

Análise de um protótipo de condicionador de ar adsorptivo evaporativo para clima quente e úmido



Jesus Marlinaldo de Medeiros ^[1], Bruno Soares de Oliveira Lopes ^[2], Jesarela Merabe Silva Freire ^[3], João Paulo de Lima Silva ^[4], Fernando César de Abreu Viana ^[5], Márcio Gomes da Silva ^[6], Andrei Hudson Guedes Braga ^[7]

[1]jesus_medeiros@yahoo.com.br; [2]brunosoarez@yahoo.com; [3]jesarela-msf@hotmail.com; [4]joão.paulo_1080@hotmail.com;

[5]fernandoviana@globo.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB Câmpus Cabedelo.

[6]mgcefet@gmail.com. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia da Paraíba – IFPB Câmpus João Pessoa.

[7]andrei_projetos@yahoo.com.br. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Pernambuco – IFPE Câmpus Ipojuca.

RESUMO

O sistema de condicionamento de ar adsorptivo evaporativo funciona com a desumidificação do ar externo, forçando-o a passar através de um adsorvente, onde parte do vapor de água é retido e o ar quase seco é umidificado através de resfriadores evaporativos para redução de sua temperatura. O desumidificador adsorptivo utilizou cerca de 4,4 kg de sílica-gel com diâmetro de 2 a 5 mm sobre telas metálicas garantindo maior rigidez à estrutura, melhor distribuição da sílica e circulação do ar. A sílica-gel foi regenerada através de aquecedor elétrico com fluxo de ar forçado por um período de 4 horas. O climatizador comercial tipo resfriador evaporativo foi testado com fibras evaporativas sintéticas e naturais. Os resultados mostraram que dependendo do painel evaporativo ocorre uma maior perda de carga no escoamento, provocando a diminuição da velocidade e comprometendo o rendimento do equipamento. O sistema completo foi testado, verificando-se que o desumidificador reduziu a razão de umidade do fluxo de ar, mas o aumento da temperatura do ar associado ao calor de adsorção comprometeu o rendimento do protótipo. Portanto, para obter conforto térmico com o condicionador adsorptivo evaporativo será necessário resfriar o ar após o desumidificador com a circulação da água do climatizador.

Palavras-chave: Condicionamento de ar. Resfriador evaporativo. Desumidificador adsorptivo. Sílica-gel.

ABSTRACT

The adsorptive evaporative air-conditioning system works with the dehumidification of outside air forcing it to go through an adsorbent material, where part of the water steam is retained and the air, which is almost dry, gets humidified through evaporative coolers to reduce its temperature. The adsorptive dehumidifier used about 4.4 kg in silica gel with a diameter ranging from 2 to 5 mm of a wire mesh structure, which ensures higher stiffness and better silica distribution and air circulation. An electric heater regenerated the silica gel with an imposed airflow for a 4-hour period. The commercial air conditioner, which is an evaporative cooler, was tested with synthetic and natural evaporative fibers. Results showed that depending on the evaporative panel there is an increased pressure drop in the flow causing a decrease in speed, compromising the device's performance. The entire system was tested by checking that the dehumidifier reduced the moist ratio of the airflow, but the increase in air temperature associated to the adsorption heat compromised the performance of the prototype. Therefore, to achieve thermal comfort with adsorptive evaporative conditioner it will be necessary to cool the air afterwards with the dehumidifier by using the water circulation of the air conditioner.

Keywords: Air-conditioning. Evaporative cooler. Adsorptive dehumidifier. Silica gel.

1 Introdução

1.1 Tecnologia adsortiva evaporativa

Apesar do cenário de crise internacional, a demanda energética mundial continua crescendo a cada ano, devido ao aumento populacional e suas transformações socioeconômicas. Contudo, a oferta de energia não acompanha esse crescimento, sendo necessária sua utilização racional e otimizada. Além disso, deve-se buscar investir em matrizes energéticas limpas que não contribuam para a degradação do meio ambiente, indispensável ao desenvolvimento sustentável das futuras gerações.

Nesse contexto, os sistemas de condicionamento de ar têm sido cada vez mais usados em todo o mundo, ocasionando grande consumo de energia. Atualmente, novas tecnologias de resfriamento têm sido estudadas para substituição dos sistemas convencionais (compressão a vapor), pois seu uso intenso pode levar a um colapso tanto energético quanto ambiental.

Uma das alternativas promissoras é a tecnologia dessecante (adsortiva evaporativa), composta pela desumidificação adsortiva em conjunto com o resfriamento evaporativo, que visa proporcionar redução no consumo de energia, melhorar a qualidade do ar interno, aumentar o conforto térmico e diminuir a agressão ambiental dos fluidos refrigerantes atuais.

O resfriamento evaporativo é um processo natural que consiste na redução da temperatura do ar e na elevação de sua umidade relativa através de mecanismos simultâneos de transferência de calor e massa entre o ar e a água. Tem como atrativos e benefícios o baixo consumo de energia e facilidades de manutenção, de instalação, de operação e de integração a sistemas de condicionamento de ar já instalados. Adicionalmente, pode trabalhar com renovação total do ar, eliminando a recirculação e a proliferação de fungos e bactérias, elevando, assim, a qualidade do ar do recinto. Além de tudo isso, essa tecnologia não usa fluidos poluentes. Apesar da sua simplicidade e do baixo custo de aquisição e operação, a redução de temperatura obtida no resfriador evaporativo depende muito mais da umidade relativa do que da temperatura de entrada. Por essa razão, a tecnologia é útil para clima quente e seco, mas ineficiente para clima úmido.

O efeito de resfriamento evaporativo ocorre em painel evaporativo de fibra natural ou sintética, que

pode ser de celulose, fibra de vidro, fibra de madeira, polipropileno, entre outros materiais.

A eficiência de um sistema de resfriamento evaporativo varia de acordo com as condições do clima, sendo mais eficiente em dias quentes e secos. O consumo de energia elétrica desse sistema chega a ser, dependendo das condições climáticas do ar externo, de 40% a 80% menor do que o consumo de um sistema de condicionamento de ar por compressão (FREITAS, 2007).

A adsorção é o fenômeno de superfície no qual um soluto é removido de uma fase fluida e acumulado na superfície de uma fase sólida. O material adsorvido é denominado de adsorbato, e o material sobre o qual o soluto é depositado é chamado de adsorvente (RUTHVEN, 1984).

Em geral, os adsorventes são materiais sólidos porosos com grande área superficial localizada no seu interior. A água adsorvida é contida por condensação dentro dos capilares formados na própria estrutura cristalina do material. A capacidade de um adsorvente para atrair umidade depende do tamanho de seus poros e da relação entre a quantidade de água em sua superfície e o conteúdo de umidade do ar. Essa diferença reflete-se na pressão de vapor na superfície e no ar.

Todo dessecante atrai e retém umidade até alcançar um equilíbrio com o ar ambiente. A umidade é usualmente removida por meio do aquecimento do dessecante a temperaturas entre 50°C e 320°C e de sua exposição a um fluxo de ar de regeneração ou reativação. A temperatura de reativação depende do tipo de material adsorvente utilizado e de sua aplicação. A energia para a reativação pode vir de uma fonte elétrica ou de uma fonte térmica obtida através do vapor de água, do ar quente ou de um rejeito industrial qualquer. Depois de seco, o dessecante deve ser resfriado para que possa reter a umidade novamente. Ou seja, o processo é regenerativo, pois a substância adsorvente, após estar saturada de umidade, permite a liberação de água quando submetida a um aquecimento regenerativo (dessorção).

A capacidade de adsorção de um dessecante é fator importantíssimo em um meio dessecante. Essa capacidade de adsorção é caracterizada pela existência do equilíbrio termodinâmico entre a fase adsorvida, o vapor de água existente na mistura gasosa e a matriz dessecante.

A desumidificação por resfriamento é um processo no qual o fluxo de ar é resfriado até uma tempe-

ratura inferior à sua temperatura de orvalho e parte do vapor de água da mistura se condensa, reduzindo a temperatura de bulbo seco e a razão de umidade.

A desumidificação por adsorção é um processo em que o vapor de água é adsorvido por um material adsorvente, provocando, no fluxo de ar, aumento da temperatura de bulbo seco e redução da razão de umidade.

O resfriamento adsorvivo evaporativo consiste na desumidificação do ar externo (atmosférico), forçando-o a passar através de um material adsorvente, onde parte do vapor de água é retido e o ar tem sua razão de umidade reduzida, saindo menos úmido. Em seguida, esse ar é umidificado por resfriadores evaporativos para reduzir sua temperatura e, conseqüentemente, realizar a climatização do ambiente.

A tecnologia adsorviva evaporativa vem sendo aplicada com sucesso na climatização de ambientes em diversos países no mundo, faltando o domínio e a difusão dessa tecnologia no Brasil.

1.2 Revisão bibliográfica

Em relação ao resfriamento evaporativo para conforto térmico, Castro e Pimenta (2004) simularam a transferência de calor e massa em painéis de contato ar-água – usados em sistema de Resfriamento Evaporativo Direto (RED) – por meio de modelos matemáticos e correlações empíricas, com o intuito de comparar os dados obtidos nas simulações com os dados do fabricante para determinar a eficiência de resfriamento e a perda de carga. Os autores observaram uma boa concordância entre os resultados obtidos e os dados do fabricante, validando o modelo de transferência de calor e massa.

Alodan e Al-Faraj (2005) estudaram uma nova alternativa de painel evaporativo, fabricado com folhas de metal galvanizado. O painel proposto possuía folhas em forma de zigue-zague alinhadas verticalmente, com distanciamento entre as folhas em torno de 7,5 mm. O estudo utilizou espessuras do painel de 15 cm, 30 cm e 45 cm. Para as condições mais severas de temperatura de bulbo seco do ar externo, a média de eficiência do resfriamento evaporativo foi de 76%, 86% e 88%, para os painéis evaporativos com profundidades de 15 cm, 30 cm e 45 cm, respectivamente.

Camargo, Ebinuma e Cardoso (2006) descrevem três métodos para avaliar a eficiência do resfriamento evaporativo aplicado ao conforto térmico humano em regiões tropicais e equatoriais. Esses métodos foram testados na cidade de Brasília, em diferentes

condições climáticas, mostrando que os sistemas de resfriamento evaporativo têm um potencial muito grande para propiciar conforto térmico e ainda podem ser usados como uma alternativa aos sistemas convencionais em regiões onde a temperatura de bulbo úmido é inferior a 24°C.

Carossi (2006) desenvolveu um método matemático para mapear regiões brasileiras com potencial de utilizar sistemas de resfriamento evaporativo no condicionamento de ar ambiente. O climatizador evaporativo utilizado tinha capacidade de resfriar ambientes de até 50 m². Os mapas climáticos das temperaturas e das umidades relativas do ar foram sobrepostos e possibilitaram a caracterização das regiões onde as condições do ar estariam dentro de valores passíveis de utilização de sistema de resfriamento evaporativo.

Heidarinejad e Bozorgmehr (2007) modelaram um sistema com Resfriamento Evaporativo Direto (RED) e outro com Resfriamento Evaporativo Indireto (REI). Esses modelos foram obtidos a partir das equações que regem a transferência de calor e massa. Fatores que afetam a eficiência de resfriamento evaporativo, tais como taxas de fluxo de massa, geometria e configuração de fluxo de ar, foram considerados. Os resultados para condições típicas de algumas cidades iranianas mostraram que a eficiência de resfriamento evaporativo depende do fluxo mássico de ar e do espaçamento entre placas de passagens úmidas e secas.

Rawangkul *et al.* (2008) avaliaram a eficiência de resfriamento de painéis fabricados a partir das fibras de coco (*Cocos nucifera Linnæus*) em sistema de resfriamento evaporativo. Dois painéis com configurações diferentes foram fabricados a partir das fibras do mesocarpo do coco e testados experimentalmente, e os dados obtidos foram comparados com os de painéis de Celulose Rígida Corrugada (papel *Kraft*). Os efeitos do coeficiente de transferência de calor, da velocidade do ar, da queda de pressão e da eficiência de resfriamento foram examinados de forma criteriosa. A velocidade do ar de suprimento foi controlada na faixa de 1,88 m/s a 2,79 m/s. Os resultados revelaram que a eficiência de resfriamento dos painéis de fibra de coco ficou em torno de 35% e 50%, respectivamente, e a dos painéis de Celulose Rígida Corrugada ficou em torno de 47%. A queda de pressão estática para os dois tipos de arranjos de fibra de coco ficou em torno de 1,5 Pa e 5,1 Pa.

Wu, Huang e Zhang (2009) investigaram a transferência de calor e massa entre o ar e a água em um

resfriador evaporativo direto com superfície molhada, propondo uma correlação para determinar a efetividade de resfriamento em função da velocidade do ar e da espessura do painel evaporativo. Os resultados gerados foram validados com dados experimentais, apresentando um bom ajuste e possibilitando sua utilização como ferramenta no projeto desse equipamento.

Fouda e Melikyan (2011) estudaram a transferência de calor e massa entre o ar e a água em um resfriador evaporativo direto com superfície molhada, utilizando um modelo matemático para resolver o sistema de equações da continuidade, da quantidade de movimento, da energia e da concentração do ar através da discretização das equações via método das diferenças finitas. Os resultados obtidos foram validados com dados experimentais disponíveis na literatura e apresentaram um bom ajuste. Foi analisada a influência da velocidade e da temperatura do ar de entrada e da espessura do painel evaporativo para determinar o desempenho do equipamento.

Santos *et al.* (2011) estudaram a transferência de calor e massa entre o ar e a água em um lavador de ar aplicado no resfriamento evaporativo direto, utilizando uma solução analítica que leva em consideração a resistência térmica na película líquida e a variação de propriedades do ar e da água. Os resultados obtidos apresentaram excelente concordância com resultados disponíveis na literatura. Foram observadas as influências da temperatura, da razão de umidade, da velocidade do ar do lavador e da temperatura da água no desempenho do equipamento.

Sheng e Agwu Nnanna (2012) analisaram a influência da velocidade e da temperatura do ar e da temperatura da água no desempenho de um resfriador evaporativo a partir de dados experimentais, obtendo uma correlação empírica. Os resultados mostraram que o rendimento do equipamento melhora com o aumento da temperatura de entrada do ar, a diminuição de sua velocidade e a redução da temperatura da água.

Em relação à desumidificação adsorviva, Inaba, Seo e Horibe (2004) investigaram numericamente um leito de sílica-gel exposto a um fluxo de ar úmido para determinar a quantidade de vapor de água adsorvida levando em consideração os efeitos da temperatura, da velocidade e da umidade relativa do ar na entrada do leito e o diâmetro das esferas de sílica-gel.

Yuan *et al.* (2008) propuseram um modelo matemático para descrever o processo de transferência

de calor e massa entre o ar úmido e um adsorvente (sílica-gel), obtendo resultados numéricos que, comparados a dados experimentais, apresentaram um desvio em torno de 7%.

Hamed, Abd El Rahman e El-Emam (2010) investigaram experimentalmente as características de adsorção e dessorção em leito de sílica-gel para avaliar os efeitos dos parâmetros de entrada do ar no desempenho do sistema. Eles observaram que a umidade relativa do ar de entrada tem efeito significativo na taxa de adsorção do leito adsorvivo e que, no processo de dessorção, a retirada de vapor de água do leito adsorvivo depende da temperatura de regeneração.

Em relação aos sistemas adsorvivos evaporativos empregados para condicionamento de ar, Kodama *et al.* (2003) propuseram e investigaram experimentalmente dois novos sistemas de resfriamento dessecante para climas úmidos. O primeiro sistema testado utilizou um ciclo de quatro rotores com duplo estágio de desumidificação. Eles obtiveram um COP de 0,30 para condições de umidade absoluta ambiente de até 20g/kg, mas com alto custo inicial. O segundo sistema testado utilizou três rotores: um rotor regenerativo, um rotor dessecante e um rotor entálpico. Nesse sistema, eles obtiveram um discreto melhoramento no COP para 0,33, mas com a vantagem de um custo inferior.

Ruivo, Figueiredo e Costa (2004) obtiveram a resposta dinâmica de um sistema dessecante partindo de certa condição inicial até atingir o regime permanente. Eles utilizaram um modelo de equilíbrio instantâneo na modelagem do rotor dessecante, faltando-lhes resultados experimentais para melhoramento e validação do modelo empregado.

Heidarinejad e Pasharshahi (2011) estudaram o potencial do uso do sistema adsorvivo evaporativo para várias cidades do Irã, através de um modelo híbrido, obtendo resultados numéricos com dados experimentais. Eles concluíram que os sistemas dessecantes são mais eficientes que os resfriadores evaporativos diretos e indiretos em regiões de clima quente e úmido.

No Brasil, os trabalhos que utilizam a tecnologia dessecante envolvendo a refrigeração adsorviva, o resfriamento evaporativo e os sistemas de condicionamento de ar são apresentados a seguir.

Santos (2005) estudou a utilização de insumos alternativos em um sistema de condicionamento de ar ecoeficiente, composto por um sistema evaporativo-

-adsortivo associado a um sistema de aproveitamento de água pluvial e do calor residual do processo.

Freitas (2007) construiu uma bancada para o estudo de painéis evaporativos em sistemas de resfriamento adiabático diretos. Foram analisados dados coletados a partir de painéis comerciais de celulose com o objetivo de aferir a bancada, bem como ter uma base para comparar a efetividade, os coeficientes de transferência de calor e de massa e a queda de pressão dos painéis alternativos. Foram realizados testes com três painéis alternativos, de fibra de coco, os quais apresentaram altos coeficientes de transferência de calor e massa, o que viabiliza a utilização da fibra de coco em resfriamento evaporativo, bastando, apenas, definir uma geometria que permita uma alta eficiência na refrigeração evaporativa.

Medeiros (2007) investigou a modelagem e a simulação numérica de sistemas de condicionamento de ar dessecantes, operando em ciclo aberto, compostos de rotores adsortivos, rotores regenerativos, umidificadores e aquecedores para regeneração do dessecante. Ele desenvolveu um modelo matemático que levou em consideração a resistência à difusão de massa na matriz dessecante para os rotores adsortivos. Com base nas diversas simulações, foram determinados os parâmetros importantes na caracterização e otimização de rotores dessecantes, finalizando com a simulação transiente de um sistema com dois rotores dessecantes, objetivando prever o desempenho do sistema.

Silva (2010) montou um protótipo em escala industrial de um sistema de refrigeração dessecante para condicionamento de ar, utilizando dois rotores dessecantes, dois trocadores de calor rotativos, três resfriadores evaporativos, dois queimadores a gás natural, uma bomba d'água de alta pressão e cinco ventiladores centrífugos. Foi analisado o comportamento do sistema sob as condições do clima quente e úmido, e os resultados foram comparados com os de outros trabalhos experimentais e numéricos. Os resultados obtidos demonstraram que, mesmo operando em condições climáticas adversas, o sistema pode atingir desempenho semelhante ao da grande maioria dos sistemas de condicionamento de ar utilizando rotores dessecantes e que os requisitos de conforto térmico podem ser alcançados nas condições do clima de João Pessoa no verão.

Neste trabalho, o objetivo é analisar os fenômenos de transferência de calor e massa, associados ao condicionador de ar adsortivo evaporativo, através

da medição dos perfis de temperatura e umidade relativa do ar para clima quente e úmido. A pesquisa é justificada pela crescente oferta de climatizadores residenciais no mercado nacional, caracterizada, todavia, pela insuficiência de informações referentes à tecnologia evaporativa, suas aplicações e suas limitações, bem como ao desempenho do equipamento em função das condições climáticas locais, que podem variar bastante entre regiões e até mesmo entre cidades da mesma região.

2 Materiais e Métodos

O climatizador de ar comercial utilizado é mostrado na Figura 1, que detalha a parte frontal com as aletas direcionais do ar de saída, o painel de controle das funções do equipamento (umidificar, brisa, ventilar, *standby*, timer, dormir, purificar) e a gaveta onde é armazenada a água e a parte traseira com o sistema de filtragem do ar e o painel evaporativo para umidificação do ar.

Figura 1 – Climatizador de ar comercial



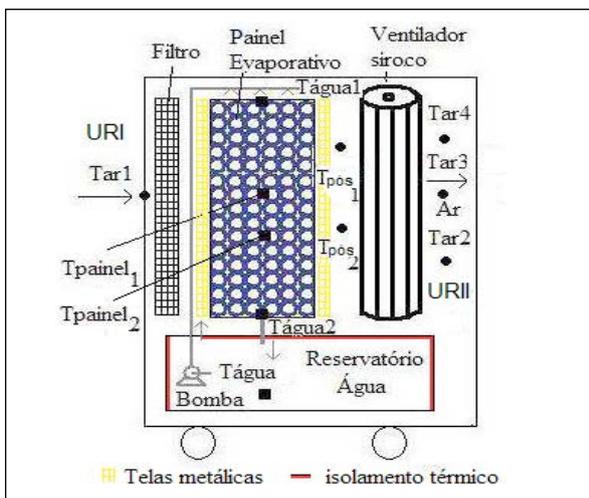
Fonte: Fotos do autor.

A Figura 2 mostra um diagrama esquemático do climatizador de ar e os pontos de medição de temperaturas do ar e da água. Ao ligar o equipamento na função de umidificador, a água do reservatório é levada pela ação de uma bomba para o topo do resfriador, para formar uma superfície molhada ao longo do painel evaporativo. O painel evaporativo é poroso, tipo colmeia, o que garante uma grande área superficial de contato ar-água para aumentar a

troca de calor entre os fluidos. Foi introduzida uma tela metálica envolvendo o painel evaporativo para melhorar a troca térmica entre o ar e a água. Simultaneamente, o ventilador siroco provoca o escoamento de ar, resultando no resfriamento do ar com elevação da umidade relativa. Para diminuir as perdas de calor da água resfriada, foi introduzido um isolamento térmico de isopor no reservatório de armazenamento. Os sensores Tar1, Tar2, Tar3 e Tar4 medem as temperaturas, respectivamente, na entrada do climatizador e em três posições verticais na saída do climatizador, após o ventilador; os sensores Tágua, Tágua1 e Tágua2 medem as temperaturas dentro do reservatório de água e nas partes superior e inferior do painel evaporativo, respectivamente; os sensores Tpanel₁ e Tpanel₂ medem as temperaturas no centro do painel evaporativo; os sensores T_{pós1} e T_{pós2} medem as temperaturas após o painel evaporativo; e os sensores UR1 e UR2 medem a umidade relativa do ar na entrada e na saída do climatizador, respectivamente.

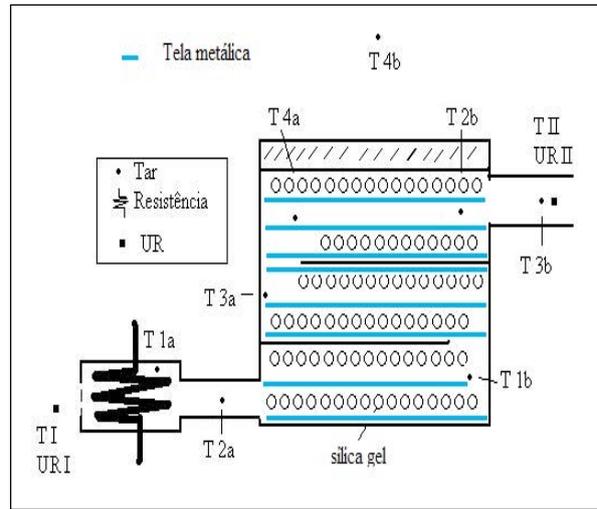
A Figura 3 mostra um diagrama esquemático do aquecedor elétrico para regeneração e do desumidificador adsorptivo e os pontos de medição de temperaturas do ar no equipamento formando o experimento. Os sensores T1b, T2b, T3a e T4a medem as temperaturas dentro do desumidificador; os sensores T1a e T2a medem as temperaturas dentro do aquecedor; os sensores T3b e T4b medem as temperaturas na saída do desumidificador e no ambiente, respectivamente; já os sensores TI, URI, TII e URII medem a temperatura e a umidade relativa do ar na entrada do ventilador e na saída do desumidificador, respectivamente.

Figura 2 – Diagrama esquemático do climatizador de ar



Fonte: elaborada pelo autor.

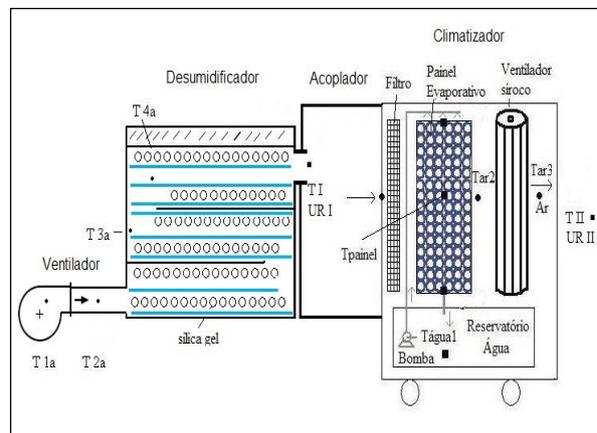
Figura 3 – Diagrama esquemático do aquecedor resistivo/desumidificador adsorptivo



Fonte: elaborada pelo autor.

O diagrama esquemático da Figura 4 representa o sistema adsorptivo evaporativo, mostrando o ventilador, o desumidificador adsorptivo e o climatizador evaporativo e os pontos de medição de temperaturas do ar no equipamento formando o experimento. Os sensores T1a e T2a medem as temperaturas no ventilador e na entrada do desumidificador; T3a e T4a medem as temperaturas dentro do desumidificador preenchido de sílica-gel granular; enquanto TI e URI e TII e URII medem a temperatura e umidade relativa do ar na entrada e saída do climatizador, respectivamente.

Figura 4 – Diagrama esquemático do sistema adsorptivo evaporativo



Fonte: elaborada pelo autor.

O termômetro digital TH-096 e o sensor de temperatura termopar tipo K S-02K, ambos da Instrutherm, foram utilizados para medição das temperaturas do ar e da água nos ensaios experimentais. As características principais do instrumento usando termopar tipo K são: medição de $-199,9^{\circ}\text{C}$ a $999,9^{\circ}\text{C}$; precisão de $\pm 0,75\%$ da leitura ou $\pm 2,2^{\circ}\text{C}$; utilização de até 4 termopares; tempo de resposta de 1 segundo; interface serial cabo RS-232; armazenamento de até 16000 dados; precisão do TH-096 $\pm (0,5\% + 1^{\circ}\text{C})$.

O *datalogger* HT-500, da Instrutherm, foi utilizado para medição da temperatura e da umidade relativa do ar no climatizador e no sistema completo. As características principais do instrumento utilizado são: medição de umidade relativa de 0% a 100%; temperaturas de -40°C a 70°C ; precisão de $\pm 3\%$ para umidade relativa e de $\pm 1^{\circ}\text{C}$ para temperatura; possui ciclo de medição em segundos, minutos ou horas; interface USB; capacidade de memorizar 16.000 leituras de temperatura e 16.000 de umidade relativa.

O termoanemômetro digital portátil TAVR-650, fabricado pela Instrutherm, possui display de cristal líquido (LCD) de 4 dígitos, escalas: área: $0,01$ a 9.999 m^2 ; $0,01$ a 9.999 Ft^2 ; vazão: $0,01$ a $9.999 \times 100\text{ m}^3/\text{min}$; $0,01$ a $9.999 \times 100\text{ Ft}^3/\text{min}$; velocidade: $0,3$ a $45,0\text{ m/s}$; $1,0$ a $140,0\text{ km/h}$; $0,6$ a $88,0\text{ Knots}$; 60 a 8800 Ft/min ; $0,7$ a $100,0\text{ mile/h}$; precisão: $\pm 3\%$; resolução básica: $0,1$; temperatura: 0°C a $45^{\circ}\text{C} / 32^{\circ}\text{F}$ a 133°F ; precisão: $\pm 1,0^{\circ}\text{C} / \pm 1,8^{\circ}\text{F}$; resolução: $0,2^{\circ}\text{C} / 0,36^{\circ}\text{F}$; interface serial: RS-232; armazenamento: 2.000 registros; sensor tipo ventoinha.

O termo-higrômetro digital HTR-170, também fabricado pela Instrutherm, com ponto de orvalho, *datalogger* e RS-232, possui display de cristal líquido (LCD) de 4 dígitos; escalas: temperatura: 0°C a $50^{\circ}\text{C} / 32^{\circ}\text{F}$ a 122°F ; precisão: $\pm 0,8^{\circ}\text{C} / \pm 1,5^{\circ}\text{F}$; resolução: $0,01^{\circ}\text{C} / 0,01^{\circ}\text{F}$; umidade: 0% a 95% UR; precisão: $>70\% \text{ UR} \pm (3\% \text{ da leitura} + 1\% \text{ UR})$ $<70\% \text{ UR} \pm 3\% \text{ UR}$; resolução: $0,01\% \text{ UR}$; ponto de orvalho: $-25,3^{\circ}\text{C}$ a $48,9^{\circ}\text{C} / -13,5^{\circ}\text{F}$ a $120,1^{\circ}\text{F}$ (a precisão do ponto de orvalho é a soma dos valores de precisão de temperatura e umidade); resolução: $0,01^{\circ}\text{C} / 0,01^{\circ}\text{F}$; sensor separado do instrumento; tempo de resposta: 5 a 30 segundos; interface serial: RS-232; *datalogger*: armazenamento de até 1000 dados; intervalo de amostragem programável de 1 até 3.600 segundos; tempo de amostragem: 0,8 segundos.

Os instrumentos de medição de temperatura, umidade relativa e velocidade do ar utilizados nos ensaios experimentais são mostrados na Figura 5.

Figura 5 – Instrumentos de medição utilizados no condicionador adsorbtivo evaporativo



Fonte: Fotos do autor.

3 Resultados e Discussão

3.1 Análises no resfriador evaporativo

Na Figura 6, são apresentados os painéis evaporativos de: (a) fibra sintética comercial, formato losangular; (b) fibra vegetal (*Luffa cylindrica*) com formato irregular entrelaçado; (c) composto de pano 100% viscoso com furos de 1 mm + tela metálica; (d) composto de fibra vegetal + tela metálica; (e) composto de malha metálica galvanizada quadrada (2 x 2 mm) + tela metálica; (f) composto de malha 100% poliéster com formato quadrado (4 x 4 mm) + tela metálica, que foram utilizados nos ensaios experimentais do climatizador.

Para medição das velocidades de saída do ar do climatizador, foi utilizado um anemômetro, posicionado sequencialmente no centro da seção inferior e no centro da seção superior, conforme ilustra a Figura 7. Já para determinação das condições do ar na saída do climatizador, foi utilizado um termo-higrômetro (Figura 8), que possibilitou analisar e verificar o efeito evaporativo.

Figura 6 – Painéis evaporativos: comercial, fibra vegetal, malha metálica, malha sintética



Fonte: Fotos do autor.

Figura 7 – Medição de velocidade de saída do ar do climatizador.



Fonte: Fotos do autor.

Na Tabela 1, é apresentado o comportamento da velocidade do ar de acordo com o tipo de configuração do painel evaporativo. Para tanto, os ensaios foram realizados sob três condições de regime: velocidade 1, velocidade 2 e velocidade 3.

Figura 8 – Termo-higrômetro utilizado para verificar o efeito evaporativo no climatizador



Fonte: Fotos do autor.

Na Tabela 1, observa-se que, dependendo da tela e do painel evaporativo utilizados, haverá uma determinada velocidade, devido à perda de carga provocada no escoamento do ar. Como esperado, quanto menor for a malha do painel, maior será a perda de carga. Quando foi acionada a função umidificar, a água circulou sobre o painel evaporativo e o comportamento no fluxo de ar sofreu alterações. Ao testar o pano 100% viscosa, a água, ao escoar sobre o painel, formou uma barreira que dificultou a passagem do ar e diminuiu bastante a velocidade de escoamento, comprometendo a eficiência do equipamento. Quando usada a malha quadrada galvanizada, não houve diminuição significativa de velocidade, sendo essa uma boa opção. Quando usada a fibra sintética ou a esponja vegetal, houve comportamento similar, com diminuição de velocidade e transferência de massa entre a água e o ar.

Na Tabela 2, são mostradas as temperaturas de bulbo seco e bulbo úmido na entrada do climatizador, a temperatura de bulbo seco na saída do climatizador e os valores calculados da efetividade de resfriamento do climatizador, tendo sido observada, assim, a partir dos dados experimentais, uma variação de 33,3% a 60,0% na efetividade do equipamento, mostrando a influência das condições do ar na entrada do climatizador para atender o conforto térmico no ambiente.

Tabela 1 – Medição de velocidade para cada tipo de painel evaporativo testado no climatizador

Tipo painel	Função umidificar	Velocidade 1 (m/s)		Velocidade 2 (m/s)		Velocidade 3 (m/s)	
		Seção inferior	Seção superior	Seção inferior	Seção superior	Seção inferior	Seção superior
Sem painel	desligado	5,0	5,2	6,0	6,2	6,5	7,0
Malha galvanizada	desligado	4,3	5,0	4,7	5,4	5,2	5,8
	ligado	4,3	5,0	4,7	5,4	5,2	5,8
Painel sintético	desligado	5,0	5,0	5,5	5,5	6,2	6,2
	ligado	4,9	4,9	5,4	5,4	6,0	6,0
Fibra natural	desligado	4,7	5,2	5,3	5,8	5,8	6,2
	ligado	4,0	4,5	5,0	5,3	5,6	5,8
Pano 100% viscose	desligado	2,9	5,5	3,2	6,0	3,6	6,4
	ligado	2,3	4,5	2,4	4,7	2,6	5,0
Malha 100% poliéster	desligado	4,2	4,8	4,6	5,2	4,9	5,6
	ligado	2,7	4,8	2,9	5,2	3,2	5,6

Fonte: dados da pesquisa.

Tabela 2 – Dados medidos para cálculo da efetividade de resfriamento evaporativo

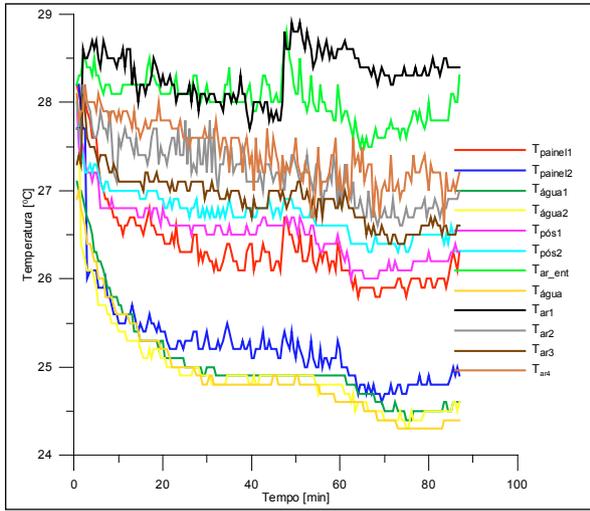
Entrada		Saída	Efetividade de resfriamento
Temp. Bulbo Seco Tbs1 (°C)	Temp. Bulbo Úmido Tbu1 (°C)	Temp. Bulbo Seco Tbs2 (°C)	$h = [(Tbs1 - Tbs2)/(Tbs1 - Tbu1)] \times 100$ (%)
30,0	27,5	28,5	60,0
30,0	25,5	27,5	55,5
29	24,9	27,0	48,8
31	24,8	28,3	43,5
31	25,0	28,5	41,7
28	24,7	26,7	39,4
28,0	24,6	26,8	35,3
28,3	24,6	27,0	35,1
28,3	25,3	27,3	33,3
30,0	27,0	29,0	33,3

Fonte: dados da pesquisa.

A Figura 9 mostra o comportamento da temperatura do ar, da água e sobre o painel evaporativo sintético no climatizador. Ao ligar o climatizador na função “umidificar”, fazendo a água resfriada ser bombeada até o painel evaporativo, ocorre a diminuição das temperaturas da água, do painel evaporativo e do ar, devido à troca de calor sensível entre água e ar. A temperatura no painel ficou próxima à temperatura da água. A temperatura do ar após o painel ficou intermediária entre a temperatura do ar e da água.

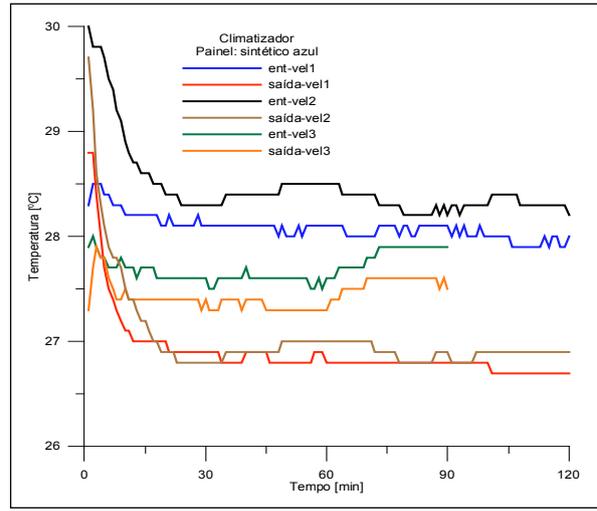
Os resultados mostraram a evolução da temperatura do ar e da água em torno da superfície molhada em regime transiente. Foi observado que a água de circulação atingiu a temperatura de bulbo úmido e o efeito de resfriamento evaporativo foi obtido no ar após o painel evaporativo. No entanto, logo após o ventilador siroco, o ar de saída do climatizador tem temperatura superior à temperatura após o painel evaporativo. A condição de insuflamento para conforto térmico não foi alcançada nesse ensaio.

Figura 9 – Perfil de temperatura no climatizador com painel evaporativo sintético



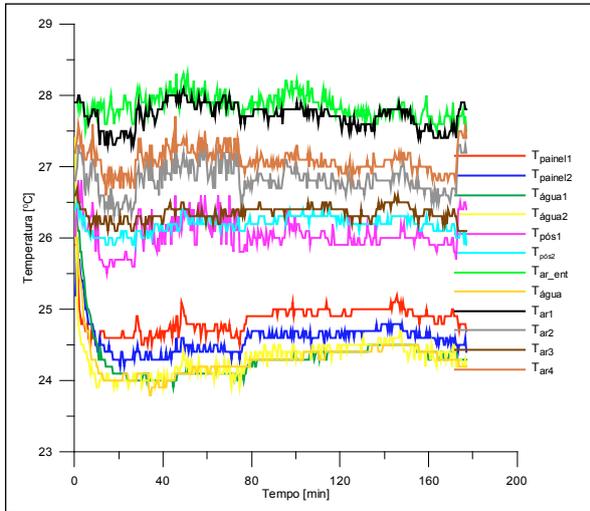
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 11 – Perfil de temperatura no climatizador com painel evaporativo sintético



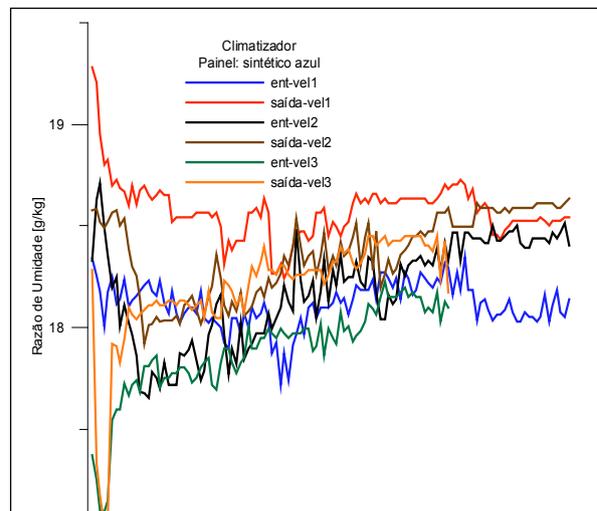
Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 10 – Perfil de temperatura no climatizador com painel evaporativo vegetal



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 12 – Perfil de razão de umidade no climatizador com painel evaporativo sintético



Fonte: elaborada pelo autor.

A Figura 10 ilustra o comportamento para o perfil de temperatura do ar, da água e sobre o painel evaporativo vegetal, similar ao obtido com o painel evaporativo sintético.

Na Figura 11, é apresentado o perfil de temperatura na entrada e na saída do climatizador comercial, ao longo do tempo, utilizando o painel evaporativo sintético, com a variação de velocidade de escoamento em três condições: a) vel1 – baixa; b)

vel2 – média; e c) vel3 – alta, conforme operação do equipamento. Observa-se resfriamento do ar de saída em todas as velocidades devido à evaporação da água. Observa-se, ainda, que a melhor condição de redução de temperatura ocorre na menor velocidade, significando que o tempo de permanência do ar na superfície do painel evaporativo interfere na taxa de evaporação da água.

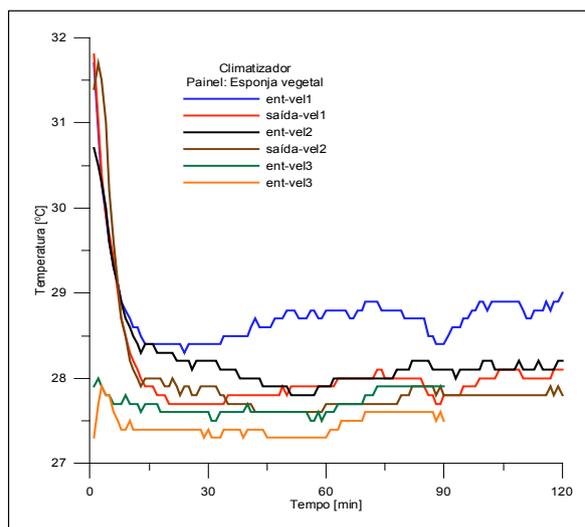
Na Figura 12, é apresentado o perfil de razão de umidade na entrada e na saída do climatizador comercial, ao longo do tempo, utilizando o painel evaporativo sintético e variando a velocidade de escoamento em três condições: a) vel1 – baixa; b) vel2 – média; e c) vel3 – alta, conforme operação do equipamento. Observa-se umidificação no ar de saída em todas as velocidades devido à evaporação da água, e melhor condição de ganho de massa ocorrendo na menor velocidade. Com essa baixa taxa de evaporação da água no painel, não se produz um grande resfriamento da temperatura do ar. A condição local de alta umidade relativa do ar não favorece a obtenção do resfriamento evaporativo.

Na Figura 13, é apresentado o perfil de temperatura na entrada e na saída do climatizador comercial, ao longo do tempo, utilizando o painel evaporativo vegetal (*Luffa cylindrica*) e variando a velocidade de escoamento em três condições: a) vel1 – baixa; b) vel2 – média; e c) vel3 – alta, conforme operação do equipamento. Observou-se comportamento térmico similar ao obtido com o painel evaporativo sintético comercial.

Na Figura 14, foi apresentado o perfil de razão de umidade na entrada e na saída do climatizador comercial, ao longo do tempo, utilizando o painel evaporativo vegetal (*Luffa cylindrica*) e variando a velocidade de escoamento em três condições: a) vel1 – baixa; b) vel2 – média; e c) vel3 – alta, conforme operação do equipamento. Observou-se comportamento mássico similar ao obtido com o painel evaporativo sintético comercial.

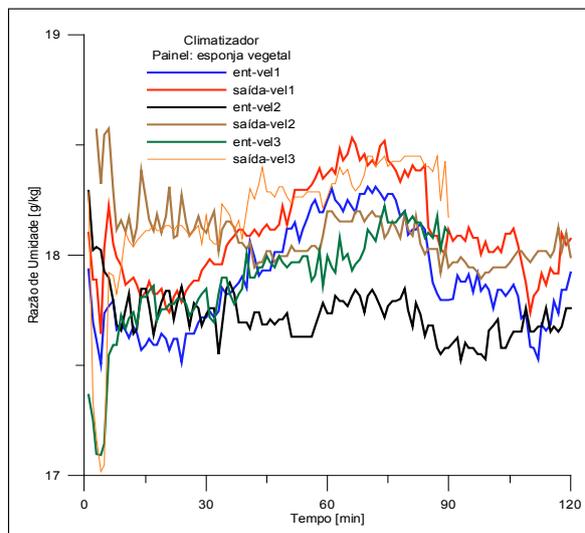
Em relação ao climatizador comercial isoladamente (resfriador evaporativo), os resultados mostraram que não houve umidificação do fluxo de ar acima de 90%, reduzindo, assim, a eficiência do resfriador quando utilizados painéis evaporativos sintéticos, vegetais e metálicos. Além disso, alguns materiais testados, empregados no painel evaporativo, provocaram maior perda de carga, interferindo no fluxo de ar de insuflamento ou formando uma cortina de água, impedindo a passagem de ar, o que comprometeu a troca de calor e massa entre o ar e a água. Dessa forma, quando utilizado em regiões de clima quente e úmido, o climatizador isoladamente não funciona bem, pois o efeito de resfriamento na saída do climatizador é pouco significativo para a redução de temperatura de ambientes. Para regiões com essas condições climáticas, o equipamento tem comportamento semelhante ao de um ventilador, porém, com maior custo e menor vazão de ar de insuflamento.

Figura 13 – Perfil de temperatura no climatizador com painel evaporativo vegetal



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 14 – Perfil de razão de umidade no climatizador com painel evaporativo vegetal



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 Análises no leito adsorativo

No desumidificador adsorativo, utilizando sílica-gel que compreendeu um leito adsorativo, foram realizados experimentos para analisar o perfil de temperatura do ar em duas configurações: aquecedor/desumidificador (dessorção) e ventilador/umidificador (adsorção).

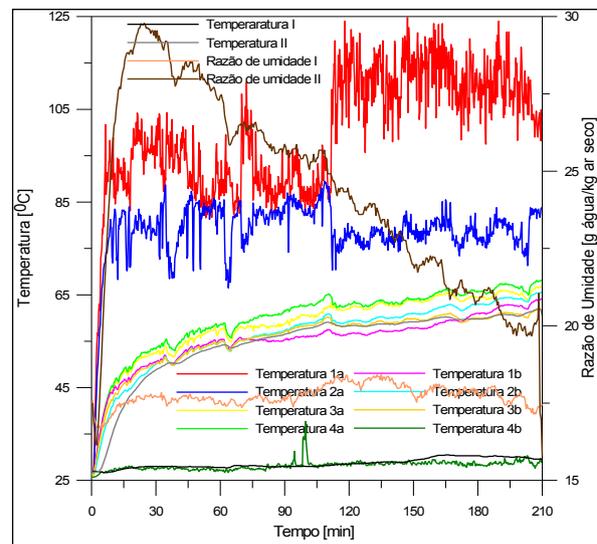
Na configuração de aquecedor/desumidificador (Figura 15), o ar entrou no aquecedor elétrico com temperatura em torno de 27°C, com razão de umida-

de de $18 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$. Ao ligar o aquecedor elétrico, observou-se que o fluxo de ar aqueceu rapidamente em 10 minutos, com temperaturas de 80°C e 43°C na entrada e na saída do desumidificador, respectivamente. Posteriormente, o aumento da temperatura no leito ficou mais lento, atingindo 55°C em 100 minutos e 65°C em 210 minutos. Já a temperatura do ar na entrada do desumidificador permaneceu em torno de 27°C e na saída do desumidificador atingiu a marca de 65°C , em 210 minutos. Em relação à razão de umidade na entrada do aquecedor (URI), observou-se que ela iniciou abaixo de $17 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ estabilizando abaixo de $18 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ no fim dos 210 minutos. Enquanto isso, a razão de umidade na saída do desumidificador (URII) partiu de $16 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ e aumentou rapidamente para $29 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, pois parte do vapor de água presente na sílica-gel dentro do desumidificador foi removida após mais ou menos 25 minutos, e quando o equipamento foi desligado (em torno de 210 minutos após o início do experimento) estava com cerca de $20 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$. Portanto, a sílica-gel não foi totalmente regenerada nesse experimento e seria necessário mais tempo para atingir essa condição. Imediatamente após a retirada dos equipamentos de medição e separação do aquecedor e do desumidificador, este último desumidificador foi lacrado para evitar entrada de massa, e aguardou-se cerca de 2 horas para que o desumidificador esfriasse e pudesse ser utilizado na configuração de ventilador/adsorção.

Dando continuidade à etapa de adsorção (Figura 16), ao se ligar o ventilador, observou-se que a temperatura do fluxo de ar no leito adsorativo aumentou para $32,5^{\circ}\text{C}$ após 15 minutos, em média. Esse aumento de temperatura está associado ao calor de adsorção, quando a sílica-gel vai sendo preenchida com vapor de água presente no ar úmido. Enquanto isso, a temperatura na entrada do ventilador (TI) diminuiu para 27°C e a temperatura na saída do leito adsorativo (TII) aumentou para 31°C . Posteriormente, as temperaturas do ar no leito diminuíram de forma lenta, atingindo em torno de 29°C no tempo de 210 minutos. Em relação à razão de umidade na entrada do ventilador (URI), observou-se que ocorreu uma diminuição de $14,7 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ para $13,5 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ nos 10 minutos iniciais devido ao insuflamento do ventilador, e depois, lentamente, houve o retorno para a condição de $14,7 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ após 210 minutos, aproximadamente. Já a razão de umidade na saída do desumidificador (URII) partiu de $14 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$

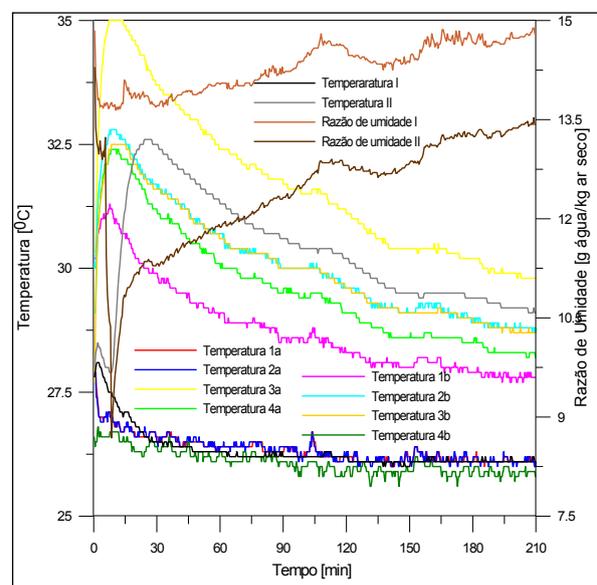
e diminuiu para $8 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, pois parte do vapor de água foi removida do ar úmido para dentro da sílica-gel em 10 minutos. Em torno de 210 minutos, a sílica-gel ainda não havia saturado totalmente, alcançando em torno de $13,5 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$.

Figura 15 – Perfis de temperatura e razão de umidade no leito desumidificador



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 16 – Perfis de temperatura e razão de umidade no leito umidificador



Fonte: elaborada pelo autor.

Em relação ao aquecedor/desumidificador, foram obtidos resultados satisfatórios que garantem uma condição de fornecimento de ar menos úmido para in-

suflamento na entrada do climatizador. O aquecedor, utilizando resistências elétricas e miniventiladores, atingiu altas temperaturas rapidamente. O desumidificador utilizou internamente uma estrutura tubular de PVC, com telas metálicas fixadas com rebites de alumínio e preenchidas de sílica-gel – essas telas metálicas garantiram a permanência das esferas de sílica-gel numa determinada posição. O caminho percorrido pelo fluxo de ar no desumidificador fez uma movimentação em “S” para maximizar a área de contato com a sílica-gel e o tempo de contato ar/adsorvente. Entretanto, a regeneração do leito de sílica-gel dentro do desumidificador aconteceu de forma lenta, consumindo muita energia elétrica. Imediatamente à regeneração da sílica-gel, o aquecedor foi desligado e o desumidificador foi lacrado para resfriar o leito de sílica-gel, mantendo a vedação para evitar a migração de vapor de água do ar externo para o leito regenerado. Só após o resfriamento do leito de sílica-gel, o sistema completo foi colocado em teste.

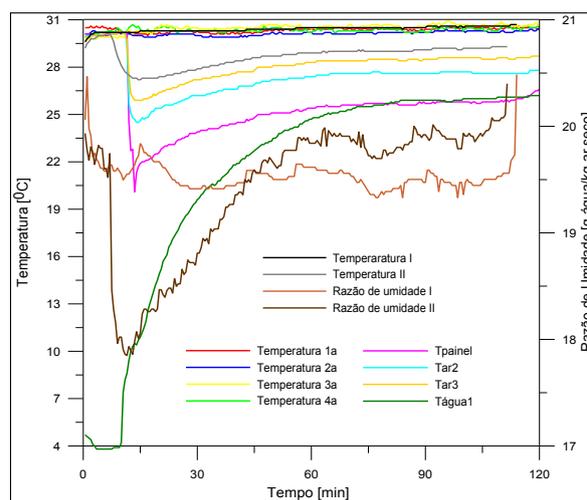
3.3 Análises no sistema completo

Na Figura 17, é mostrado o comportamento do sistema adsorvente evaporativo completo, com ventilador/desumidificador/acoplador/resfriador evaporativo, conforme nomenclatura adotada na Figura 4, verificando a temperatura e a razão de umidade do ar e o posicionamento dos sensores para medição do ar. Inicialmente, na entrada do ventilador, a temperatura estava em torno de 30°C com razão de umidade de $20 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$. Ao ligar o ventilador, observou-se que o fluxo de ar, ao entrar em contato com a sílica-gel, perdeu umidade, como pode ser visto na curva de razão de umidade I, embora as temperaturas em T1a, T2a, T3a e T4a tenham permanecido praticamente sem variação. Após cerca de 10 minutos, foi ligada a função umidificar no climatizador, percebendo-se uma diminuição na temperatura em Tpainel, em contato com a água resfriada, e em seguida em Tar2 e Tar3, que estavam em contato com o fluxo de ar. A temperatura no sensor Tar2 diminuiu devido à troca de calor e massa com a corrente de ar mais quente que a água, provocando a evaporação de parte da água e diminuindo a temperatura do ar após o painel evaporativo. A redução de temperatura após o painel evaporativo foi maior no início do processo, pois a água estava refrigerada. A partir de 75 minutos, a água no reservatório aproximou-se da temperatura de bulbo úmido do ar e o gradiente entre o ar de entrada e o ar de saída do sistema diminuiu, pois per-

sistiu apenas o efeito evaporativo, e também porque a sílica-gel estava quase saturada.

Em relação à razão de umidade na entrada do ventilador (URI), observou-se uma diminuição de $20 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ para $19,5 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, devida ao insuflamento do ventilador, e posteriormente uma oscilação para mais e para menos, lentamente retornando à condição de $19,5 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, após cerca de 110 minutos. Já a razão de umidade na saída do desumidificador (URII) instantaneamente partiu de $19,5 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, diminuiu para $18 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$, depois ganhou umidade da água evaporada no climatizador até alcançar em torno de $20 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$ após cerca de 110 minutos.

Figura 17 – Perfis de temperatura e razão de umidade no sistema completo com leito parcialmente regenerado

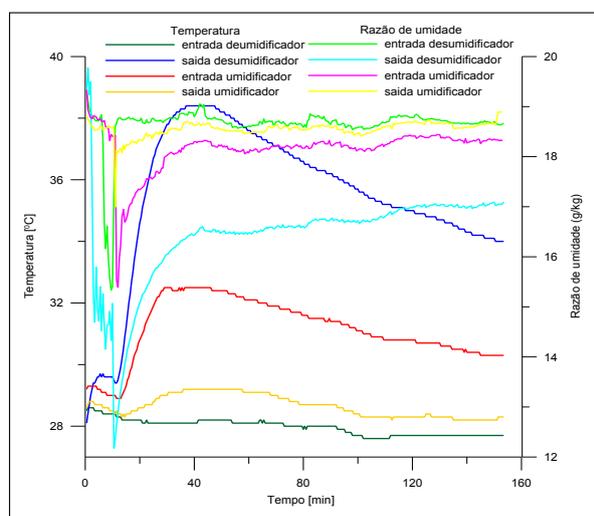


Fonte: elaborada pelo autor.

Outro ensaio foi realizado, conforme mostrado na Figura 18, para descrever o comportamento do sistema adsorvente evaporativo completo com ventilador/desumidificador/acoplador/resfriador evaporativo com leito adsorvente totalmente regenerado. Inicialmente, na entrada do aquecedor elétrico desligado (apenas ventiladores funcionando), o ar estava com temperatura em torno de 29°C e com razão de umidade de $19 \text{ g}_{\text{água}}/\text{kg}_{\text{ar seco}}$. Ao ligar o ventilador e acionar a função umidificar no climatizador, verificou-se rápida redução da razão de umidade e lento aumento da temperatura do ar na saída do desumidificador, até 15 minutos. Entre 15 e 45 minutos, ocorreu um rápido aumento da razão de umidade e da temperatura do ar. Após 45 minutos, ocorreu um lento aumento da razão de umidade e diminuição gradativa da tem-

peratura do ar. Entre a saída do desumidificador e a entrada do umidificador foi colocado um acoplador para direcionar e resfriar o fluxo de ar, com vedação para evitar infiltrações (ganho de massa). Ao longo desse acoplador, ocorreu o resfriamento lento e o aumento da razão de umidade, que comprometeu o rendimento do climatizador e conseqüentemente o sistema completo. O sistema foi desligado após 150 minutos, haja vista que o equipamento não estava proporcionando fluxo de ar de insuflamento para garantir as condições de conforto térmico.

Figura 18 – Perfis de temperatura e razão de umidade no sistema completo com leito totalmente regenerado



Fonte: elaborada pelo autor.

Em relação ao sistema completo, os resultados referentes às condições de razão de umidade do ar na saída do desumidificador foram animadores, mas o aumento da temperatura do ar após a desumidificação provocou efeito desfavorável para climatização. Portanto, é necessário abaixar a temperatura do fluxo de ar no acoplador através de um trocador de calor sensível indireto, usando a água do climatizador, mantida na temperatura de bulbo úmido. Além disso, ainda ocorreram problemas de infiltração entre a saída do desumidificador e a entrada do climatizador com aumento da razão de umidade, o que comprometeu o rendimento do climatizador e conseqüentemente do sistema completo.

4 Conclusões

Neste trabalho, foram estudados e testados alguns materiais sintéticos, vegetais e metálicos, mostrando as possibilidades e as dificuldades de substituir o painel evaporativo comercial. Em alguns casos, o comportamento foi similar ao do painel comercial e em outros casos, não, devido à obstrução parcial do fluxo de ar. Foi constatada a importância da velocidade do fluxo de ar para melhorar a evaporação da água e conseqüentemente o resfriamento do ar. A efetividade de resfriamento, calculada a partir dos dados medidos na entrada e na saída do climatizador, variou entre 33,3% e 60%, mostrando que esse equipamento residencial tem um desempenho inferior aos resfriadores evaporativos de grande porte. Nos diversos ensaios, utilizando apenas o resfriador evaporativo, a temperatura de bulbo seco na saída do equipamento diminuiu em torno de 2°C. Quanto à questão de conforto térmico, concluiu-se que esse tipo de equipamento não climatiza em regiões com alta umidade relativa como na cidade de Cabedelo-PB.

Em relação ao desumidificador adsorativo, foi observado que a regeneração do leito de sílica-gel, na forma como foi utilizada, é demorada e ocasiona alto consumo elétrico. No entanto, a configuração com telas metálicas possibilitou a utilização de uma maior quantidade de sílica-gel e maior tempo de saturação, e sua disposição melhorou a troca de calor e massa entre o ar e o adsorvente. A desumidificação do ar na saída do equipamento foi alcançada, mas ainda é preciso aperfeiçoar o leito adsorativo para que a dessorção ocorra rapidamente e a adsorção permaneça por um período maior de utilização do sistema adsorativo evaporativo. Se o leito adsorativo satura rapidamente, o fluxo de ar volta a ficar muito úmido, com diminuição do efeito evaporativo no climatizador.

Quanto ao sistema adsorativo evaporativo, foi observado que o conjunto não funcionou adequadamente para climatizar o ambiente, devido às dificuldades técnicas em eliminar as infiltrações após o desumidificador e à necessidade de um resfriador posterior ao desumidificador para o sucesso de tal equipamento em regiões de clima quente e úmido.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos o apoio financeiro disponibilizado pelo IFPB para o desenvolvimento da pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ALODAN, M. A.; AL-FARAJ, A. A. Design and Evaluation of Galvanized Metal Sheets as Evaporative Cooling Pads. **Agricultural Science**, Riyadh, Saudi Arabia, v. 18, n. 1, p. 9-18, Aug./Feb. 2005.
- CAMARGO, J. R.; EBINUMA, C. D.; CARDOSO, S. Three methods to evaluate the use of evaporative cooling for human thermal comfort. **Engenharia Térmica**, Curitiba, v. 5, n. 2, p. 9-15, dez. 2006.
- CAROSSO, G. A. B. **Resfriamento evaporativo**: estudo do potencial de sua aplicação no Brasil. 2006. 127 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2006.
- CASTRO, W. P.; PIMENTA, J. M. D. Modelagem e simulação de painéis evaporativos diretos. In: BRAZILIAN CONGRESS OF THERMAL SCIENCES AND ENGINEERING (ENCIT 2004), 10., 2004, Rio de Janeiro. **Proceedings...** Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia e Ciências Mecânicas, 2004.
- FOUDA, A.; MELIKYAN, Z. A simplified model for analysis of heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. **Applied Thermal Engineering**, v. 31, n. 5, p. 932-936, Apr. 2011.
- FREITAS, E. F. **Construção de uma bancada otimizada para estudo de painéis evaporativos e ensaios de painéis de fibras vegetais**. 2007. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade de Brasília, Brasília-DF, 2007.
- HAMED, A. M.; ABD EL RAHMAN, W. R.; EL-EMAN, S. H. Experimental study of the transient adsorption/desorption characteristics of silica gel particles in fluidized bed. **Energy**, v. 35, n. 6, p. 2468-2483, June 2010.
- HEIDARINEJAD, GH.; BOZORGMEHR, M. Modeling of indirect evaporative air coolers. In: PALENC CONFERENCE, 2.; AIVC CONFERENCE, 28., 2007, Crete Island, Greece. **Proceedings...** Santorini, Greece: Heliotopos Conferences, 2007. p. 416-420.
- HEIDARINEJAD, G.; PASDARSHAHRI, H. Potential of a desiccant-evaporative cooling system performance in a multi-climate country. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, n. 5, p. 1251-1261, Aug. 2011.
- INABA, H.; SEO, J. K.; HORIBE, A. Numerical study on adsorption enhancement of rectangular adsorption bed. **Heat and Mass Transfer**, v. 41, n. 2, p. 133-146, Dec. 2004.
- KODAMA, A. et al. Process configurations and their performance estimations of an adsorptive desiccant cooling cycle for use in a damp climate. **Journal of Chemical Engineering of Japan**, v. 36, n. 7, p. 819-826, 2003.
- MEDEIROS, J. M. **Modelagem e simulação de sistemas de condicionamento de ar com rotores dessecantes**. 2007. 162 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2007.
- RAWANGKUL, R. et al. Performance analysis of a new sustainable evaporative cooling pad made from coconut coir. **International Journal of Sustainable Engineering**, v. 1, n. 2, p. 117-131, Aug. 2008.
- RUIVO, C. R.; FIGUEIREDO, A. R.; COSTA, J. J. Predicted results of the performance of a unizone solid desiccant evaporative cooling. In: MEDITERRANEAN CONGRESS OF CLIMATIZATION, 2004, Lisboa, Portugal. **Proceedings...** Lisboa: Clinamed, 2004.
- RUTHVEN, D. M. **Principles of Adsorption and Adsorption Processes**. New York: Wiley-Interscience, 1984. 464 f.
- SANTOS, M. A. M. **Análise técnica e econômica para utilização de insumos alternativos em um sistema de resfriamento evaporativo-adsorvente aplicado ao condicionamento de ar**. 2005. 83 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade de Taubaté, Taubaté-SP, 2005.
- SANTOS, J. C. et al. Analytical solution for the simultaneous heat and mass transfer problem in air washers. **International Journal of Refrigeration**, v. 34, n. 1, p. 353-361, Jan. 2011.
- SHENG, C.; AGWU NNANNA, A. G. Empirical correlation of cooling efficiency and transport phenomena of direct evaporative cooler. **Applied Thermal Engineering**, v. 40, p. 48-55, July 2012.
- SILVA, M. G. **Estudo experimental de um sistema de condicionamento de ar com rotores dessecantes**. 2010. 156 f. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, 2010.
- WU, J. M.; HUANG, X.; ZHANG, H. Theoretical analysis on heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. **Applied Thermal Engineering**, v. 29, n. 5-6, p. 980-984, Apr. 2009.
- YUAN, W. et al. Study of a new modified cross-cooled compact solid desiccant dehumidifier. **Applied Thermal Engineering**, v. 28, n. 17-18, p. 2257-2266, Dec. 2008.