

Eficiência de painéis de fibras vegetais utilizados para sistemas de resfriamento evaporativo direto: um estudo experimental

Efficiency of vegetable pads used for direct evaporative cooling systems: an experimental study

Reginaldo Soares de Oliveira
reginaldosoares2001
@yahoo.com.br
Instituto Federal de Educação,
Ciência e Tecnologia do Sertão
de Pernambuco - Petrolina

Jorge Recarte Henriquez
Guerrero
rjorge@ufpe.br
Universidade Federal de
Pernambuco - Recife

Ana Rosa Mendes Primo
armprimo@ufpe.br
Universidade Federal de
Pernambuco - Recife

Resumo

Este artigo investiga a eficiência do resfriamento evaporativo de duas estruturas compostas por materiais vegetais economicamente e ecologicamente viáveis (fibra de coco e luffa), comparada a de um painel comercial (papel kraft). Foram testadas três condições de vazões de água e ar através dos painéis (0,10 m e 0,15 m de espessura). Para caracterizar cada painel, foram determinadas as perdas de cargas, velocidades de ar, vazões de água, absorção de água, gramatura e densidade. Os melhores resultados corresponderam a painéis de 0,15 m de espessura, com temperatura de 36 °C e 24% de umidade relativa para a entrada de ar, com 89,3 g/s de vazão de água e 0,6 m/s de velocidade de ar. Nessas condições, a eficiência de resfriamento foi de 77,3% (luffa), 79,9% (coco) e 84,5% (comercial). Este estudo mostra que as fibras vegetais apresentam perspectivas promissoras para o uso em escala industrial.

Palavras-chave: Resfriamento evaporativo. Fibras vegetais. Eficiência de resfriamento.

Abstract

This article investigates the evaporative cooling efficiency of two structures composed of vegetable material economically and ecologically viable (coconut fiber and luffa), compared to that of a commercial panel (kraft paper). Three conditions for the flow of water and air through the pads (0.10 m and 0, 15 m thick) were tested. In order to characterize each panel, the pressure drops, air velocities, water volume, water absorption, weight and density were determined. The best results correspond to panels of 0.15 m thick, with 36 °C temperature and 24 % relative humidity (air intake), with 89.3g/s of water flow and 0.6 m/s (air speed). Under these conditions, the cooling efficiency was 77.3 % (luffa), 79.9 % (coconut) and 84.5 % (commercial). This study shows that vegetable fibers show promising prospects for use in industrial scale.

Keywords: Cooling pad. Vegetable fibers. Cooling efficiency.

1 Introdução

O condicionamento do ar é responsável tanto pelo aumento da eficiência do homem no trabalho quanto pelo seu conforto e sensação de bem-estar, além de poder ser utilizado para propiciar condições ambientais apropriadas para animais e plantas ou objetos e equipamentos localizados no recinto condicionado. Atualmente, os sistemas de condicionamento de ar por compressão a vapor e o de ventilação são os mais utilizados para esse fim. A importância do resfriamento evaporativo tem evoluído nas últimas décadas, devido a fatores como a crescente crise de energia, os problemas ambientais causados pelos fluidos refrigerantes CFC (Cloro-Flúor-Carbonetos) usados em condicionadores de ar, bem como a baixa eficiência dos sistemas de ventilação, principalmente nos meses mais quentes do ano.

O resfriamento evaporativo é um método simples e prático de condicionamento de ar, especialmente usado nas regiões mais áridas do mundo. No Brasil, é mais utilizado nas regiões distantes do litoral e em torno da região central do país. Em muitos casos, mostra-se uma tecnologia econômica, de baixo custo de energia, e livre de poluição, quando comparada aos sistemas convencionais.

É evidente que o uso racional da água e o reaproveitamento máximo da energia favorecem não só o lado financeiro e econômico, mas também o lado ambiental, tendo como foco principal o desenvolvimento sustentável. No resfriamento evaporativo do tipo direto (RED), utilizando painel de contato, a água é borrifada na parte superior do sistema a fim de criar uma película de água, em queda por gravidade, sobre um painel de elevada área superficial. Por ação de um exaustor, uma corrente de ar passa através do painel úmido, tornando-se mais fria e mais úmida, devido à transferência de calor e massa entre a película de água e o ar. No fim do processo, o ar sai do painel com sua temperatura de bulbo seco menor e umidade relativa maior, enquanto a água é coletada em um recipiente localizado na parte inferior, sendo recirculada continuamente por meio de uma bomba de recirculação de água. A temperatura da água é próxima da temperatura de bulbo úmido de entrada.

O ar atmosférico é uma mistura de ar seco e vapor de água. Para uma dada condição de temperatura e pressão, essa mistura tem capacidade de conter uma quantidade máxima de vapor d'água. Sendo assim, o resfriamento evaporativo aproveita essa capacidade do ar de armazenar água em forma de vapor e opera utilizando a água e o ar como fluidos de trabalho. A evaporação de água através da passagem de um fluxo de ar provoca redução na temperatura e elevação de sua umidade específica. Esse processo é mais eficiente quando a temperatura do ar externo é mais elevada e sua umidade específica é menor, ou seja, quando a necessidade de resfriamento é maior para otimizar as condições ambientais. O ar já se encontra diluído, ocupando todos os espaços disponíveis e entra em contato com a água. Dessa forma, o painel evaporativo é utilizado com o propósito de aumentar a área superficial de contacto entre a água e o ar.

Com o intuito de conhecer melhor o processo de resfriamento evaporativo e encontrar formas de aumentar a eficiência de resfriamento, bem como propor novos materiais e arranjos, muitos estudos foram desenvolvidos, de cunho teórico, experimental ou aplicado.

Strobel *et al.* (1999), por exemplo, apresentam tabelas para determinação do fluxo de água mínimo e capacidade mínima da bomba de recirculação de água para painéis evaporativos de celulose rígida corrugada; sugerem taxas de renovação de ar requeridas em estufas específicas para animais, dimensões e localização do painel e do exaustor; destacam a opção de fixar três estágios para as condições de conforto térmico no interior de estufas: quente, morno e frio, nos quais a água é utilizada pelo sistema apenas nos meses quentes; além disso, indicam colocar termostatos na estufa e descrevem como proceder para efetuar uma manutenção e prolongar a vida útil dos painéis evaporativos.

Liao e Chiu (2002) desenvolveram um túnel de vento compacto para determinar a eficiência de resfriamento evaporativo de painéis alternativos. Nesse trabalho, utilizaram duas amostras de painéis com malha confeccionada de PVC e, como resultado da eficiência de resfriamento evaporativo, obtiveram 81,75% a 84,48 % para a malha mais grossa e 76,68% a 91,64% para a mais fina.

Al-Sulaiman (2002) projetou o protótipo de um túnel de vento para avaliar o desempenho de painéis evaporativos de fibras vegetais em substituição a painéis evaporativos fabricados de celulose rígida corrugada (papel *kraft*) e com canais desencontrados. As fibras escolhidas foram a fibra da haste da palma, da juta e da *luffa cilíndrica* (esponja vegetal). O painel de celulose rígida corrugada foi usado como referência. Os resultados mostraram que a eficiência de resfriamento média foi de 62,1% para a juta; 55,1% para a *luffa cilíndrica*; 49,9% para a celulose rígida corrugada; e 38,95 % para a palma.

Alodan e Al-Faraj (2005) destacam que os painéis de sistemas de resfriamento evaporativo utilizados comercialmente (celulose rígida corrugada) ficam impregnados de minerais e poeira provenientes do ar e da água, o que pode encurtar a vida útil deles. Como alternativa, construíram um painel de folhas de metal galvanizado em forma de ziguezague. Para as condições mais severas da temperatura de bulbo seco do ar externo, a média da eficiência de resfriamento evaporativo foi de 76%, 86% e 88% para os painéis evaporativos com espessura de 0,15 m, 0,2 m e 0,3 m, respectivamente.

Vigoderis *et al.* (2007) publicaram um trabalho experimental no qual foi construído um protótipo de túnel de vento para analisar o desempenho de argila porosa expandida (cinasita) e umedecida com água para ser utilizada como meio evaporativo em sistema de resfriamento evaporativo de ambientes específicos para animais. O desempenho dos painéis de argila com espessura de 0,05 m, 0,075 m, 0,09 m e 0,12 m foram comparados com um painel de celulose rígida corrugada de 0,15 m. As velocidades do ar para a celulose rígida corrugada estiveram entre 1,07 m/s e 1,62 m/s, e a perda de carga, entre 4,9 Pa e 9,8 Pa. Enquanto as velocidades do ar para a argila ficaram entre 0,74 m/s e 1,27 m/s, a perda de carga ficou entre 88,2 Pa e 176,5 Pa. O protótipo se mostrou eficiente para a caracterização de materiais alternativos. A argila porosa se mostrou apropriada para a utilização em resfriamento ambiental, com uma eficiência em torno de 44,1% a 79,7%, enquanto a celulose rígida obteve eficiência de 74,6% a 79,6 %.

Rawankul *et al.* (2008) avaliaram a eficiência do resfriamento evaporativo de dois painéis construídos a partir de fibras de coco, com diferentes configurações, para serem testados como meio úmido em sistemas de resfriamento evaporativo. Os dados obtidos foram comparados com painéis de celulose rígida corrugada com as mesmas dimensões de 0,135 m x 0,1 m x 0,07 m. Os resultados revelaram que a eficiência de resfriamento para os painéis de fibra de coco da amostra tipo 1, com velocidades entre 2,9 m/s e 4,64 m/s (perda de carga entre 2,9 Pa e 8,1 Pa), ficaram em torno de 51,53% e 48,69%. A amostra tipo 2, com velocidades entre 2,05 m/s e 3,55 m/s, esteve entre 45,66 % e 44,07% (perda de carga em torno de 1,5 Pa). Para a celulose rígida corrugada, com velocidades entre 4,32 m/s e 5,36 m/s, os valores estiveram entre 49,17% e 46,29 % (com perda de carga entre 9,1 Pa e 12,4 Pa). Também foi informado que a eficiência de resfriamento poderia melhorar através de arranjos diferentes, com o objetivo de aumentar o contato ar-água.

Rosa (2009) avaliou a eficiência de painéis de contato ar-água com um protótipo de túnel de vento utilizado por Silva (2002) e Vigoderis *et al.* (2007). Porém, nas pesquisas anteriores, foi demonstrado que a argila expandida (cinasita) possui características favoráveis de densidade, porosidade, durabilidade e disponibilidade no comércio, sugerindo tratar-se de um material que satisfaz as exigências pertinentes a um bom material poroso, podendo substituir, com vantagem econômica, a celulose rígida corrugada. Contudo, não findou a questão relativa ao dimensionamento dos painéis de argila expandida em termos de área, escolha granulométrica e espessura que possibilite uma eficiência de resfriamento do ar similar à conseguida com a celulose rígida corrugada. Assim, Rosa (2009) direcionou seu trabalho para obter um modelo estatístico que permita dimensionar placas porosas em argila expandida a várias condições de temperatura, velocidade das correntes de ar, espessura e granulometria, para emprego em condicionamento de ar de ambientes em geral. Também aplicou os princípios da conservação de massa e energia no dimensionamento de placas evaporativas de argila expandida, validando através do experimento e das comparações com o painel evaporativo de celulose rígida corrugada. Além disso, caracterizou a argila expandida em função das dimensões e especificações granulométricas que fossem consideradas ótimas em termos de transferência de calor e massa.

Os resultados foram analisados utilizando testes de hipóteses de duas médias e regressão linear múltipla. Foram encontrados valores de eficiência de resfriamento para os painéis confeccionados com argila expandida na granulometria 1 (referente à brita 1) em relação à granulometria 2 (referente à brita 2) para todas as espessuras de painéis adotadas (0,06 m, 0,08 m, e 0,1 m de espessura). Verificou-se, também, um bom desempenho para o painel evaporativo de 0,1 m de espessura, para a granulometria 2 da argila. Pela análise estatística de regressão linear múltipla, concluiu-se que os painéis de argila expandida com granulometria 1 e espessura de 0,08 m são os que possibilitam melhor eficiência de resfriamento adiabático evaporativo para velocidade do ar entre 0,49 m/s e 1,05m/s.

Segundo Camargo (2009), os resfriadores evaporativos podem ser de resfriamento evaporativo direto (RED), resfriamento evaporativo indireto (REI) ou misto. No REI, o ar se mantém separado do processo de evaporação da água, transferindo apenas calor sensível para uma corrente de ar secundária. Já os RED, objeto deste estudo, resfriam água por contato direto (ar-água), seja através da área de uma superfície sólida umedecida com água ou através de água pulverizada. O processo trabalha, essencialmente, com a conversão de uma parcela do calor sensível em calor latente. A corrente de ar (mistura de ar seco e vapor de água) é resfriada por evaporação da água para o ar. A adição de vapor d'água aumenta o calor latente e a umidade relativa do ar. Considerando as perdas de calor para o ambiente desprezível, o processo pode ser considerado adiabático e, dessa forma, o aumento do calor latente é compensado por uma redução do calor sensível e uma conseqüente diminuição da temperatura de bulbo seco do ar.

Segundo Qiang *et al.* (2010), os sistemas de resfriamento evaporativo de dois estágios, compostos por um RED e um REI, têm vantagens em relação aos sistemas que trabalham de forma isolada. Entre as vantagens, citam o menor consumo de energia, a redução de custos, o fato de ser ambientalmente amigável e ter uma eficiência de resfriamento evaporativo superior. A análise experimental e teórica demonstra que o sistema de dois estágios tem perspectiva favorável para aplicação na região semiárida do noroeste da China. O valor da temperatura de bulbo seco de saída do resfriador evaporativo de dois estágios depende da temperatura de bulbo seco de entrada e da umidade relativa do ar secundário, além da espessura do painel evaporativo. A eficiência de resfriamento do resfriador evaporativo de dois estágios pode atingir valores de temperatura de bulbo seco na saída próximos aos da temperatura de bulbo úmido de entrada com umidade relativa em torno de 90 %. A eficiência de resfriamento evaporativo utilizando o resfriador de dois estágios (RED e REI) variou de 1,1 a 1,2 sobre o resfriador evaporativo do tipo direto.

O principal foco deste trabalho foi encontrar novas opções de enriquecimentos que possam reduzir o custo da produção de um resfriador evaporativo e, ao mesmo tempo, possuam uma eficiência de resfriamento próxima à do enriquecimento

comercial (celulose rígida corrugada). As fibras vegetais são uma dessas opções largamente pesquisadas, tendo como características a abundância, a biodegradabilidade e o baixo custo de processamento. Desse modo, foi pesquisada a fibra de *luffa cilíndrica* (esponja vegetal) e a fibra de coco (*cocos nucifera Linnaeus*), tendo a celulose rígida corrugada (papel *kraft*) como referência. Sabe-se da importância de construir um arranjo que possa propiciar uma maior área de interface ar-água e que favoreça ao máximo a transferência de calor e massa sem aumentar demasiadamente a perda de carga do sistema.

2 Metodologia

2.1 Painéis e túnel de testes

Os painéis evaporativos alternativos foram desenvolvidos a partir de fibras vegetais do mesocarpo do coco (região fibrosa intermediária entre a casca externa e a camada que envolve a parte comestível) e a *luffa cilíndrica* (esponja vegetal). As fibras vegetais em forma de mantas foram prensadas em calandras, com o intuito de compactar as fibras e facilitar a confecção de arranjos próximos ao formato de colmeias, com as mesmas dimensões volumétricas do painel de celulose rígida corrugada. O formato do arranjo dos painéis de fibras vegetais próximos às características dimensionais da celulose rígida corrugada teve como finalidade fornecer condições próximas às oferecidas pelo material de referência, conforme Figura 1, e, assim, fazer uma análise criteriosa da eficiência de resfriamento.

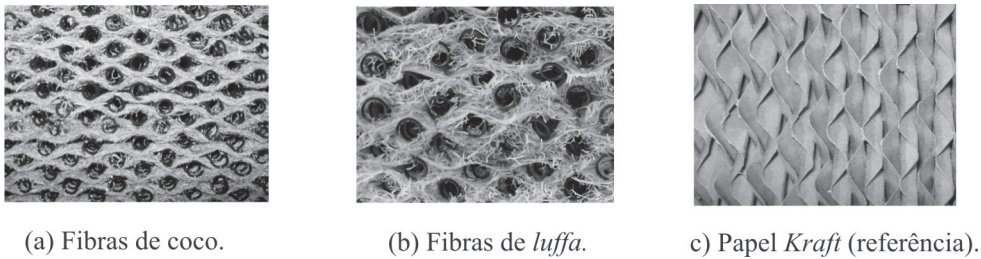


Figura 1: Tipos de enchimentos testados experimentalmente.

Com o intuito de encontrar a eficiência de resfriamento evaporativo dos painéis de contato ar-água em várias condições de entrada e espessura, foi projetado e construído, no Departamento de Engenharia Mecânica da UFPE/Brasil, um túnel de testes modular (módulos de 1 a 9) em chapa de aço galvanizado, com bitola MSG 22, dimensões internas de 0,315 m x 0,315 m, isolado termicamente e adaptado com equipamentos e acessórios, munido de instrumentos de medição, conforme Figura 2.

O túnel de testes foi construído de forma que fosse possível medir os parâmetros mais importantes no estudo do resfriamento evaporativo, tais como: a umidade relativa e a temperatura de bulbo seco na entrada e saída do painel, a temperatura da água na entrada e saída do painel, a temperatura de bulbo seco do ar ambiente, a velocidade de ar e vazão mássica de água recirculada.

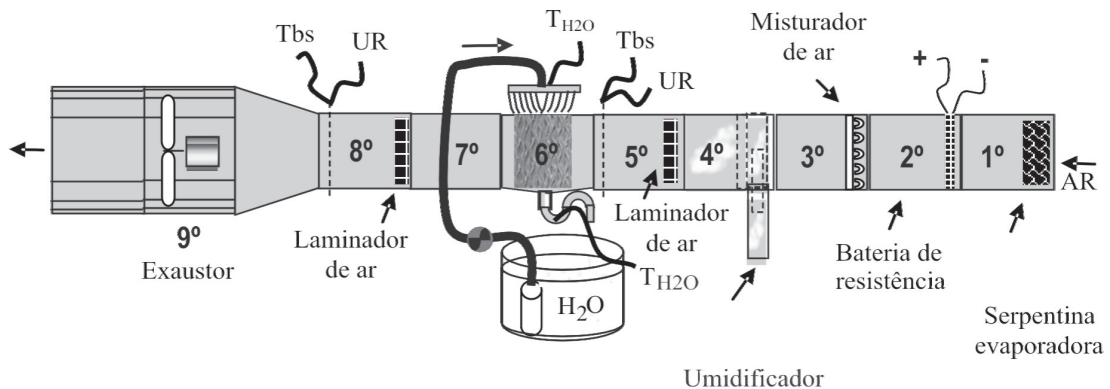


Figura 2: Túnel de testes dos painéis evaporativos de contato ar-água.

Considerando que a umidade relativa na cidade do Recife é alta, pois é próxima ao oceano Atlântico, foi necessário instalar, no primeiro módulo, uma serpentina de resfriamento de um condicionador de ar de 18.000 BTUs, e assim, diminuir a umidade específica do ar externo. Contudo, além de diminuir a umidade específica, a serpentina diminuiu, também, a temperatura de bulbo seco de entrada e, assim, foi instalada, no segundo módulo, uma bateria de resistências de 3.000 W comandada por um variador de potência elétrica de 3.600 W (marca Auge) para controlar o fornecimento de calor. No terceiro módulo, foi instalado um feixe de barras na vertical e na horizontal para homogeneizar as temperaturas do fluxo de ar. No quarto módulo, foi instalado um umidificador de ar ultrassônico (marca Humid Air) que insere microgotículas de água em forma de névoa de 400 ml/h, com o intuito de possibilitar aumento de umidade específica, quando necessário. No quinto módulo, foi instalado um laminador de ar, recomendado pela norma internacional ISO 5801 (2007), para diminuir a turbulência causada durante todo o percurso do fluxo de ar. Ainda no quinto módulo foram instalados nove sensores de temperatura (termopar tipo “T”), de forma equidistante, e um sensor de umidade relativa (sensor capacitivo), calibrados previamente. No sexto módulo, o mais importante, pois se refere ao espaço onde fica o painel de contato ar-água, foi instalado um sistema de recirculação de água munido de bomba, sistema de distribuição superior, bandeja, tanque com sistema homogeneizador de temperatura (*by-pass*), registro tipo agulha e mangueiras.

Nesse módulo, a bomba instalada no tanque permanece ligada durante cada medição e pulveriza água através de micro-tubos na parte superior do painel de contato; assim, após atravessar o painel, a água cai na bandeja coletora e retorna para o tanque. O sétimo módulo ficou livre para futuras intervenções. No oitavo módulo, foi instalado outro laminador de ar com a mesma finalidade mencionada no quinto módulo. Como procedido para o quinto módulo, foram instalados nove sensores de temperatura (termopar tipo “T”), de forma equidistante, e um sensor de umidade relativa (sensor capacitivo), calibrados previamente. Por fim, no nono módulo, foi instalado um exaustor axial industrial trifásico de 1715 RPM (marca Ventisilva E-40 TR) e acionado por um inversor de frequência (marca Sinus M0001 4T BA2K2) para variar a vazão do ar.

Para caracterizar cada painel de contato ar-água, foram determinados a absorção de água, gramatura, densidade, perda de carga, perfil de velocidade e a velocidade média do fluxo de ar. Antes de efetuar a caracterização de cada painel, foi definido um procedimento para as condições de teste, em que cada condição psicrométrica de entrada (temperatura de bulbo seco e umidade relativa) correspondia a determinada vazão de água e ar, conforme indicado pela Tabela (1). Por exemplo, para a condição I, com 30 °C de temperatura de bulbo seco e 30 % de umidade relativa de entrada, foram realizados testes utilizando a vazão de água “A”, com as vazões de ar 1, 2 e 3. Seguindo o mesmo raciocínio, foram desenvolvidas as demais condições de testes.

Tabela 1: Esquema de medições da eficiência de resfriamento dos painéis no túnel de testes.

Mesmas condições psicrométricas de entrada do ar para os três painéis com espessura de 0,1 m e 0,15 m (temperatura de bulbo seco em torno de 30 °C, 32 °C, 34 °C e 36 °C, e umidade relativa em torno de 30 %, 28 %, 26 % e 24 %): Condição I: 30 °C e 30 % (A1 até C3); Condição II: 32 °C e 28 % (A1 até C3); Condição III: 34 °C e 26 % (A1 até C3); Condição IV: 36 °C e 24 % (A1 até C3).	Vazão média de água (g/s)	Vazão média de ar (m³/s)	Condições de testes
	A (89,3)	1 (0,12)	A1
		2 (0,09)	A2
		3 (0,05)	A3
	B (105,7)	1 (0,12)	B1
		2 (0,09)	B2
		3 (0,05)	B3
	C (112,6)	1 (0,12)	C1
		2 (0,09)	C2
		3 (0,05)	C3

A Tabela 2 destaca algumas características dos painéis utilizados no experimento. Inicialmente, uma pequena amostra com 0,0025 m² de cada manta seca foi pesada 5 vezes numa mesma balança digital, verificando a média e o erro na medição. Da mesma forma foi realizado com as mantas molhadas. Contudo, antes de efetuar a pesagem destas, todas as amostras foram mergulhadas em água por um período de 1 hora, sendo retirado o excesso de água e penduradas num fio metálico por 5 minutos em um ambiente sem condicionamento de ar, pois isso diminuiria a umidade específica do ar e poderia provocar a evaporação de parte da água de cada amostra. A absorção de água foi definida pela diferença de cada amostra molhada e seca. Para a gramatura, foi considerada a quantidade de material em kg que existe numa área de 1 m². A densidade foi indicada como a quantidade de material em kg que existe num volume em m³.

Diante dos dados expostos na Tabela 2, verifica-se que as fibras vegetais selecionadas possuem maior capacidade de retenção de água em relação à celulose rígida corrugada. Esse fato pode ser explicado pelo formato das tramas, que favorece a retenção. As fibras da *luffa* são unidas de forma natural e as fibras de coco são unidades com resina à base de látex. A maior capacidade de absorção de água pode favorecer a transferência de calor e massa, porém, pode se tornar um aspecto negativo quando se trata de perda de carga, pois o excesso de água aumenta o atrito com o fluxo de ar e exige um ventilador de maior capacidade. Já a densidade da manta de celulose rígida corrugada é maior, mas o painel desse material é mais leve, pois a sua gramatura é menor, assim como sua espessura.

Tabela 2: Principais características dos painéis evaporativos.

Principais características	Fibra de <i>luffa</i>	Fibra de coco	Celulose rígida
Peso da amostra da manta seca (0,0025m ²), g	0,52054 (± 0,0001)	0,74142 (± 0,00005)	0,34952 (± 0,00002)
Peso da amostra da manta molhada (0,0025m ²), g	1,69042 (± 0,0016)	1,5482 (± 0,00007)	0,69784 (± 0,00199)
Absorção de água da amostra da manta (0,0025 m²), g	1,16988	0,80678	0,34832
Gramatura da manta seca, kg/m²	0,208216	0,296568	0,139808
Densidade da manta seca, kg/m³	104,108	148,284	699,04
Espessura da manta do painel evaporativo, m	0,002	0,002	0,0002
Largura da manta do painel evaporativo, m	0,34	0,34	0,37
Espessura do painel evaporativo, m	0,1 e 0,15	0,1 e 0,15	0,1 e 0,15
Dimensões painel: largura (m) x altura (m)	0,285 x 0,295	0,285 x 0,295	0,285 x 0,295

Nota:

Foi utilizada uma balança digital Toledo Adventure AR2140, resolução de 0,01 g e peso máximo de 210g; e um paquímetro marca Mitutoyo, série 522, capacidade de 0 a 6", graduação superior a 1/128" e inferior a 0,005mm (± 0,05 mm).

O enchimento, além de promover a evaporação da água pelo ar, também atua como um filtro de purificação do ar, retendo partículas acima de 3 micra. Sendo assim, a água foi substituída quando necessário e, ao mesmo tempo, realizava uma manutenção do sistema de recirculação de água. Além disso, um sistema de filtragem foi colocado na saída da bandeja coletora de água para evitar que quaisquer impurezas fossem puxadas pela bomba de recirculação de água e prejudicassem o funcionamento da bomba ou provocassem entupimentos no sistema de distribuição de água.

Segundo Paz (2005), se um aparelho de resfriamento evaporativo ficar parado por um período longo, poderão aparecer colônias de fungos, bactérias e algas, principalmente na bandeja e no painel, o que, além de afetar a eficiência de resfriamento, dificulta a transferência de calor e massa, podendo afetar a saúde dos ocupantes de um determinado recinto, sendo a bactéria *Legionella* a maior preocupação. Paz (2005) ainda destaca que, em operação, essa proliferação é bastante reduzida pela aeração da água e ação do oxigênio como oxidante dos micro-organismos. Algumas empresas aconselham, para grandes instalações, utilizar um produto antibiótico, como cloro, formol ou tetra amônia.

Além disso, é interessante adquirir um resfriador que, ao desligar, só o sistema de circulação de água desligue e, após secagem do painel, o resfriador seja desligado por completo. Assim, o painel fica sempre seco e tem aumentada sua durabilidade. A limpeza do painel evaporativo se faz com jato de água em forma de leque suave, com secagem em área arejada, à sombra, pois se considera que o jato de água excessivo pode provocar deteriorização do painel evaporativo, afetando sua eficiência. Destaca-se que a fibra de coco, uma das opções pesquisadas neste trabalho, possui tanino, um antifúngico e bactericida natural.

Os painéis evaporativos foram mergulhados na água por um período mínimo de 12 horas antes de cada teste de eficiência de resfriamento. Assim, garantiu-se que todos os painéis de contato iniciassem os testes de eficiência de resfriamento com capacidade máxima de água absorvida em toda extensão volumétrica, caso contrário, só com a recirculação de água sobre os painéis seria difícil precisar qual o tempo suficiente para umidificar todo o painel e iniciar a coleta de dados.

Para determinação da vazão de água no túnel de testes, utilizou-se o método gravimétrico, conforme Neto (2008), estando de acordo com a NBR ISO 4185. Nesse procedimento, foi utilizada uma balança digital Filizola, modelo MF-3, com capacidade de 3 kg e resolução de 0,5 g; um vasilhame de vidro graduado Pyrex, modelo Erlenmeyer, volume

de 1.800 ml e com exatidão de $\pm 5\%$ da leitura; e um cronômetro digital portátil Instrutherm, modelo CD-2800, com resolução de 0,01 s. Para executar a medição, só a bomba de recirculação de água foi ligada, para evitar que o fluxo de ar evaporasse parte da água e afetasse o valor real para cada condição. As três vazões de água obtidas (89,26 g/s, 105,66 g/s e 112,59 g/s) foram definidas com cronometragem do tempo de enchimento do Erlenmeyer e posterior pesagem na balança digital. Esse procedimento foi realizado 10 vezes para determinar cada vazão de água e obteve-se uma propagação de incerteza de medição de $\pm 0,3$ g/s. As vazões de água determinadas para o túnel de testes estão dentro das faixas de vazões de água para cada comprimento do painel de celulose rígida corrugada recomendado por Strobel *et al.* (1999).

Durante os testes para determinação da velocidade de ar, perda de carga e eficiência de resfriamento, esperou-se uma estabilização das condições de fluxo mássico de água e ar com as condições ambientais, isto é, todas as medições foram realizadas em regime permanente.

Uma vez que a velocidade no túnel de testes varia ao longo da seção reta e não existe uma corrente livre bem definida, foi necessário considerar uma velocidade média (V_m). Dessa forma, após encontrar as velocidades antes dos painéis evaporativos através de um anemômetro com faixa de medição da velocidade entre 0,2 m/s e 40 m/s, exatidão de $\pm 0,75\%$ da leitura e resolução de 0,01 m/s, marca Omega HHF710, obteve-se um perfil de velocidade com valores próximos. A velocidade média (V_m) encontrada ficou em torno de 0,6 m/s, 0,9 m/s e 1,2 m/s.

Os três painéis obtiveram regime laminar com $Re < 2.300$, que corresponde ao número crítico de Reynolds quando surge o regime de transição laminar e turbulento em escoamento interno, no qual o maior valor de Reynolds não ultrapassou 623. As medições foram realizadas em oito pontos equidistantes no interior do túnel de testes, sendo quatro na horizontal e quatro na vertical. Foram tomadas as devidas precauções para evitar inclinação da barra de extensão do anemômetro em relação à direção do fluxo de ar, como também inclinação da micro-hélice. Para cada medição e condição, o sistema de exaustão de ar e recirculação de água foi ligado, assim como o condicionador de ar e a bateria de resistências elétricas.

A perda de carga dos painéis foi determinada com a utilização de um tubo Pitot Dwyer 160 E-00 e um transdutor eletrônico de pressão diferencial Kimo MP 100 com exatidão de $\pm 0,5\%$ da leitura. O tubo Pitot foi inserido na parte superior do túnel de testes, antes e depois do painel de contato. Nessa medição, foram tomados os devidos cuidados com a direção de tomada de pressão e a inclinação do tubo Pitot; também foi garantido que o transdutor eletrônico de pressão diferencial trabalhasse com a diferença entre a pressão estática no interior do túnel de testes e a pressão atmosférica. O valor da perda de carga foi definido pela diferença entre as pressões estáticas (P_e) em Pa antes e depois dos painéis evaporativos. Sabe-se que quanto menor a perda de carga, melhor será a eficiência do resfriamento evaporativo.

A perda de carga proveniente do painel de fibra de coco ficou entre 1,8 Pa e 4,8 Pa (0,1 m de espessura) e 2,8 Pa e 5,8 Pa (0,15 m). A perda de carga para a fibra de *luffa* ficou entre 3,2 Pa e 5,6 Pa (0,1 m) e 4,2 Pa e 6,6 Pa (0,15 m). A celulose rígida corrugada (Marca Munters utilizando folhas de papel *kraft* com ondulações em ângulo de 45° e outra desencontrada em ângulo de 15°) ficou entre 1,2 Pa e 3,2 Pa (0,1 m) e 2,2 Pa e 4,6 Pa (0,15 m). As perdas de cargas maiores das fibras vegetais podem ser resultado do arranjo construtivo, da rugosidade do material e da sua capacidade de absorção de água. Contudo, o valor não ficou muito distante da celulose rígida corrugada, caso contrário, exigiria um ventilador com maior capacidade.

Os dados obtidos de perda de carga com a celulose rígida corrugada dependem da forma de construção do painel. Existem painéis com ondulações desencontradas de $45^\circ \times 15^\circ$, $45^\circ \times 30^\circ$ e $45^\circ \times 45^\circ$. Os valores podem mudar um pouco em função do ângulo das ondulações do papel *kraft*, como também da vazão de água e velocidade do ar. Cachuté *et al.* (2006) desenvolveram um trabalho no programa CFX para encontrar a perda de carga em painéis evaporativos da marca General Shelters of Texas. Nesse trabalho, eles não definem a vazão de água que foi usada nem o ângulo das ondulações das folhas de papel *kraft*. Considerando que a maior influência no resultado da perda de carga para os painéis de celulose rígida corrugada está correlacionada principalmente à velocidade do ar, os valores obtidos por este artigo estão próximos dos valores obtidos por aqueles autores, pois na faixa de velocidade de ar entre 0,5 m/s e 1 m/s, e 0,15 m de espessura, esse mencionado trabalho obteve valores entre 0 e 7,85 Pa.

2.2 Eficiência de resfriamento evaporativo

Segundo a ASHRAE Standard (2001), a eficiência de resfriamento evaporativo de painéis de contato ar-água é medida pela eficiência de saturação evaporativa (η). Para encontrar a equação que determina a eficiência de resfriamento evaporativo (η), considera-se o fluxo de calor sensível trocado pelo ar, conforme Equação 1, e fluxo de calor transferido por convecção (Lei de resfriamento de Newton), conforme Equação 2.

$$\dot{q}_{cs} = \dot{m}_{ar} c_{par} (T_{bs_e} - T_{bs_s}) \quad (1)$$

$$\dot{q}_{cc} = H_c dA_s (T_{bs_e} - T_{bu_e}) \quad (2)$$

Em que:

\dot{q}_{cs} = Fluxo de calor sensível trocado pelo ar, kJ/s.

\dot{q}_{cc} = Fluxo de calor transferido por convecção (Lei de resfriamento de Newton), kJ/s.

\dot{m}_{ar} = Fluxo mássico da mistura ar seco e úmido, kg/s.

c_{par} = Calor específico da mistura ar seco e úmido, kJ/kg.°C.

T_{bs_e} = Temperatura de bulbo seco de entrada no painel de contato ar-água, °C.

T_{bs_s} = Temperatura de bulbo seco de saída no painel de contato ar-água, °C.

T_{bu_e} = Temperatura de bulbo úmido de entrada no painel de contato ar-água, °C.

H_c = Coeficiente convectivo de transferência de calor do ar, W/m².K.

A_s = Área superficial de contato ar-água do painel evaporativo, m².

Combinando as Equações 1 e 2, que são equivalentes, obtém-se as Equações 3 à 7.

$$H_c dA_s (T_{bs_e} - T_{bu_e}) = \dot{m}_{ar} c_{par} (T_{bs_e} - T_{bs_s}) \quad (3)$$

Fazendo a devida integração

$$\frac{H_c}{\dot{m}_{ar} c_{par}} \int_0^{A_s} dA = \int_{T_{bs_e}}^{T_{bs_s}} \frac{(T_{bs_e} - T_{bs_s})}{(T_{bs_e} - T_{bu_e})} \quad (4)$$

Obtém-se:

$$1 - \frac{T_{bs_e} - T_{bs_s}}{T_{bs_e} - T_{bu_e}} = \exp \left(- \frac{H_c A_s}{\dot{m}_{ar} c_{par}} \right) \quad (5)$$

A eficiência de resfriamento do painel evaporativo é definida como:

$$\eta_1 = \frac{T_{bs_e} - T_{bs_s}}{T_{bs_e} - T_{bu_e}} \quad (6)$$

$$\eta_2 = 1 - \exp \left(- \frac{H_c A_s}{\dot{m}_{ar} c_{par}} \right) \quad (7)$$

Com as condições psicrométricas coletadas no experimento, utilizou-se a Equação 6 para encontrar a eficiência de resfriamento evaporativo dos painéis de fibra de coco, fibra de *luffa* e celulose rígida corrugada.

3 Resultados e discussão

A melhor eficiência de resfriamento evaporativo obtida para os painéis utilizados no experimento foi para os painéis com 0,15 m de espessura. Para as mesmas condições de entrada, a melhor eficiência foi de 77,2% para o painel de *luffa*, 79,5% para o painel de fibra de coco e 84,6% para o de celulose rígida corrugada. Para a pior eficiência, a sequência não muda, com 52,2% para o painel de *luffa*, 55% para o painel de fibra de coco e 60,3% para o painel de celulose rígida corrugada. Esses resultados indicam que os valores da eficiência da fibra de *luffa* e de coco ficaram muito próximos. Isso pode ser explicado pelo fato de o arranjo ser muito parecido, isto é, mantas com a mesma espessura e posicionadas para dar o formato de colmeias e com as mesmas dimensões dos canais. Destaca-se que foram retiradas duas mantas dos painéis de *luffa*, pois, quando molhado, aumentava de volume e alterava a altura padrão.

A vazão de água recirculada pela bomba nos painéis de contato ar-água foi de 89,3 g/s, 105,7 g/s e 112,6g/s. Devido à pequena diferença entre elas, a eficiência de resfriamento evaporativo dentro das mesmas condições de entrada praticamente não alterou.

Liao e Chiu (2002) destacam o aumento da perda de carga em função do aumento da velocidade média do ar no painel de contato ar-água, provocando uma diminuição da eficiência de resfriamento. Observando a Figura 3, pode-se

certificar que o aumento da velocidade média do ar provoca um aumento da perda de carga para os painéis com 0,1 m de espessura. Conseqüentemente, na Figura 4, o aumento da velocidade média do ar diminui a eficiência de resfriamento evaporativo para todos os painéis. Dessa forma, optou-se por fazer os testes com velocidades médias baixas (em torno de 0,5 m/s e 1,2 m/s). Além disso, o valor da eficiência de resfriamento foi considerado uma média de 80 medições dentro de um espaço de tempo correspondente a 20 minutos.

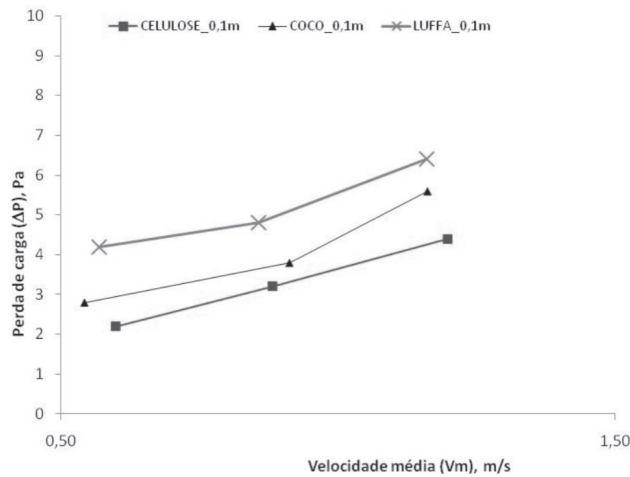


Figura 3: Perda de carga (ΔP) versus velocidade média do ar (V_m) através dos painéis de contato com 0,1 m de espessura para condições de entrada com T_{bs_e} de 36 °C e UR_e de 24%.

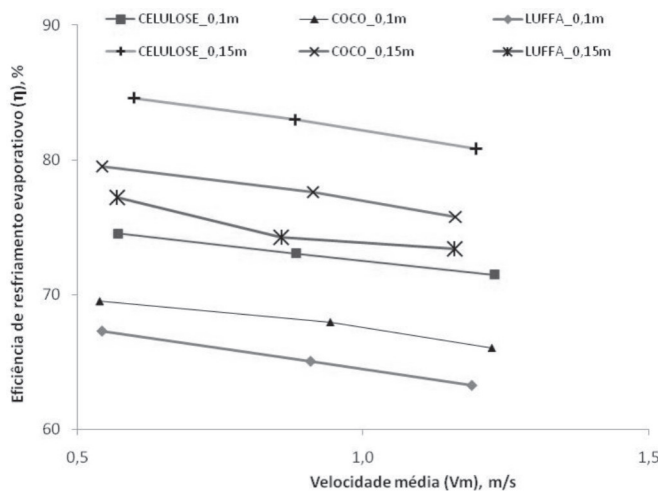


Figura 4: Eficiência de resfriamento evaporativo (η) dos painéis de contato com 0,1 m e 0,15 m de espessura versus velocidade média do ar (V_m) para condições de entrada com T_{bs_e} de 36 °C e UR_e de 24%.

A Figura 5 destaca o efeito do aumento da temperatura de bulbo seco de entrada (T_{bs_e}) na eficiência de resfriamento evaporativo (η) em painéis de contato ar-água. Verifica-se, para os três tipos de painéis, que a eficiência de resfriamento evaporativo (η) ficou em torno de 45% a 85%, e seu aumento se efetua em função do aumento da temperatura de bulbo seco de entrada (T_{bs_e}), que ficou em torno de 30 °C a 37 °C.

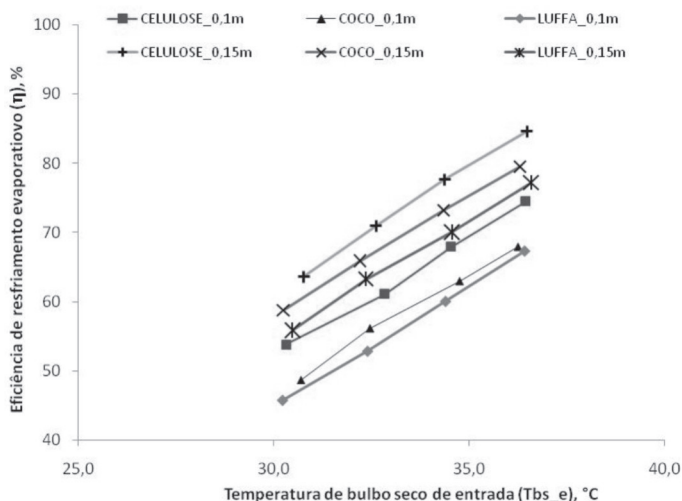


Figura 5: Eficiência de resfriamento evaporativo (η) dos painéis de contato ar-água do experimento com 0,1 m e 0,15 m de espessura *versus* temperatura de bulbo seco de entrada (T_{bs_e}).

Na Figura 6, pode-se certificar que o mesmo fenômeno ocorre com o aumento da temperatura de bulbo úmido de entrada (T_{bu_e}). Verifica-se, para os três tipos de painéis, que a eficiência de resfriamento evaporativo (η) ficou em torno de 45% a 85%, e seu aumento ocorre em função do aumento da temperatura de bulbo úmido de entrada (T_{bu_e}), que ficou em torno de 18 °C a 22 °C.

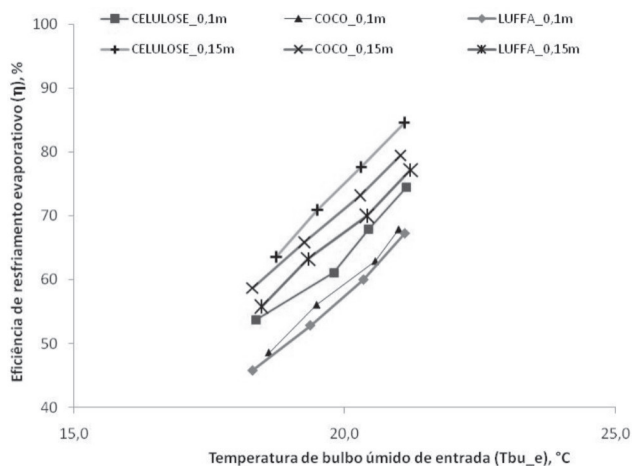


Figura 6: Eficiência de resfriamento evaporativo (η) dos painéis de contato ar-água do experimento com 0,1 m e 0,15 m de espessura *versus* temperatura de bulbo úmido de entrada (T_{bu_e}).

Analisando a Figura 7, verifica-se que o aumento da umidade relativa de entrada (UR_e) provoca uma redução na eficiência de resfriamento evaporativo (η). Verifica-se, para os três tipos de painéis, que a eficiência de resfriamento evaporativo (η) ficou em torno de 45% a 85%, e seu aumento ocorre em função do aumento da umidade relativa de entrada (UR_e), que ficou em torno de 24% a 31%.

Na Figura 8, verifica-se que um aumento no valor da redução de temperatura de bulbo seco, correspondente à temperatura de bulbo seco de entrada menos a de saída, provoca um acréscimo da eficiência de resfriamento evaporativo (η). Observa-se, para os três tipos de painéis, que a eficiência de resfriamento evaporativo (η) ficou em torno de 45% a 85%, e seu aumento é uma função do aumento da redução de temperatura de bulbo seco, que teve valores entre 5°C e 14 °C.

Na Figura 9, constata-se que quanto maior a quantidade de água evaporada, maior é a eficiência de resfriamento evaporativo (η) para os três tipos de painéis, em que a eficiência de resfriamento evaporativo teve valores em torno de 45% a 85% e a quantidade de água evaporada teve valores em torno de 915 a 2086 ml/h. A quantidade de água evaporada é um pouco maior no painel evaporativo de celulose rígida corrugada, obtendo, assim, melhor resultado na eficiência de resfriamento evaporativo (η). Há que considerar ainda que a evaporação de água em todos os painéis é menor devido à baixa velocidade do ar adotada no experimento (em torno de 0,5 a 1,2 m/s), pois a parcela de água evaporada é encontrada com a multiplicação da variação da umidade específica ($\Delta w = w_{\text{saída}} - w_{\text{entrada}}$) pela vazão mássica de ar (m_{ar}).

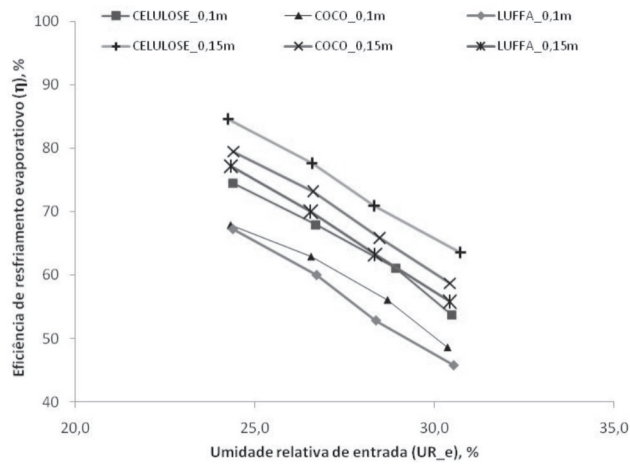


Figura 7: Eficiência de resfriamento evaporativo (η) dos painéis de contato ar-água do experimento com 0,1 m e 0,15 m de espessura *versus* umidade relativa de entrada (UR_e).

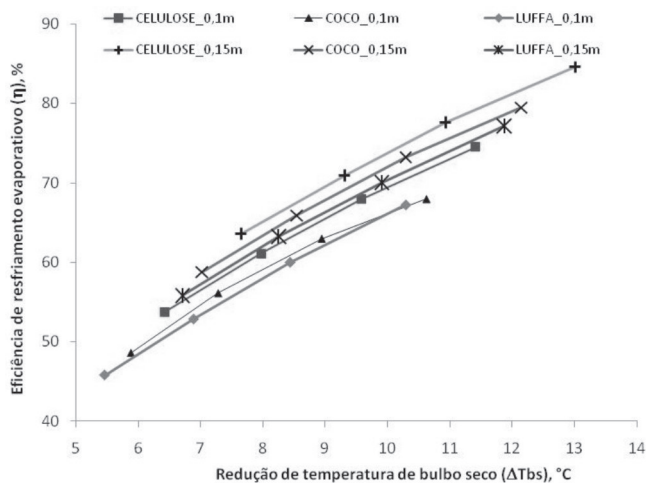


Figura 8: Eficiência de resfriamento evaporativo (η) dos painéis de contato ar-água do experimento com 0,1 m e 0,15 m de espessura *versus* redução de temperatura de bulbo seco (ΔT_{bs}).

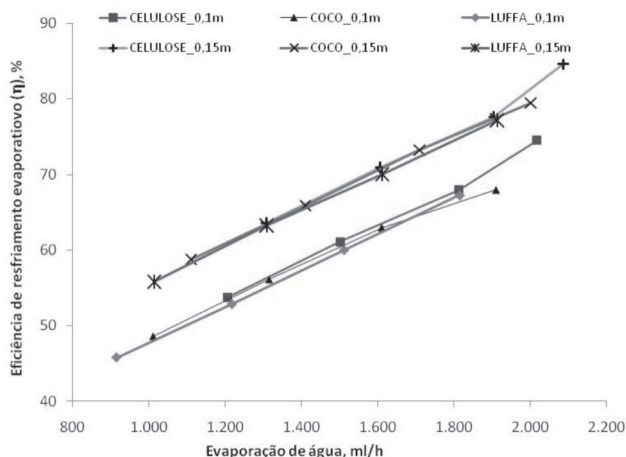


Figura 9: Eficiência de resfriamento evaporativo (η) dos painéis de contato ar-água do experimento com 0,1 m e 0,15 m de espessura *versus* evaporação de água.

É importante ainda ressaltar que a umidade específica do ar externo não tem grandes alterações ao longo do dia, a não ser que haja chuva ou estiver próximo de alguma fonte de água. Assim, observa-se que, para um determinado valor de umidade específica de entrada, aumentando-se a temperatura de bulbo seco do ar de entrada, maiores quedas de temperatura de bulbo seco são obtidas no fluxo de ar. Isso acontece porque, para uma temperatura de bulbo seco de entrada maior, fixando-se a umidade específica, obtêm-se umidades relativas menores. Quando a umidade relativa do ar de entrada é menor, tem-se um aumento na diferença da pressão parcial do vapor de água entre o ar e a superfície úmida, favorecendo a transferência de massa entre a água e o ar. Assim, uma maior quantidade de calor sensível do ar é necessária para evaporação da água, resultando em maiores quedas de temperatura de bulbo seco do ar.

4 Conclusão

Diante dos resultados obtidos, pode-se afirmar que a eficiência de resfriamento é maior com o aumento da temperatura de bulbo seco de entrada, da temperatura de bulbo úmido de entrada, da redução de temperatura de bulbo seco e evaporação de água. E quanto menor a velocidade e a umidade relativa do ar de entrada, melhor. Outro fator que deve ser levado em consideração é a área superficial de contato ar-água, pois quanto maior ela for, maior será a transferência de calor e massa.

A eficiência de resfriamento evaporativo para todos os painéis com espessura de 0,15 m foi maior que aquela observada para todos os painéis com 0,1 m de espessura. Na situação em que a temperatura de bulbo seco de entrada do ar foi de 36 °C para o painel de celulose rígida corrugada com 0,15 m de espessura, registrou-se uma diminuição de temperatura de bulbo seco do ar de 13,01 °C, enquanto na situação em que a temperatura de bulbo seco de entrada foi de 30 °C, a queda de temperatura de bulbo seco foi de 7,65 °C.

A eficiência de resfriamento evaporativo para os painéis de fibras vegetais de coco e *luffa* revelaram uma pequena diferença favorável para a fibra de coco, isto é, para a melhor condição de teste, a fibra de coco obteve 79,51%, com uma redução de temperatura de bulbo seco de 12,14 °C; a fibra de *luffa* obteve 77,2%, com uma redução de temperatura de bulbo seco de 11,87 °C. Pode-se afirmar que os dois materiais obtiveram resultado de eficiência de resfriamento praticamente igual, visto que o valor é considerado uma média e a temperatura de bulbo seco e a umidade relativa do ar de entrada variaram pouco.

Além disso, a área superficial de contato ar-água da fibra de *luffa* é um pouco menor, correspondendo a 4,08 m², e a fibra de coco correspondendo a 4,284 m². O painel de fibra de coco possui melhor eficiência de resfriamento evaporativo, entretanto, é importante salientar que suas fibras são presas com uma resina à base de látex, alterando suas propriedades e fazendo com que parte delas seja perdida. Isso pode alterar a eficiência de resfriamento com o passar do tempo e diminuir sua durabilidade. Já a manta de *luffa* possui as fibras presas naturalmente, assim, seu rendimento não se altera com o passar do tempo.

Analisando o resultado do painel de fibra de coco, que mostrou ter melhor eficiência entre as duas fibras vegetais, e o painel de celulose rígida corrugada, pode-se certificar um valor de 84,6% de eficiência de resfriamento evaporativo, com uma redução de temperatura de 13,01 °C para o melhor resultado do material colocado como referência. Este não ficou distante do valor de 79,5% correspondente à fibra de coco para uma redução de temperatura de bulbo seco de 12,14 °C. Assim, entre as duas fibras vegetais, a de *luffa* se torna mais promissora para aplicação em resfriamento evaporativo, a não ser que algum tipo de processo industrial consiga fixar as fibras de coco.

Diante dos dados obtidos no trabalho experimental, fica evidente que as fibras vegetais possuem um grande potencial de aproveitamento como painel em sistema de resfriamento evaporativo do tipo direto, e devem ser mais bem aproveitadas pelas empresas fabricantes desses aparelhos. Vale frisar, ainda, que os painéis de contato ar-água são mais eficientes quando operam em regiões de clima quente e seco, proporcionando temperaturas de bulbo seco do ar mais baixas nessas situações.

Agradecimentos

À coordenação da CAPES pela bolsa de estudo no Brasil que possibilitou minha presença integral na cidade do Recife para executar as atividades do Doutorado em Engenharia Mecânica (área de Energia) no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da UFPE.

Referências

- ALODAN, M. A.; AL-FARAJ, A. A. Design and evaluation of galvanized metal sheets as evaporative cooling pads. *Agricultural Science*, Saudi Arabia, v. 18, n. 1, p. 9-18. Aug./Feb. 2005.
- AL-SULAIMAN, F. Evaluation of the performance of local fibers in evaporative cooling. *Energy Conversion and Management*, Dhahran, v. 43, n. 16, p. 2267-2273, Feb./June 2002.
- ASHRAE Standard 133: method of testing direct evaporative air coolers. Houston: American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers, 2008. v. 133. 20 p.
- AZEVEDO NETO, J. M. *Manual de hidráulica*. 8. ed. São Paulo: Edgard Blücher, 1998. 670 p.
- CACHUTÉ, L. O. et al. Metodologia para determinação qualitativa da queda de pressão em painel evaporativo utilizado em unidade de resfriamento evaporativo direto através do código CFX. In: SIMPÓSIO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA, 16., Uberlândia, 2006. *Anais...* Uberlândia: Universidade Federal de Uberlândia, 2006. 1-9.
- CAMARGO, J. R. *Resfriamento evaporativo: climatização ecológica*. São Paulo: Ciência Moderna, 2009. 192 p.
- INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. *ISO 5801: performance testing using standardized airways*. Switzerland, 2007.
- LIAO, C. M.; CHIU, K. H. Wind tunnel modeling the system performance of alternative evaporative cooling pads in Taiwan region. *Building and Environment*, Taiwan, n. 37, p. 177-187, Mar./Sept. 2000.
- PAZ, A. B. R. *Tratamento químico da água para a redução dos riscos associados à legionella em sistemas de resfriamento recirculante*. 2005. 134 f. Trabalho de conclusão de Curso em Engenharia Mecânica (Graduação)-Faculdade de Engenharia Mecânica, Universidade Estadual do Maranhão, São Luís, 2005.
- 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. Dec./June 2008.
- ROSA, J. F. V. *Avaliação de painéis porosos constituídos de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo*. 2009. 82 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, MG, 2009.
- SILVA, C. E. *Comparação de painéis evaporativos de argila expandida e celulose para sistemas de resfriamento evaporativo adiabático do ar em galpões avícolas com pressão negativa em modo túnel*. 2002. 67 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola)-Universidade Federal de Viçosa, MG, 2002.
- STROBEL, B. R. et al. Evaporative cooling pads: used in lowering indoor air temperature. Ohio State University Fact Sheet. *Food, Agricultural and Biological Engineering*, Columbus, p. 99-127. Disponível em: <ohionline.osu.edu/aex-fact/0127.html>. Acesso em: 20 ago. 2011.

Eficiência de painéis de fibras vegetais utilizados para sistemas de resfriamento evaporativo direto: um estudo experimental

VIGODERIS, R. B. et al. Construção de túnel de vento reduzido, visando à avaliação de argila expandida em sistemas de resfriamento adiabático evaporativo para arrefecimento térmico em galpões de produção animal. *Revista Engenharia na Agricultura*, Viçosa, MG, v. 15, n. 3, p. 191-199, jul./set. 2007.