIAS

- ASHRAE Handbook Applications, 1995. American Society of Heating, Refrigerating and Air Conditioning Engineers, SI Edition, cap. 47.
- 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, COBEM99, 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.
- Chowdhury, A., Ganesan, H.R., 1983. "Meteorological requirements on airconditioning in relation to human habitat for comfort", Mausam 34,3: 281-286.
- Crow, L. W., 1972. "Weather data related to evaporative cooling", Research Report n° 2223. ASHRAE Transactions 78 (1): 153-164.
- Glacier-Cor Cellulose Evaporative Cooling Pads, 1999. "Operation and maintenance manual". Catálogo do fabricante, Scottsdale, Arizona.
- Goulart, S.L., Lamberts. R. , Firmino, S., 1998. "Dados climáticos de 14 cidades brasileiras", RPA Editoria Ltda., São Paulo.
- McGregor, G. R., 1995. "The human bioclimates of Western and South Pacific islands and climate change". Int. J. Biometeorology, 39:5-12.
- Munters, 1999. "Sistema de ventilação com resfriamento do ar através do processo natural de evaporação 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., 1963. "Evaporative air conditioning". The Industrial Press, New York.
- Watt, J. R. ; Brown , W. K., 1997. "Evaporative air conditioning handbook". 3ª ed., The Fairmont Press, Inc., Lilburn, GA.