



SISTEMAS DE RESFRIAMENTO EVAPORATIVO ACOPLADOS A DESUMIDIFICADORES DESSECANTES PARA DIVERSAS CIDADES BRASILEIRAS

José Rui Camargo

Universidade de Taubaté – UNITAU – Departamento de Engenharia Mecânica
Rua Daniel Danelli, s/n. – CEP: 12060-440 – Taubaté – SP.
Cursando doutorado na FEG/UNESP – Departamento de Energia
e-mail: rui@engenh.mec.unitau.br

Carlos Daniel Ebinuma

Universidade Estadual Paulista – UNESP
Campus de Guaratinguetá – FEG – Departamento de Energia
Rua Ariberto Pereira da Cunha, 333 – CEP: 12500-000 – Guaratinguetá – SP.
e-mail: ebinuma@feg.unesp.br

Resumo. *O resfriamento evaporativo consiste na utilização da evaporação da água através da passagem de um fluxo de ar, provocando a redução na temperatura do ar. Os equipamentos podem ser de refrigeração evaporativa direta ou indireta. Apesar de serem ainda pouco utilizados no Brasil possuem grande potencial para propiciar conforto térmico em locais em que a temperatura de bulbo úmido é relativamente baixa. No entanto apresentam baixa eficiência em regiões em que a umidade do ar é alta. Este trabalho procura realizar um estudo de viabilidade da utilização de sistemas de condicionamento de ar por resfriamento evaporativo aplicados ao conforto térmico humano em regiões de clima úmido através do acoplamento desses sistemas a sistemas de desumidificação por adsorção. Apresenta, inicialmente, o princípio de funcionamento de sistemas de resfriamento evaporativo e de sistemas de desumidificação dessecante. A seguir, promove um estudo de sistemas acoplados, nos quais ocorre, inicialmente, uma pré-desumidificação por adsorção por meio de um trocador de calor tipo cilindro rotativo, com fluxos em contracorrente e a seguir o ar é resfriado evaporativamente. Estuda-se a aplicação desse sistema a diversas cidades brasileiras, caracterizadas por diferentes condições climáticas.*

Palavras-chave: *Resfriamento evaporativo, desumidificação por adsorção, conforto térmico.*

1. INTRODUÇÃO

Na última década, a tecnologia de sistemas de resfriamento evaporativo acoplados a desumidificadores por adsorção tem emergido como uma alternativa ou como um complemento aos sistemas convencionais de refrigeração por compressão de vapor. Um sistema típico combina o sistema de desumidificação, que utiliza um cilindro rotativo impregnado de material dessecante, com resfriadores evaporativos diretos e indiretos, permitindo o fornecimento de ar filtrado e resfriado em condições de temperatura, umidade e velocidade que propiciam conforto térmico ambiental, mesmo em regiões de clima equatorial e tropical como o Brasil. Tais sistemas levam a grande economia de energia, principalmente em locais onde existem fontes de energia térmica

facilmente disponíveis, onde o preço da eletricidade é alto, onde a porcentagem de calor latente é alta ou onde a temperatura de ponto de orvalho requerida é baixa.

O resfriamento evaporativo consiste na utilização da evaporação da água através da passagem de uma corrente de ar, provocando a redução da temperatura do ar. Apesar de serem ainda pouco utilizados no Brasil possuem grande potencial para propiciar conforto térmico em locais em que a temperatura de bulbo úmido é relativamente baixa.

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 (Camargo, 2000). Assim, em um RED, 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 resfriamento real (redução na entalpia) e a mínima temperatura que se pode atingir é a de bulbo úmido do ar que entra no sistema. É possível obter menores temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na saída mas para isso a água recirculada que supre o equipamento deve ser pré-esfriada.

Nos equipamentos de resfriamento evaporativo indireto o ar, relativamente seco, é mantido separado do ar do lado molhado, onde o líquido está sendo vaporizado. Neste caso, o ar que será utilizado para condicionar o ambiente (ar primário) transfere calor ou 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 (Camargo e Ebinuma, 2001).

A efetividade de um resfriador evaporativo é definida como a taxa entre a queda real da 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).

A secagem por adsorção é um processo físico de desumidificação que consiste na fixação das moléculas de um adsorvato na superfície de um adsorvente, geralmente poroso e granuloso, isto é, é o processo de depositar moléculas de uma substância (água, no caso) na superfície de outra substância. Os adsorventes mais utilizados são o dióxido de silício (SiO_2 – sílica-gel), o cloreto de lítio (CLi) e a alumina ativada (Al_2O_3). Tais substâncias são geralmente depositadas em um substrato de fibra de vidro, celulose ou alumínio. A aparência é a de um fino favo de mel estriado. O adsorvente exerce uma atração para as moléculas de água devido à sua porosidade e essa atração depende do tamanho de seus poros. Operam, assim, de modo similar a uma esponja, exercendo uma atração mecânica. Esse processo é regenerativo pois a substância adsorvente, após estar saturada de umidade, permite a liberação da água quando submetida a um aquecimento (desorção). A energia calorífica para a regeneração pode ser obtida por eletricidade, vapor d'água ou ar quente.

A adição de um desumidificador dessecante a um sistema de condicionamento de ar por resfriamento evaporativo propicia um controle da umidade em separado do controle de temperatura. Isto é particularmente benéfico em aplicações em que a carga térmica de calor latente é alta em comparação com a carga de calor sensível, ou quando elas atingem o máximo em horários diferentes. Aplicações típicas são supermercados, shopping centers, teatros, hospitais, centros cirúrgicos, berçários, hotéis, motéis e edifícios de escritórios.

Nos últimos anos, novas tecnologias relativas ao processo de desumidificação por adsorção aplicado ao resfriamento em sistemas de condicionamento de ar vêm se desenvolvendo, tais como apresentados por Shen e Worek (1996), Belding e Delmas (1997), Jalalzadeh-Azar (2000), Jalalzadeh et al (2000), Vineyard et al (2000), Jain et al (2000a), Jain et al (2000 b) e Zhenqian et al (2000).

Os sistemas de resfriamento evaporativo utilizando pré-desumidificação por adsorção apresentam perspectivas promissoras para condicionamento de ar para conforto, principalmente em regiões em que a umidade do ar é alta. Podem ser utilizados em sistemas de cogeração em que o

calor necessário à reativação pode ser obtido dos gases de escape de turbinas a gás ou de motores de combustão interna ou, ainda do vapor em ciclos que utilizam turbinas a vapor.

A Fig. (1) mostra um sistema de resfriamento evaporativo acoplado a um desumidificador tipo Honeycombe. Os resfriadores evaporativos utilizados podem ser diretos (RED), indiretos (REI) ou uma composição desses dois sistemas.

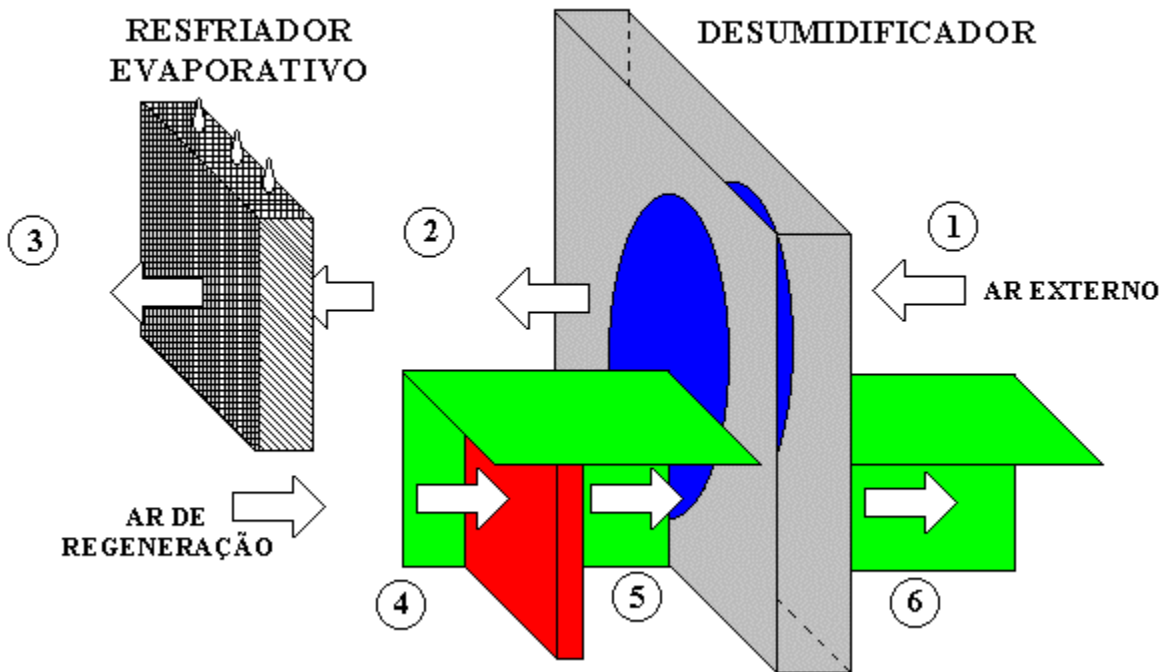


Figura 1 – Resfriador evaporativo acoplado a um desumidificador dessecante

Da Fig. (1) pode-se determinar a efetividade (ϵ) do desumidificador, que é definida como:

$$\epsilon = \frac{\dot{m}_p (X_1 - X_2)}{\dot{m}_{\min} (X_1 - X_5)} = \frac{\dot{m}_R (X_6 - X_5)}{\dot{m}_{\min} (X_1 - X_5)} \quad (1)$$

onde:

ϵ = efetividade sensível, latente ou total

\dot{m}_p = fluxo de massa do ar de processo (ponto 3)

\dot{m}_R = fluxo de massa do ar de regeneração (ponto 4)

\dot{m}_{\min} = valor mínimo de cada fluxo de massa

X = temperatura de bulbo seco (para efetividade sensível), umidade absoluta (para efetividade latente) ou entalpia total (para efetividade total)

Assim, tem-se que:

$$\dot{m}_p (X_1 - X_2) = \dot{m}_R (X_6 - X_5) \quad (2)$$

2. RESFRIADORES EVAPORATIVOS ACOPLADOS A UM DESUMIDIFICADOR DESSECANTE – SISTEMA UTILIZADO

Neste trabalho analisa-se a viabilidade de utilização de sistemas de condicionamento de ar por resfriamento evaporativo acoplados a um desumidificador por adsorção, promovendo um estudo para oito cidades brasileiras escolhidas em função de suas diferentes características climáticas. As

idades escolhidas são: Belém (PA), Brasília (DF), Campo Grande (MS), Manaus (AM), Rio de Janeiro (RJ), São Luis (MA), São Paulo (SP) e Terezina (PI).

A Fig. (2) mostra, em um diagrama psicrométrico, a zona de conforto ASHRAE e a zona de conforto modificada para resfriamento evaporativo, que leva em consideração o efeito da movimentação do ar. Mostra também a localização das oito cidades brasileiras em função das condições externas (TBS e TBU) de projeto, recomendadas pela NBR-6401. A linha pontilhada representa o processo que leva à zona de conforto e que é utilizado neste trabalho. A partir de uma condição qualquer faz-se primeiramente uma desumidificação por adsorção seguida de um resfriamento evaporativo indireto e de um direto.

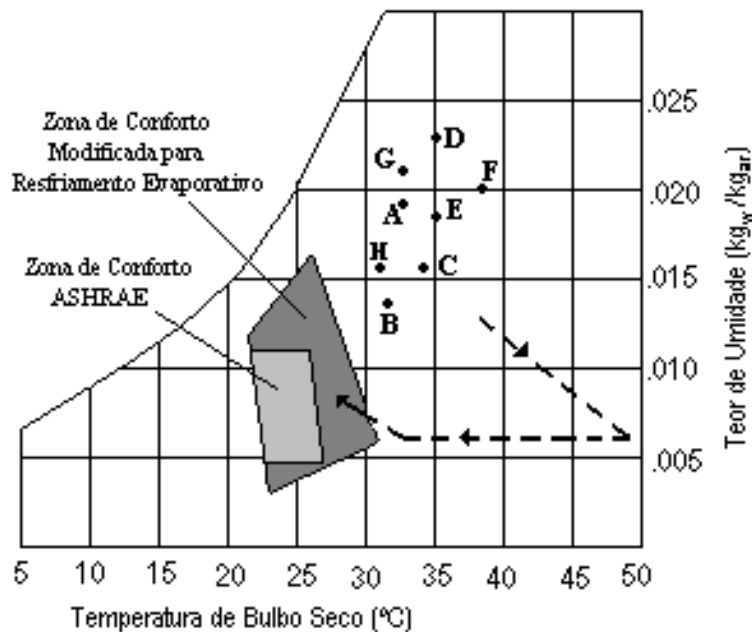


Figura 2 – Diagrama psicrométrico com as zonas de conforto e as condições externas de projeto para Belém (A), Brasília (B), Campo Grande (C), Manaus (D), Rio de Janeiro (E), Terezina (F), São Luis (G) e São Paulo (H).

A Fig. (3) mostra o sistema utilizado neste trabalho, que é composto por um desumidificador dessecante rotativo acoplado a dois resfriadores evaporativos diretos e a um indireto.

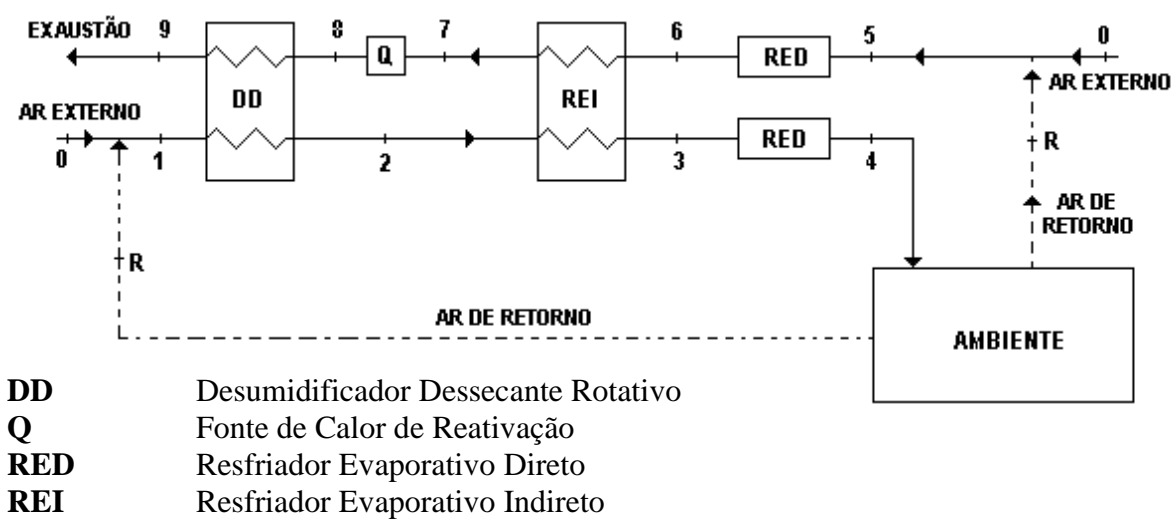


Figura 3 – Sistema de resfriamento evaporativo acoplado a um desumidificador dessecante

Nesta configuração o ar externo é primeiramente misturado com ar de retorno e passa pelo desumidificador perdendo calor latente (umidade) e ganhando calor sensível (temperatura). Logo após ele é resfriado primeiramente em uma unidade REI e após em uma unidade RED, sendo introduzido no ambiente condicionado em condições de temperatura e umidade satisfatórias ao conforto térmico humano (processo 0-1-2-3-4). O ar de reativação do adsorvente é composto também de uma mistura de ar externo com ar de retorno que primeiramente é resfriado em um RED e depois em um REI. Em seguida recebe calor de uma fonte que pode ser elétrica, vapor ou queima direta de um combustível (normalmente gás natural) para, em seguida passar pelo desumidificador, retirando a umidade do material adsorvente (processo de reativação 5-6-7-8-9).

3. METODOLOGIA:

Para as condições do ar externo para as várias cidades, escolhidas aleatoriamente, tomou-se valores de acordo com a NBR 6401 – Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto – Parâmetros Básicos de Projeto. Para o ar de retorno utilizou-se a condição determinada pelo ARI (American Institute of Refrigeration).

A Fig. (4) mostra os processos psicrométricos que ocorrem para o ar de processo de acordo com os pontos mostrados na Fig.(3). O ponto 0 representa a condição externa de projeto para cada cidade, o ponto R representa a condição do ar de retorno, o ponto 1 corresponde à mistura de ar externo com ar de retorno, o ponto 2 é a saída do desumidificador, o ponto 3 é a saída do REI e o ponto 4 é a saída do RED e é a condição do ar a ser insuflado no ambiente a ser condicionado.

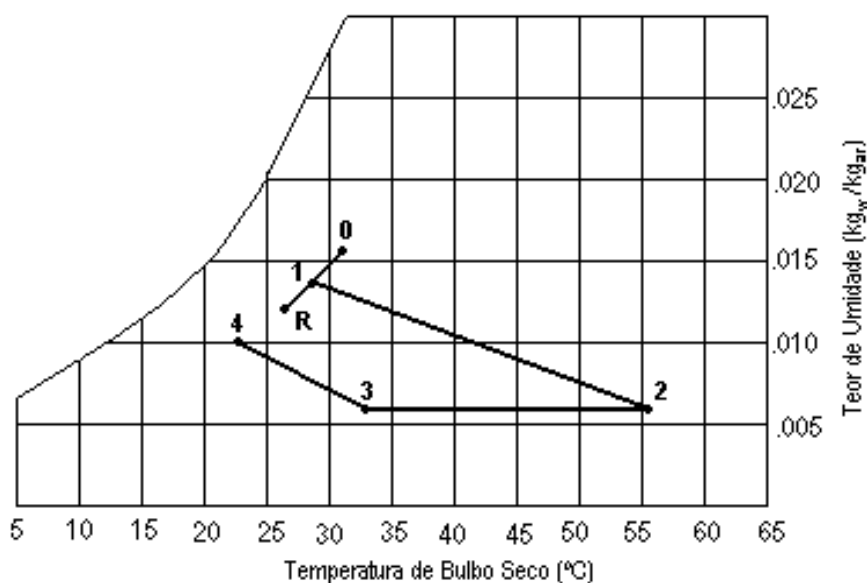


Figura 4 - Processos psicrométricos para o sistema utilizado

A efetividade do resfriador evaporativo direto foi tomada como 90% e a do indireto como 70% (Munters, 1999).

A vazão de ar de insuflamento para o ambiente condicionado foi tomada como 1,6667 m³/s e para o retorno adotou-se a taxa de 50% para cada ramo.

As condições de saída do desumidificador foram determinadas a partir das condições de entrada utilizando dois softwares disponibilizados por fabricantes de equipamentos de desumidificação por adsorção: *Novelair Technologies - Desiccant Wheel Selection Program – Versão 1.0.5* e *Munters Cargocaire DH Selection Program – Versão 9.5a*.

Foi utilizada a temperatura mínima de reativação de 71,1°C e uma relação R/P (ar de reativação/ar de processo) igual a 0,847, também a mínima possível, de acordo com dados do fabricante do desumidificador.

Para a determinação das temperaturas e umidades nos pontos apresentados na Figura 3 utilizou-se as seguintes equações de balanço de energia:

$$\begin{aligned}
 T_3 &= T_2 - \varepsilon_i (T_2 - T_{6w}) \\
 T_4 &= T_3 - \varepsilon_d (T_3 - T_{3w}) \\
 T_7 &= T_6 + \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}_R} (T_2 - T_3) \\
 T_9 &= T_8 - \frac{\dot{m}_P}{\dot{m}_R} (T_2 - T_{1w})
 \end{aligned} \tag{3}$$

4. RESULTADOS

A Tab. (1) apresenta os valores encontrados para São Paulo, para todos os pontos indicados na Fig. (3).

Tabela 1: Propriedades termodinâmicas do ar de insuflamento e de reativação para São Paulo

PONTO	TBS (°C)	TBU (°C)	w (kg _w /kg _{ar})	h (kJ/kg)	s (kJ/kg K)
AMBIENTE	25	17,98	0,01	70,63	6,863
R	26,7	21,52	0,0114	82,57	6,869
0	31	24	0,016	91,9	6,883
1	28,85	21,83	0,0135	83,61	6,876
2	47,33	23,44	0,00827	89,0	6,936
3	29,48	18,09	0,00828	70,83	6,878
4 <i>minimo</i>	19,22	18,09	0,01253	71,15	6,843
5	28,85	21,83	0,0135	83,61	6,876
6	22,5	21,83	0,0162	83,86	6,855
7	40,55	26,58	0,0162	102,5	6,914
8	71,11	32,98	0,0162	134,1	7,008
9	52,61	31,83	0,02146	128,5	6,952

Utilizando a mesma metodologia encontra-se os valores apresentados na Tab. (2), que mostra as condições de insuflamento do ar no ambiente condicionado para outras cidades brasileiras, em função da condição climática para verão, conforme Fig. (2).

Tabela 2. Localização, condições externas e de insuflamento para várias cidades brasileiras

CIDADE	LOCALIZAÇÃO		CONDIÇÃO EXTERNA		INSUFLAMENTO	
	ALTITUDE	LATITUDE	TBS (°C)	TBU (°C)	TBS (°C)	TBU (°C)
BELÉM	13 m	1° 27'S	33	27	21,7	20,7
BRASÍLIA	1061 m	15° 53'S	32	23,5	19,86	18,7
C. GRANDE	693 m	20° 26'S	34	25	20,6	19,5
MANAUS	25 m	3° 10'S	35	29	22,7	21,7
RIO JANEIRO	61 m	22° 55'S	35	26,5	21,4	20,3
SÃO LUÍS	53 m	2° 35'S	33	28	22,61	21,23
SÃO PAULO	792 m	23° 31'S	31	24	19,2	18,1
TEREZINA	57 m	5° 4'S	38	28	22,47	21,04

5. DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Como pode ser verificado, pela Tab.(2), este trabalho utiliza, para análise, tanto cidades de latitudes baixas como médias. As cidades de latitudes baixas como Belém (01°27'), São Luis (02°35') e Manaus (03°08') caracterizam-se pelo clima equatorial (quente e úmido). Nesta região, como o sol está alto durante todo o ano, as variações de temperatura (amplitude térmica) são pequenas e o conforto humano é determinado mais pela umidade que pela temperatura. Com o aumento da latitude existem variações mais amplas na altitude do sol durante o ano e ocorrem maiores variações anuais de temperatura. Nas cidades com latitude média, como Campo Grande (20°26'), Rio de Janeiro (22°55') e São Paulo (23°31'), percebe-se a transição para o clima temperado, com uma variação mais nítida entre as quatro estações. A amplitude térmica é mais significativa (próxima de 10°C). Das cidades analisadas, a que apresenta o clima mais seco é Brasília e o mais úmido é Manaus.

O material adsorvente utilizado pelo software foi o dióxido de silício (sílica-gel), que tem como característica uma regeneração a baixas temperaturas. Utilizou-se, assim, uma temperatura de regeneração de aproximadamente 70°C, o que levou a uma temperatura máxima do ar de processo, para São Paulo, de 47,3°C na saída do desumidificador.

Observa-se, da Tab. (2), que a temperatura de insuflamento mínima foi obtida para São Paulo (19,2°C) e a máxima para Manaus (22,7°C), ou seja, apesar de serem cidades com características climáticas totalmente diferentes, obteve-se uma diferença de temperatura de apenas 3,5°C.

Pode-se notar ainda, pela Tab. (2), que, para todas as cidades estudadas, a condição do ar de insuflamento permite atingir a zona de conforto mostrada na Fig. (2), o que demonstra a viabilidade da utilização desse sistema para regiões de clima tropical e equatorial.

6. CONCLUSÕES

Este trabalho apresenta, inicialmente, o princípio de funcionamento de sistemas de resfriamento evaporativo e de sistemas de desumidificação por adsorção para, a seguir, utilizar um sistema acoplado de modo a estudar a viabilidade de sua utilização para condicionamento de ar para conforto em regiões de clima tropical e equatorial. Neste sistema faz-se, inicialmente, uma pré-desumidificação do ar a ser insuflado no ambiente utilizando um desumidificador tipo cilindro rotativo e, a seguir, esse ar é resfriado evaporativamente.

Estuda-se a aplicação desse sistema a oito cidades brasileiras, caracterizadas por diferentes condições climáticas concluindo-se que, para todas as cidades estudadas, é possível atingir a zona de conforto, tendo em vista as condições do ar que será insuflado no ambiente. Isso demonstra a viabilidade da utilização desse sistema para conforto térmico humano em regiões de clima úmido.

7. REFERÊNCIAS

- ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas, 1980. “NBR-6401, Instalações Centrais de Ar Condicionado para Conforto – Parâmetros Básicos de projeto”.
- Belding, W. A., Delmas, M.P.F., 1997. “Novel desiccant cooling system using indirect evaporative Cooler”, ASHRAE Transactions, vol. 103, part 1, pp. 841-847.
- Camargo, J. R., 2000. “Análise de métodos para avaliar a viabilidade técnica de sistemas de resfriamento evaporativo aplicados ao condicionamento de ar para conforto”. Departamento de Engenharia mecânica, Universidade de Taubaté. Dissertação de Mestrado. Taubaté, SP, 106 p.
- Camargo, J. R. e Ebinuma, C. D., 2001. “Resfriamento evaporativo: poupando a energia e o meio ambiente”. Jornada de Iniciação Científica e de Pós-Graduação, JORNADA 2001, UNESP/FEG, 03/06 set 2001, Guaratinguetá, SP.
- Jain, S.; Dhar, P. L. E Kaushik, S. C., 2000a. “Optimal design of liquid dessicant cooling systems”. ASHRAE Transactions: Research, pp. 79-86, Minneápolis, USA.

- Jain, S.; Dhar, P. L. e Kaushik, S. C., 2000b. “Experimental studies on the dehumidifier and regenerator of a liquid desiccant cooling system”. Applied Thermal Engineering 20 (2000), pp.253-267.
- Jalalzadeh-Azar, A. A., 2000. “Consideration of transient response and energy cost in performance evaluation of a desiccant dehumidification system”. ASHRAE Transactions: Research, pp. 210-216, Minneapolis, USA.
- Jalalzadeh-Azar, A. A., Steele, W. G. e Hodge, B. K., 2000. “Performance characteristics of a commercially available gas-fired desiccant system”. ASHRAE Transactions: Research, 106 (1), pp. 95-104, Minneapolis, USA.
- Munters, 1999. “Sistema de ventilação com resfriamento do ar através do processo natural de evaporação da água”, apostila, Curitiba, mimeo.
- Shen, C. M. e Worek, W. M., 1996. “The second-law analysis of a recirculation cycle desiccant cooling system: cosorption of water vapor and carbon dioxide”. Atmospheric Environment, vol. 30, n.9, pp. 1429-1435.
- TRANE, 1978. *Manual de ar condicionado*. The Trane Company, La Crosse, Wisconsin.
- Vineyard, E. A., Sand, J. R. e Durfee, D. J., 2000. “Parametric analysis of variables that affect the performance of a desiccant dehumidification system”. ASHRAE Transactions: Research, 106 (1), pp. 87-94, Minneapolis, USA.
- Zhenqian, C. e Mincheng, S., 2000. “Indirect evaporative cooling and desiccant dehumidifying using advanced heat pipe heat exchangers”. Air Conditioning in High Buildings’ 2000, IIF/CAR, 24/ 27 oct 2000, pp. 318-321, Shanghai.

THE USE OF EVAPORATIVE COOLING SYSTEMS AND DESICCANT DEHUMIDIFYING FOR USING IN SEVERAL BRAZILIAN CITIES.

José Rui Camargo

University of Taubaté – UNITAU – Mechanical Engineering Department
Rua Daniel Danelli, s/n. – ZIP: 12060-440 – Taubaté, São Paulo, Brazil.
(doctoral student at São Paulo State University UNESP/FEG – Energy Department)
e-mail: rui@engenh.mec.unitau.br

Carlos Daniel Ebinuma

UNESP/FEG – São Paulo State University – Guaratinguetá, São Paulo, Brazil
DEN - Energy Department
Rua Ariberto Pereira da Cunha, 333 – ZIP: 12500-000 – Guaratinguetá, São Paulo, Brazil
e-mail: ebinuma@feg.unesp.br

***Abstract.** Evaporative cooling consists of water evaporation, through the passage of an air flow, thus decreasing the air temperature. The system can be direct or indirect evaporative cooling. The main characteristic of this process is the fact that it is more efficient when the temperatures are high and the humidities are low. This paper presents a system that can be used in humid climates coupling a desiccant dehumidification equipment to indirect and direct evaporative coolers. The paper also presents a description of evaporative cooling and desiccant systems. Later on an analysis of the coupled systems is made, in which occurs a dehumidification by adsorption in a counterflow rotative heat exchanger following the evaporate cooling of the air. In addition the paper presents an application of this system to several Brazilian cities, characterized by different climates.*

***Key-words:** evaporative cooling, desiccant dehumidification, thermal comfort.*