

# Investigação experimental em escala reduzida sobre o uso de telhas cerâmicas como sistema de resfriamento evaporativo

Marcelo Paes de Barros

marcelo.paes@fisica.ufmt.br. Universidade Federal de Mato Grosso (UFMT) – Instituto de Física

## RESUMO

O presente artigo descreve um experimento que esclarece os efeitos de resfriamento do sistema construído. Testado no ambiente de Cuiabá-MT, o desempenho do sistema que trabalha com o princípio de resfriamento evaporativo, feito para este estudo usando telhas de barro, foi verificado em termos de queda de temperatura e aumento de umidade do ar que passa pelo sistema para o entorno. O resultado mostrou que o efeito de resfriamento atingiu um máximo de 3,5 °C e aumentou a umidade relativa do ar de entrada em torno de 10%. A experiência de escala reduzida atingiu a temperatura e a umidade adequadas para o condicionamento do ar em condições de conforto ambiental humano do espaço, em condições climáticas quentes e secas, em 86,4% dos períodos de medição. O uso de cerâmicas porosas como sistema de resfriamento evaporativo oferece a vantagem da integração em elementos de construção.

**Palavras-chave:** Conforto ambiental. Transferência de massa. Transferência de calor.

## ABSTRACT

*The present paper describes an experiment that clarifies the cooling effects of the constructed system. Tested in the Cuiabá, MT, environment, the system's performance, which works on the evaporative cooling principle made for this study using clay roof tiles was checked in terms of temperature drop and humidity rise air which passes through the system to the surroundings. The result showed that the cooling effect reached a maximum of 3.5 °C and increased the relative humidity of incoming air around 10%. The reduced-scale experiment has reached the appropriate temperature and humidity for air conditioning under human environmental comfort conditions in hot and dry climatic conditions, in 86.4% of the measurement periods. The use of porous ceramics as an evaporative cooling system offers the advantage of the integration into building elements.*

**Keywords:** *Environmental comfort. Mass Transfer. Heat Transfer.*

## 1 Introdução

Entre 2011 e 2013 o consumo de energia elétrica das residências brasileiras subiu 11,5%, contra um recuo, no mesmo período, de 3% do consumo no setor industrial. Apontada como responsável por esse incremento, a popularização do ar-condicionado também causou um deslocamento do pico de consumo; a demanda máxima, que antes ocorria no início da noite, agora ocorre no meio da tarde, momento de temperaturas mais elevadas, requerendo a utilização dos aparelhos de ar condicionado (COSTA; CARRERA, 2015).

O sistema de compressão comercialmente utilizado para fins de arrefecimento do ar, com princípio de funcionamento mais complexo, utilização de refrigerantes não degradáveis e baixo desempenho em clima quente, é responsável pelo consumo de grandes quantidades de energia elétrica (NATICCHIA *et al.*, 2010). Contrapondo, sistemas para arrefecimento do ar com princípio no resfriamento evaporativo, utilizando o processo natural de evaporação da água, pode reduzir o impacto ambiental e o consumo de energia envolvidos nesta atividade (AIMIUWU, 1992).

De acordo com a Sociedade Americana de Engenharia de Aquecimento, Refrigeração e Ar Condicionado (ASHRAE, 2008), a tecnologia de fabricação simples, adequada aos países em desenvolvimento, a economia substancial de energia e de custos e a melhoria da qualidade do ar interior quando uma ventilação mais elevada é adotada são os principais benefícios dos Sistemas de Arrefecimento por Evaporação (*Evaporative Cooling Systems* – ECS).

No contexto do resfriamento evaporativo, este artigo apresenta os resultados de um projeto de pesquisa, desenvolvido no Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso, financiado pela Pró-Reitoria de Pesquisa (PROPEQ/UFMT), que teve por objetivo avaliar a eficiência de um sistema de resfriamento evaporativo para condicionar o ar ambiente a uma situação de conforto ambiental, utilizando a cerâmica de argila queimada como meio poroso, em função dos fatores climáticos locais e das características do sistema.

## 2 Referencial teórico

O resfriamento evaporativo é um fenômeno físico no qual um corpo ou um objeto é arrefecido pela evaporação da água, tipicamente no ar circundante, de sua superfície. O calor latente necessário para

evaporar o líquido provém do próprio líquido, do ar e das superfícies circunvizinhas.

Como apenas a energia ambiente é utilizada para a evaporação da água, o resfriamento evaporativo é um método muito promissor, especialmente em localidades com condições meteorológicas quentes e secas (MITTAL *et al.*, 2006), técnica utilizada há vários anos no Oriente Médio e na África (DATE, 2012).

O processo de secagem, resultado da evaporação da água, é governado pelas equações de transferências de calor (TC) e de massa (TM) (PARK *et al.*, 2014). No caso da TC, a Equação Diferencial Geral tem a forma:

$$\frac{\partial(\rho\varphi)}{\partial t} + \nabla(\rho \vec{v} \varphi) = \nabla \vec{q}_\varphi + \sigma_{v\varphi} \quad (1)$$

Em que:

$\rho$  → densidade;

$t$  → tempo;

$\vec{v}$  → velocidade;

$\nabla$  → divergente ou gradiente;

$\sigma_{v\varphi}$  → geração de calor associada à dissipação viscosa, efeito Joule etc.

Sendo, pela 1ª Lei de Fourier, com calor específico (c), temperatura (T) e condutividade térmica (k),

$$\vec{q}_\varphi = k\nabla T \quad (2)$$

e

$$\varphi = cT \quad (3)$$

Do ponto de vista da TM, com destaque para a difusão que ocorre no interior do corpo que seca, a Equação Diferencial de Transferência de Massa tem a forma:

$$\nabla \vec{N}_A + \frac{\partial c_A}{\partial t} - R_A = 0 \quad (4)$$

Em que:

$N_A$  → fluxo molar do componente A;

$C_A$  → concentração molar do componente A;

$t$  → tempo;

$\nabla$  → divergente ou gradiente;

$R_A$  → geração.

Em meios porosos, os primeiros trabalhos sobre a aplicação do formalismo da termodinâmica de não equilíbrio às transferências simultâneas de calor e de massa, durante o processo de secagem, foram realizados na década de 1960 (LUIKOV; MIKHAYLOV,

1965). O processo de transferência do calor ocorre sob o efeito da diferença de temperatura existente entre o meio poroso e o ar. Simultaneamente, a diferença de pressão parcial de vapor d'água existente entre o ar e a superfície do meio poroso determina uma transferência de massa, na forma de vapor de água, para o ar (PARK *et al.*, 2014).

Um meio poroso (porous media) consiste em uma matriz sólida e espaços vazios, ambos interligados. A transferência de calor e massa associada em meios porosos tem sido de grande interesse para cientistas e engenheiros há séculos devido às suas amplas aplicações em materiais, mecânica, química, engenharia biomédica e civil (HSU, 2005).

Em experiências de estado estacionário, utilizando um pequeno vaso de argila como meio poroso, realizadas a uma temperatura ambiente de 23,0 °C, em Calcutá, Índia, o efeito de arrefecimento aumentou de 4,7 °C para 8,3 °C à medida que a umidade relativa do ambiente diminuiu de 60% para 15%. Os coeficientes externos de transferência de calor e massa, estimados a partir das medidas de estado estacionário, foram utilizados em modelos matemáticos para prever a variação transitória da temperatura observada experimentalmente na água sob mudanças na umidade relativa do ambiente (MITTAL *et al.*, 2006).

Um sistema de resfriamento evaporativo feito de argila cozida, em condições climáticas muito secas da Nigéria, promoveu uma queda de 10,4 °C, em relação à temperatura ambiente, durante 2 h de arrefecimento em ar parado, e de 15,0 °C quando submetido à ventilação (AIMIUWU, 1992).

Com relação à ventilação, os sistemas de resfriamento evaporativo diretos são divididos em dois tipos básicos: ativos e passivos. Um sistema de resfriamento evaporativo ativo utiliza ventiladores para conduzir o ar ambiente, através do meio poroso, para dentro do sistema (NDUKWU, 2013). Um sistema de resfriamento evaporativo passivo não usa sistemas separados como ventiladores para dirigir o ar, ele usa a circulação natural do ar para conduzir ar frio para dentro do sistema. Sistema passivo é o método mais antigo de resfriamento evaporativo e, às vezes, é referido como resfriamento de energia zero, uma vez que não consome qualquer energia comercial (HE; HOYANO, 2010).

Os sistemas de resfriamento evaporativos têm desempenho melhor à medida que a temperatura aumenta e a umidade diminui. Essa é a principal desvantagem do resfriamento evaporativo: a alta

dependência das condições atmosféricas do ar, uma vez que a diferença entre as temperaturas do ar seco e do bulbo úmido é a sua força motora, limitadora da capacidade de arrefecimento de um sistema (CHAUDHARI, 2015).

A partir dos valores das temperaturas do bulbo úmido e do bulbo de ar seco, o desempenho ( $\beta$ ) dos sistemas de arrefecimento evaporativo pode ser determinado por (HE; HOYANO, 2010):

$$\beta = (T_a - T_o)/(T_a - T_w) \quad (5)$$

Em que:

$T_a$  → Temperatura de bulbo seco do ar;

$T_o$  → Temperatura superficial;

$T_w$  → Temperatura de bulbo úmido do ar.

O resfriamento evaporativo direto não é aplicável em uma área úmida e quente. Em condições de alta umidade relativa, como na cidade de Cabedelo-PB, foram estudados e testados alguns materiais sintéticos, vegetais e metálicos, mostrando as possibilidades e as dificuldades de substituir o painel evaporativo comercial. Neste estudo foram registrados, nos diversos ensaios, temperatura de bulbo seco, na saída do equipamento, reduzida por volta de apenas 2 °C (MEDEIROS *et al.*, 2015).

Nesses ambientes, o arrefecimento evaporativo passivo e indireto por evaporação da superfície exterior de um dado elemento do edifício pode reduzir as temperaturas internas radiante e do ar, sem elevar o índice de umidade interno do ar (GIVONI, 2011).

Em Mato Grosso, estado em que as temperaturas máximas absolutas mensais não variam muito ao longo dos meses do ano, podendo chegar a mais de 40 °C com índices de umidade relativa do ar próximos a 15% na estação seca, que tem de 4 a 6 meses de duração, as condições climáticas oferecem um potencial de aplicação de sistemas de resfriamento evaporativo, ativo ou passivo, para o arrefecimento do ar e conseguir economias significativas de energia.

### 3 Material e métodos

#### 3.1 Ambiente de estudo

A pesquisa foi conduzida no laboratório de Mecânica do Instituto de Física, da Universidade Federal de Mato Grosso, localizada em Cuiabá-MT, entre os meses de fevereiro de 2017 e janeiro de 2018. A sala, situada no segundo pavimento de

uma construção de 3 andares, tem janelas voltadas para o nascente e uma porta voltada para o interior da construção, além das seguintes características construtivas: largura de 7,0 m, comprimento de 14,0 m e pé-direito de 3,5 m.

### Caracterização climática

O clima da região classifica-se como Aw, de acordo com a classificação climática de Köeppen, com duas estações bem definidas: seca, no inverno, de maio até setembro, e úmida, no verão, de outubro até o mês de abril, uma característica dos climas tropicais úmidos.

A temperatura média anual varia entre 28 °C e 32 °C, com a ocorrência, durante o período de seca, de períodos de curta duração com temperaturas baixas, geralmente provocados pela influência de massas de ar polares que conseguem atingir o interior do continente e que são responsáveis, também, pelas poucas chuvas que ocorrem neste período. A precipitação média anual é da ordem 1387,8 mm, concentrados na estação chuvosa, enquanto que na estação seca são registrados, em média, apenas 5,6 ocorrências de precipitações (BARROS, 2018). O período seco ainda é caracterizado pela baixa umidade relativa do ar – com um valor médio diário de 60% e mínimo inferior a 30% – e pelas elevadas temperaturas do ar, com máximas diárias acima de 40 °C por dias seguidos (Figura 1).

### Instrumentos de medição

O monitoramento da temperatura (°C) e da umidade relativa do ar (%) foi realizado com a utilização de dois termohigrômetros com data loggers,

idênticos, da marca Testo, modelo 174H. O sensor de umidade opera na faixa de 0% a 100%, com precisão de ± 3% e resolução de 0,1%, enquanto que o sensor de temperatura desse aparelho opera na faixa de temperaturas de -20,0 °C a 70,0 °C, com precisão de ± 0,5 °C, na faixa de operação, e resolução de 0,1 °C.

Os termohigrômetros foram configurados para registrar os valores das temperatura e umidade relativa do ar a cada 1,0 min, durante 180 min, e a extração dos dados foi realizada com o software ComSoft Basic 5 SP5, da Testo.

### 3.2 O sistema de condicionamento

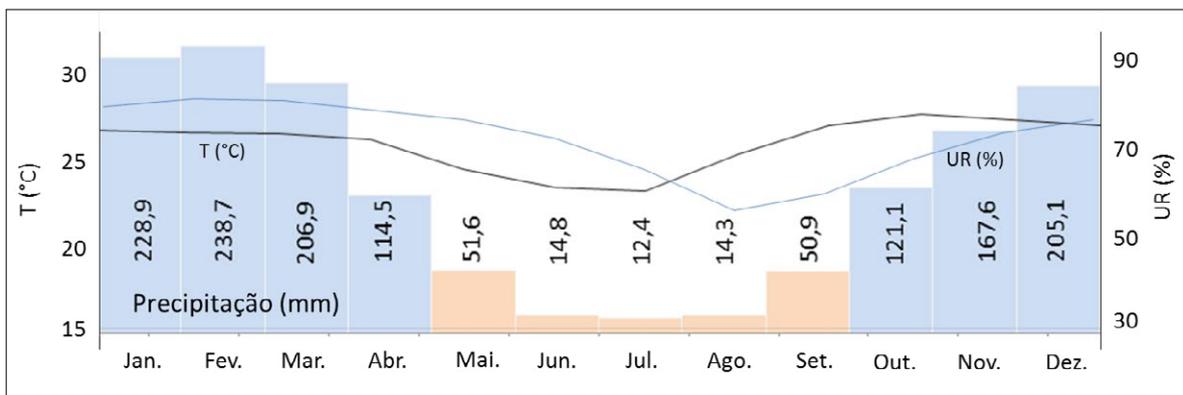
O sistema artesanal utilizado, com princípio no resfriamento evaporativo, foi construído com a junção de duas telhas cerâmicas, justapostas, de forma a constituir um conjunto tubular, por onde passa o ar sob condicionamento. Para adequar a escala do experimento, a ventilação forçada, que move o sistema, foi realizada por um miniventilador de mesa, com entrada USB, de potência 3 W e 15 cm de diâmetro (Figura 2, próxima página).

Foram utilizadas telhas novas, homogêneas, num total de 10, com massas secas variando entre 1477 g e 1628 g e porosidade variando entre 15,6% e 16,8%.

### 3.3 A rotina de medições

As medições foram realizadas em ciclos semanais de 3 dias: segundas, terças e quartas-feiras, sem falhas, durante 12 meses, perfazendo um total de 156 períodos de medições. O primeiro dia de cada ciclo foi destinado às medições matutinas, com início às 8h; o segundo e o terceiro dias foram destinados às

Figura 1 – Precipitação, temperatura e umidade relativa do ar mensal média para Cuiabá-MT, 1961-2017



medições vespertinas, com início às 14 h, e noturnas, com início às 20 h, respectivamente, horários padrões recomendados pela Organização Mundial de Meteorologia (WMO) para as principais observações meteorológicas de um dia típico.

Os conjuntos de telhas cerâmicas permaneciam imersos em água durante 24 h, antes do início das medições, em condição de saturação de água, e foram alternados a cada novo período de medições.

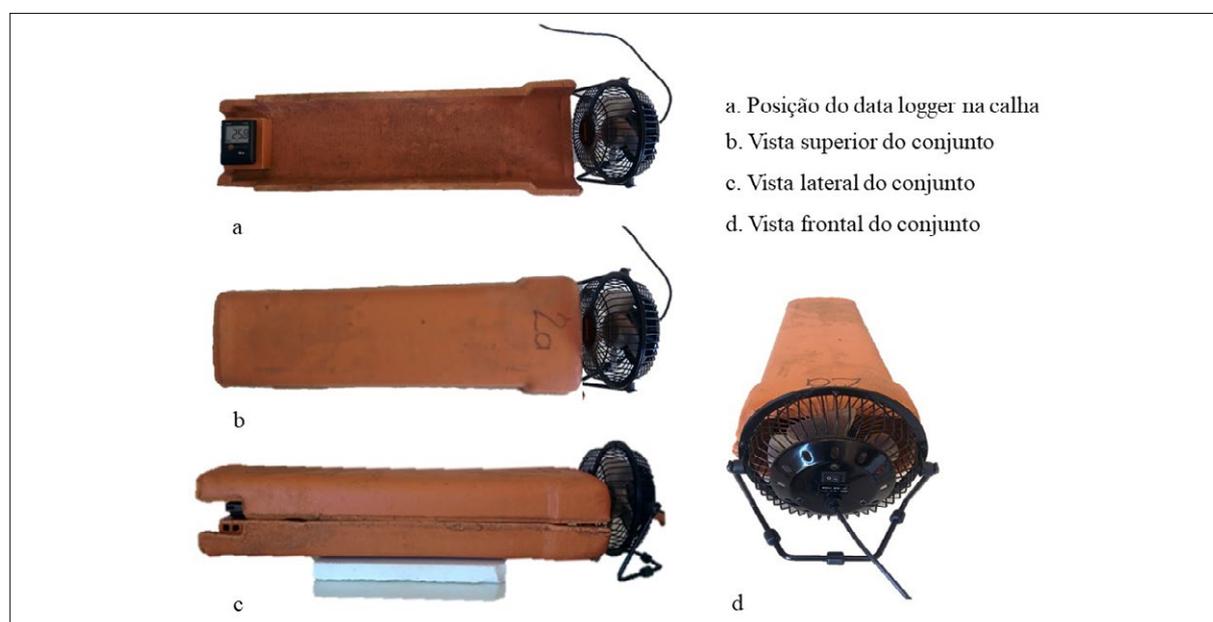
No horário determinado, as telhas eram retiradas da imersão, justapostas, de forma a constituir o conjunto tubular, e colocadas sobre a bancada do laboratório, com o ventilador em uma das extremidades e um termohigrômetro colocado na outra extremidade, para registrar a temperatura e a umidade relativa do ar que deixava o conjunto (Figura 2). O outro termohigrômetro, colocado nas proximidades, registrava as condições higrotérmicas do ambiente.

### 3.4 O tratamento dos registros e a análise dos dados

As variáveis descritas acima foram registradas durante 180 min, após iniciado os experimentos, no entanto o tratamento e a análise foi realizada com os registros realizados durante os primeiros 90 min. Uma análise exploratória inicial indicou que, em algumas situações, após 2 h de iniciado o experimento, as telhas já perderam grande parte da água armazenada e os efeitos de refrigeração eram reduzidos.

A temperatura ( $t_{ctrl}$ ) e a umidade relativa ( $UR_{ctrl}$ ) do ar, registradas no ambiente, foram as variáveis de controle para avaliar o desempenho do sistema, em função da temperatura ( $t$ ) e da umidade relativa ( $UR$ ) do ar sob condicionamento que deixava o sistema quando em operação.

**Figura 2** – Sistema de resfriamento evaporativo experimental

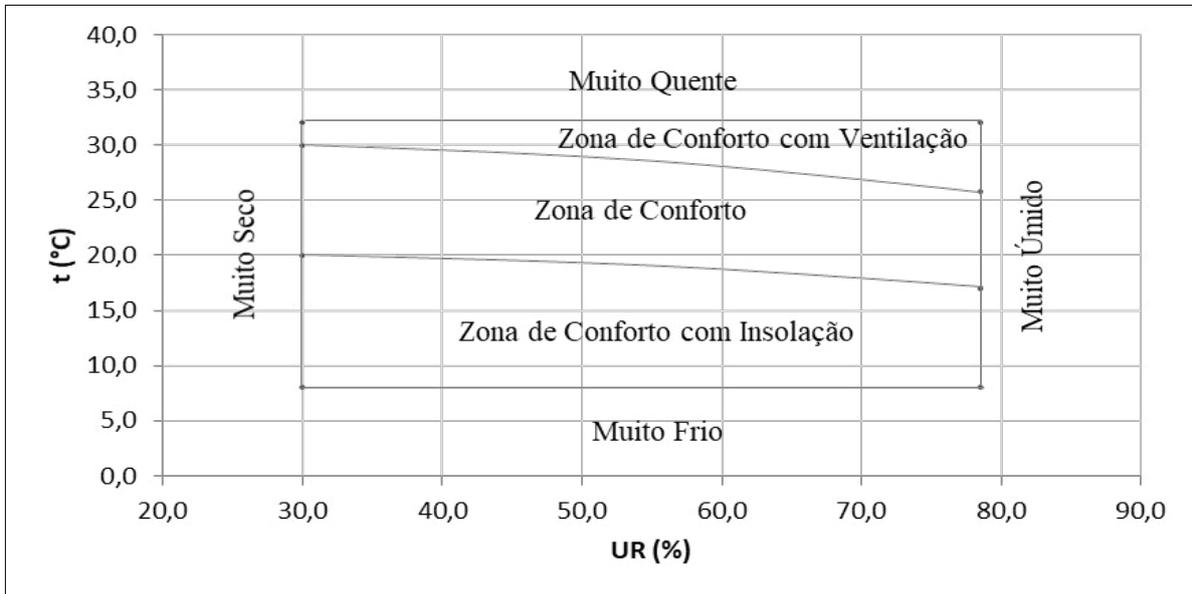


Fonte: Elaborada pelo autorFonte: Adaptado de INMET (2017)

A análise foi realizada em função do arrefecimento produzido, obtido pela diferença entre as  $t_{ctrl}$  e  $t$ , expressa por  $\Delta t$ , em termos de arrefecimento médio ao longo dos 90 min, e por  $\Delta t_{max}$ , em termos de arrefecimento máximo, dado pela maior variação obtida entre  $t_{ctrl}$  e  $t$  ao longo de cada período de medição. Da mesma forma, foi realizada a análise para o ganho de umidade do ar.

Com relação à avaliação das condições de conforto ambiental que podem ser propiciadas pelo ar que deixa o conjunto, foi utilizado um diagrama do conforto humano (Figura 3, próxima página), produzido pela *World Meteorological Organization* (WMO), que abrange, em função da temperatura e umidade relativa do ar, situações de conforto para a maioria das pessoas.

Figura 3 – Diagrama de conforto ambiental humano



Fonte: Elaborada pelo autor

## 4 Resultados e discussão

### 4.1 A tendência do arrefecimento

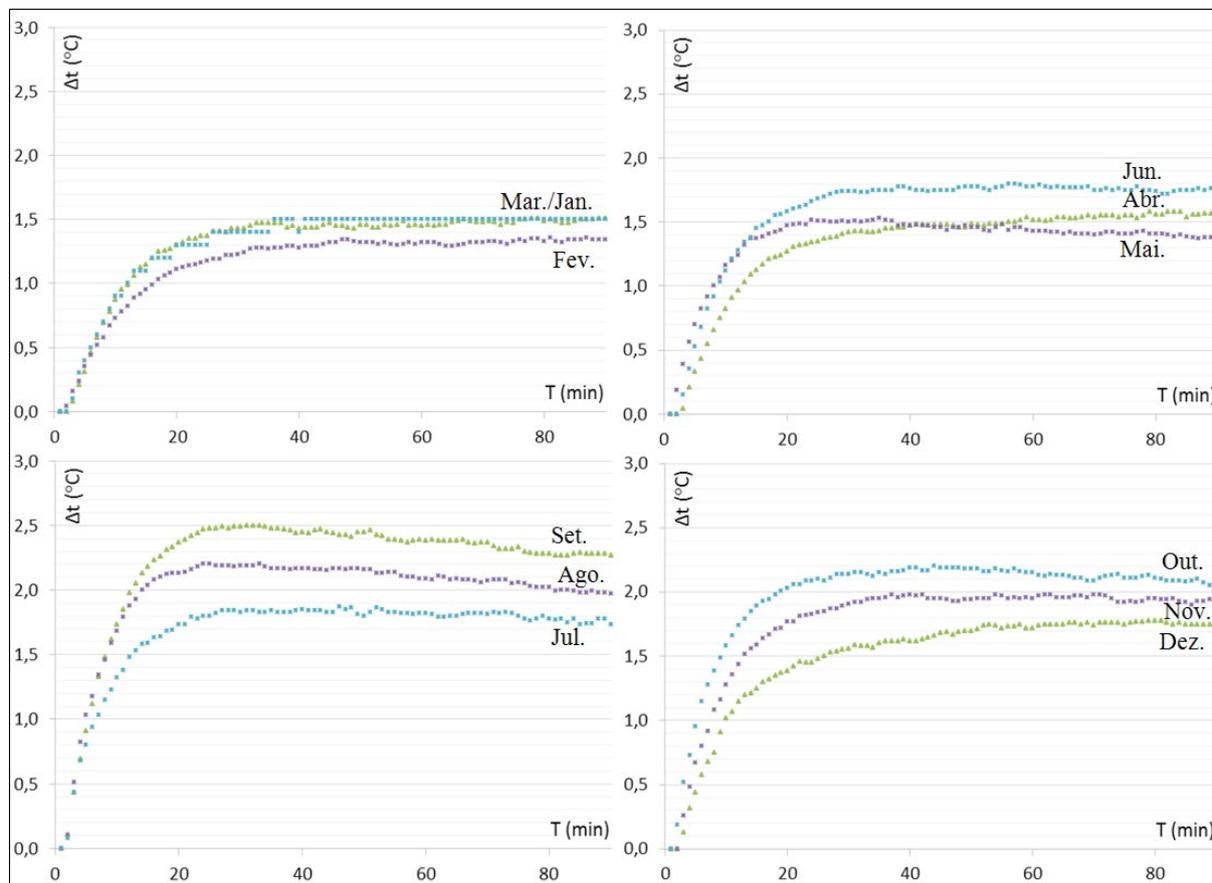
A curva de arrefecimento do ar sob condicionamento, em todos os períodos de medição, foi similar à curva da variação do teor de água de um produto poroso durante a secagem observada em Park et al. (2014). A evolução do processo de arrefecimento, conforme as curvas apresentadas na Figura 4 (próxima página), permite distinguir a existência de 3 fases distintas, conforme a predominância dos fenômenos físicos envolvidos.

Na fase I ocorre a redução gradual da temperatura do ar que deixa o conjunto cerâmico, até entrar em regime operacional. Nesta fase, a transferência de calor é máxima e acarreta uma elevação gradual da temperatura das cerâmicas até que a transferência de massa, que umidifica o ar, compense a transferência de calor. Com uma quantidade de água disponível nas cerâmicas suficiente para que a migração de água do interior acompanhe a perda por evaporação na superfície, na fase II a temperatura do ar permanece constante e igual à temperatura de bulbo úmido. Na fase III, em função da redução da migração da água interna para a superfície, a taxa de secagem decresce, de forma que a transferência de massa deixa de compensar a transferência de calor, ocasionando a elevação da temperatura da cerâmica e do ar

que deixa o conjunto até entrar em equilíbrio com o ambiente. Portanto, a taxa de variação do arrefecimento ocorrido na fase I, o nível do patamar em que acontece a fase II e o ponto de inflexão que origina a fase III variaram muito em função das condições climáticas em que ocorreram os experimentos. A análise dos dados permitiu identificar desempenhos equivalentes para o arrefecimento do ar nos meses de janeiro a maio, em função dos valores elevados da umidade relativa do ar, nos meses de janeiro a abril, e das menores temperaturas registradas em maio. Essas características resultaram em, comparativamente aos demais meses do ano, uma duração maior da fase I, entre 35 e 40 min, em média, e um resfriamento menor do ar sob condicionamento, entre 1,4 °C e 1,6 °C, em média. Nessas condições ambientais, a fase II se estende para além dos 90 min estabelecidos, não apresentando a fase III devido à disponibilidade de água nas cerâmicas para manter o processo.

Esse padrão é condizente com o alcançado em experimento comparativo entre as umidades relativas de dois quartos, um com e outro sem umidificação, quando o ganho de umidade do ambiente experimental, após alcançar o patamar, permanece constante até o final do experimento. Nesse experimento em escala real, mesmo não tendo restrição de água, foram necessários 240 min para produzir um ganho máximo de 16%, ao atingir uma umidade relativa de 51% no quarto umidificado (MITTAL et al., 2006).

**Figura 4** – Evolução do arrefecimento do ar sob condicionamento, média mensal



Fonte: Elaborada pelo autor

A terceira fase também não foi observada nas condições ambientais dos meses de transição, junho e dezembro, quando foi atingido um patamar médio de 1,9 °C, após 26 min de iniciados os experimentos. No entanto, nos meses de julho a novembro, a temperatura elevada e a reduzida umidade relativa do ar, condições ideais para o estabelecimento do processo de resfriamento evaporativo, foram estabelecidos os maiores valores de arrefecimento do ar, entre 1,9 °C e 2,5 °C, em média, após 21 min do início dos experimentos, quando, quase que imediatamente, tem início a fase III de redução gradual desse arrefecimento.

#### 4.2 A elevação da umidade relativa do ar

A transferência de massa ocorrida no processo umidifica o ar que atravessa o conjunto cerâmico. Esse ganho de umidade variou muito durante todos os experimentos, entre os horários e ao longo do ano, não sendo possível estabelecer um padrão do fenômeno. As elevações médias por horário de medição são apresentadas na Tabela 1.

**Tabela 1** – Elevação média da umidade relativa do ar

	Manhã	Tarde	Noite
Ganho de Umidade (%)	6,5	6,9	8,5

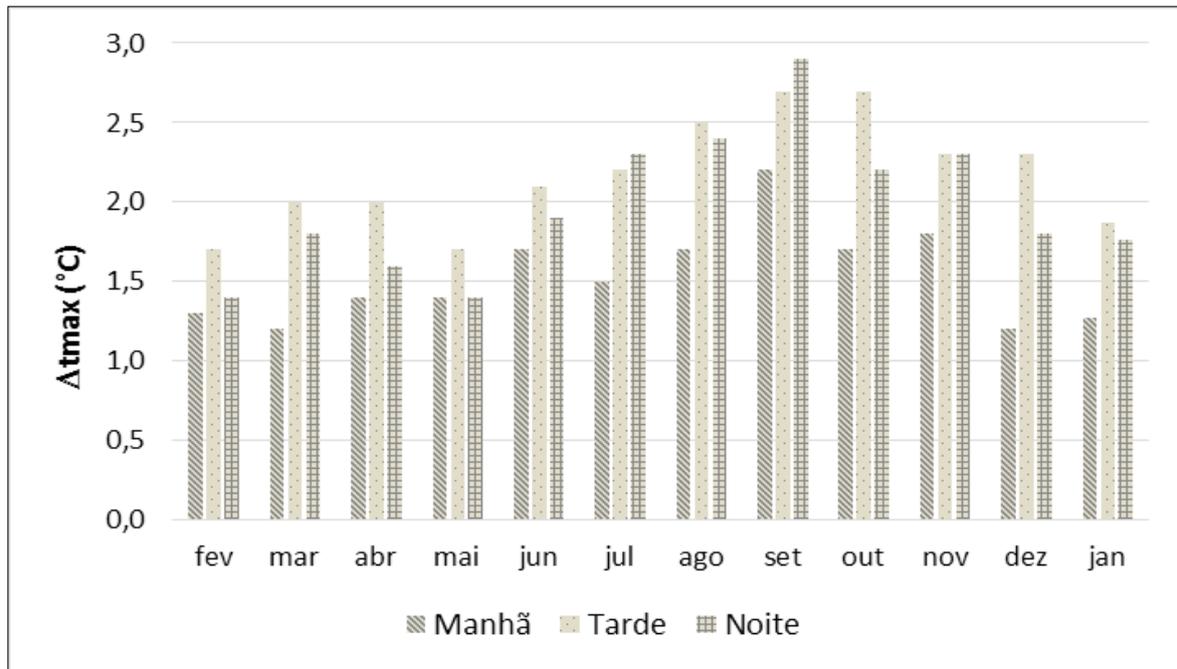
Fonte: Elaborada pelo autor

A análise individual de cada período de medição, como forma de conhecer o limite superior do sistema, permitiu identificar um ganho máximo de umidade, da ordem de 12,0%, em uma tarde de novembro, com condições de temperatura e umidade da ordem de 30,4 °C e 68,0%, respectivamente.

#### 4.3 O arrefecimento máximo

No gráfico das médias do arrefecimento máximo produzido nos experimentos realizados em cada mês, nos 3 horários padronizados (Figura 5, próxima página), também foi possível distinguir os diferentes desempenhos em cada época do ano, a chuvosa seguida de temperatura moderada, a transição e a seca e quente.

Figura 5 – Arrefecimento máximo, em média, em cada mês e horário de medição



Fonte: Elaborada pelo autor

Com relação aos horários, os melhores desempenhos ocorreram, na maior parte do ano, no período vespertino, sendo que apenas em 3 meses os maiores valores do arrefecimento foram produzidos no período noturno, indicando uma forte inércia térmica do ambiente em manter as condições ambientais extremas, atingidas por volta das 16 h até por volta das 22 h, uma condição comum no estudo do Clima Urbano. No período matutino, a associação da baixa temperatura e da elevada umidade do ar, relativas às horas iniciais da manhã, não favoreceram o resfriamento evaporativo, que justifica o reduzido efeito de arrefecimento em relação aos outros horários.

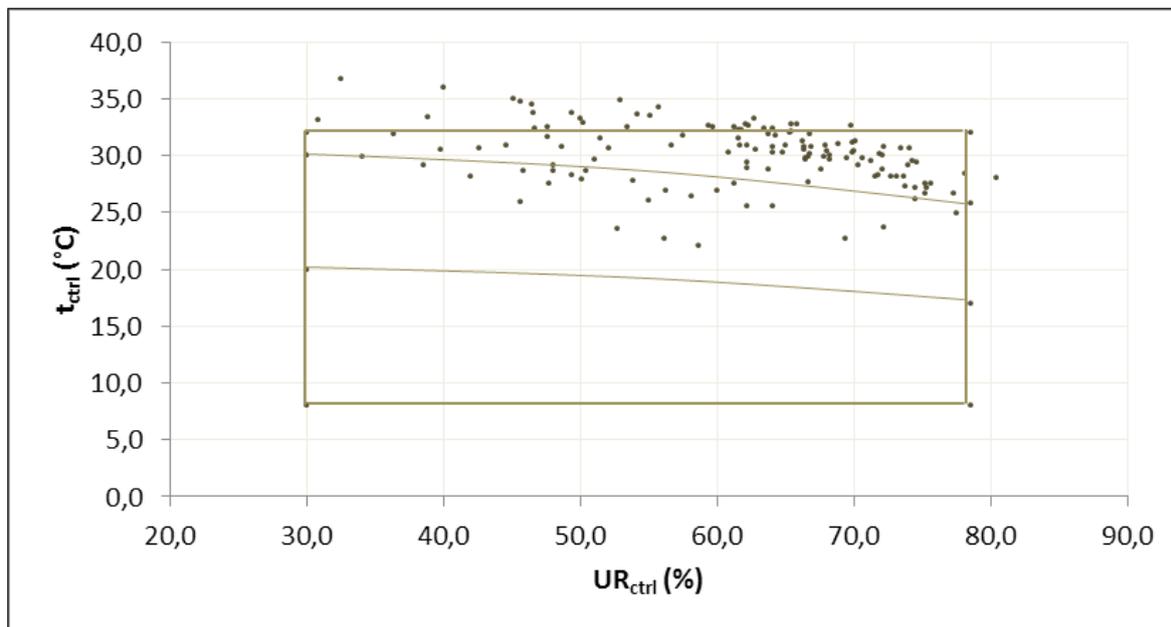
Esses valores estão na mesma ordem de grandeza de valores da literatura, como os do estudo com sistema passivo de resfriamento, o teto-reservatório, que mostrou sua efetividade para as condições meteorológicas relativas ao final da primavera e início da estação de verão, em Curitiba, ao atingir a diferença máxima diária, em média, de 7,3 °C (KRÜGER *et al.*, 2016). No entanto, em climas quentes e secos, como do semiárido brasileiro, estima-se uma redução de temperatura variando entre 2 °C e 10 °C, além de uma significativa elevação da umidade relativa do ar (BATISTA; LAMBERTS, 2007).

#### 4.4 As condições de conforto ambiental

As condições ambientais registradas durante a realização dos experimentos indicaram que na maioria dos períodos de medições (58,3%) o ambiente estava na faixa de conforto necessitando de ventilação. Apenas em 16,7% dos períodos, o ambiente estava na faixa de conforto, valor inferior à quantidade de situações em que o ambiente se apresentava muito quente (24,2%). Em apenas uma situação, registrada em fevereiro de 2017, o ambiente estava na faixa caracterizada como muito úmido (Figura 6, próxima página).

Esses resultados apontam para, conforme Barros (2018), um ambiente de clima rigoroso, muito quente e seco em grande parte do ano. Assim, ao submeter um dado volume de ar, nessas condições higrotérmicas, ao sistema de arrefecimento, a transferência de massa tende a deixá-lo mais úmido, enquanto que a transferência de calor deve reduzir a sua temperatura, de forma que os pontos que indicam a situação de conforto de cada período de medição no diagrama de conforto ambiental humano tendem a se deslocar para baixo, no sentido das menores temperaturas, e para direita, no sentido das maiores umidades.

Figura 6 – Condições ambientais nos períodos de medições



Fonte: Elaborada pelo autor

Essa tendência foi apontada em uma investigação experimental com evaporadores de cerâmica porosa, quando foram registradas quedas de temperatura de bulbo seco de 6 a 8 °C, com um aumento de 30% na umidade relativa do ar de entrada, efeito reforçado por uma alta porosidade do evaporador e pela maior pressão de fornecimento de água (IBRAHIM; SHAO; RIFFAT, 2003).

No presente estudo, a tendência foi quantificada com um aumento para 64,4% das situações em que as condições do ar que deixou o sistema estavam caracterizadas na faixa de conforto necessitando de ventilação. O resultado sugere que, na maior parte dos períodos de medições em que o ambiente se apresentava muito quente, o ar foi condicionado para a faixa do conforto necessitando de ventilação. No entanto, ainda assim, em 3 situações (2,3%) o ar condicionado continuava na faixa caracterizada como muito quente.

O mesmo deslocamento ocorreu com relação a períodos de medições em que o ambiente se apresentava na faixa de conforto necessitando de ventilação que foram condicionados para a faixa muito úmida, o que provocou um aumento para 11,4% dos períodos em que o ar foi condicionado para esta faixa. Também houve um deslocamento da faixa de conforto necessitando de ventilação para a faixa de ambiente confortável, que representou um ligeiro aumento para

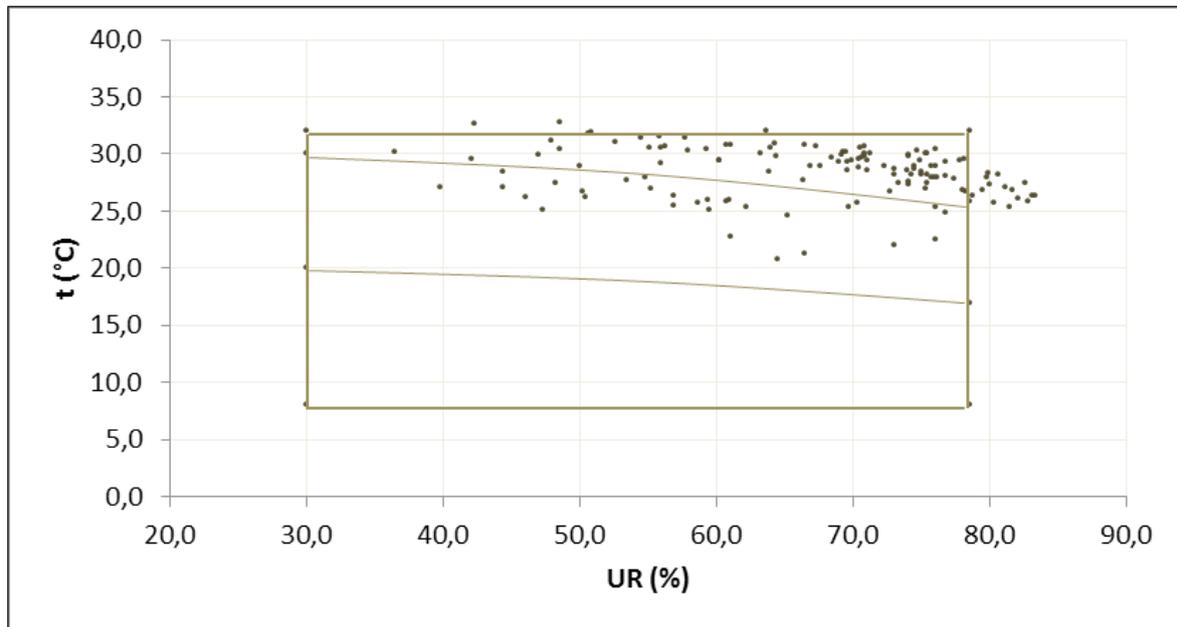
22,0% dos períodos em que o ar condicionado esteve nessa situação (Figura 7, próxima página).

Resultados semelhantes foram encontrados quando utilizado um protótipo de resfriamento evaporativo de água, um pequeno vaso de argila porosa, em Calcutá, Índia, com condições de 35 °C de temperatura e 63% de umidade relativa do ar, quando o efeito de resfriamento alcançou um máximo de 7 °C, deslocando a condição da situação muito quente para a situação de conforto com ventilação (MITTAL *et al.*, 2006).

Considerando que a proposta de sistema de arrefecimento apresentada neste estudo é baseada no resfriamento evaporativo direto ativo, quando ventiladores são utilizados para conduzir o ar ambiente para dentro do sistema, é possível associar os dois percentuais, das faixas de conforto e de conforto com necessidade de ventilação, em uma única situação de conforto ambiental humano, que, devido à utilização do sistema, foi verificada no ar condicionado em 86,4% dos períodos de medições.

Esse percentual pode ser ainda maior se considerarmos que, nas situações em que ocorre o deslocamento da faixa de conforto com necessidade de ventilação para a faixa muito úmida, o fato de não usarmos o sistema de arrefecimento mantém as condições ambientais dentro de uma faixa de conforto, necessitando apenas de ventilação.

Figura 7 – Caracterização nas faixas de conforto do ar condicionado



Fonte: Elaborada pelo autor

Nesse sentido, uma estratégia de refrigeração passiva, utilizando cerâmica porosa com alta capacidade de absorção de água, foi aplicada a uma parede de resfriamento ao ar livre para controlar o aumento da temperatura superficial desta, resultando em ambientes urbanos mais confortáveis durante o verão japonês (HE; HOYANO, 2010).

## 5 Considerações finais

Os resultados mostraram que o padrão de arrefecimento do ar produzido pelo sistema foi semelhante ao padrão de secagem de materiais cerâmicos, de forma que, mantida a disponibilidade de água, pode se garantir a constância e a efetividade do efeito de arrefecimento. O sistema artesanal em escala reduzida apresentado atingiu as temperatura e umidade adequadas para o condicionamento de ar em condições de conforto ambiental humano do espaço, em climas quentes e secos, em 86,4% dos períodos de medições.

O sistema foi mais eficiente nos meses mais secos e quentes, e nas horas mais quentes do dia, no caso, nos horários das 14 h às 20 h. Nessas condições, a capacidade máxima de refrigeração, alcançada a uma temperatura de 34,7 °C e à umidade relativa de 45,6%, foi de 3,5 °C.

Por fim, diante de um contexto sustentável e econômico, o resfriamento evaporativo direto utilizando materiais cerâmicos, comparado aos condicionadores de ar convencionais, pode representar uma alternativa viável para promover o conforto ambiental em residências durante períodos quentes e secos do ano. A aplicação dos resultados para edificações reais, na forma de paredes ou brises, artesanais adaptados ou como elementos cerâmicos planejados para tanto, está prevista como etapa futura da pesquisa.

## REFERÊNCIAS

AIMIUWU, V. O. Evaporative Cooling of Water in Hot Arid Regions. *Energy Conversion and Management*, v. 33, n. 1, p. 69-74, 1992. DOI: [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(92\)90148-P](https://doi.org/10.1016/0196-8904(92)90148-P). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/019689049290148P>. Acesso em: 11 jul. 2018.

AMERICAN SOCIETY OF HEATING, REFRIGERATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS – ASHRAE. *ASHRAE Handbook - HVAC System and Equipment*. Atlanta: ASHRAE, 2008. Disponível em: <https://shop.iccsafe.org/media/wysiwyg/material/8950P204-toc.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2018.

BARROS, M. P. Identifying the Popular References of Rainfall Prediction in Observed Precipitation

Trends in The Brazilian Savanna. *International Journal of Recent Scientific Research*, v. 9, n. 4, p. 26425-26431, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.24327/ijrsr.2018.0904.2056>. Disponível em: <http://www.recentscientific.com/identifying-popular-references-rainfall-prediction-observed-precipitation-trends-brazilian-savanna?page=1>. Acesso em: 10 abr. 2018.

BATISTA, J.; LAMBERTS, R. Estimativas de Redução da Temperatura do Ar: uso do resfriamento evaporativo direto no semi-árido alagoano. In: ENCONTRO NACIONAL DE CONFORTO NO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 9., 2007, Ouro Preto. Anais [...]. Ouro Preto: ANTAC, 2007.

CHAUDHARI, B. D.; SONAWANE, T. R.; PATIL, S. M.; DUBE, A. A Review on Evaporative Cooling Technology. *International Journal of Research in Advent Technology*, v. 3, n. 2, p. 88-96, 2015. Disponível em: <http://www.ijrat.org/downloads/Vol-3/feb-2015/paper%20ID-32201530>. Acesso em: 18 jun. 2018.

COSTA, A. C.; CARRERA, M. Ar-condicionado Vira Novo Vilão para Consumo de Energia. *Revista Veja*, n. 2407, p. 60-61, 2015. Disponível em: <https://veja.abril.com.br/economia/ar-condicionado-vira-novo-vilao-para-consumo-de-energia/>. Acesso em: 13 fev. 2017.

DATE, A. W. Heat and Mass Transfer Analysis of a Clay-Pot Refrigerator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, v. 55, n. 15-16, p. 3977-3983, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.028>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0017931012001779>. Acesso em: 6 jun. 2016.

GIVONI, G. Indoor Temperature Reduction by Passive Cooling Systems. *Solar Energy*, v. 85, n. 8, p. 1692-1726, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0038092X09002357>. Acesso em: 30 dez. 2016.

HE, J.; HOYANO, A. Experimental Study of Cooling Effects of a Passive Evaporative Cooling Wall Constructed of Porous Ceramics With High Water Soaking-up Ability. *Building and Environment*, v. 45, n. 2, p. 461-472, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.002>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S036013230900170X?via%3Dihub>. Acesso em: 11 jan. 2018.

HSU, C. T. Dynamic Modeling of Convective Heat Transfer in Porous Media. In: VAFAI, K.

(org.). *Handbook of Porous Media*. 2. ed. Boca Raton: Taylor & Francis, 2005. p. 39-80.

IBRAHIM, E.; SHAO, L.; RIFFAT, S. B. Performance of Porous Ceramic Evaporators for Building Cooling Application. *Energy and Buildings*, v. 35, n. 9, p. 941-949, 2003. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00019-7). Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378778803000197>. Acesso em: 31 jul. 2018.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA – INMET. Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa da estação de Cuiabá, MT, Código OMM: 83361. 2017. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/portal/index.php?r=bdmep/bdmep>. Acesso em: 10 fev. 2018.

KRÜGER, E. L.; LANGE, S. C.; FERNANDES, L.; ROSSI, F. Avaliação do Potencial de Resfriamento de um Sistema Teto-reservatório para Condições Subtropicais. *Ambiente Construído*, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 107-125, 2016. DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300095>. Disponível em: [http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci\\_arttext&pid=S1678-86212016000300107&lng=pt&lng=pt](http://www.scielo.br/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1678-86212016000300107&lng=pt&lng=pt). Acesso em: 14 jun. 2016.

LUIKOV, A. V.; MIKHAYLOV, Y. A. *Theory of Energy and Mass Transfer*. Oxford: Pergamon Press, 1965.

MEDEIROS, J. M.; LOPES, B. S. O.; FREIRE, J. M. S.; SILVA, J. P. L.; VIANA, F. C. A.; SILVA, M. G.; BRAGA, A. H. G. Análise de um Protótipo de Condicionador de Ar Adsorvivo Evaporativo para Clima Quente e Úmido. *Revista Principia*, n. 26, p. 27-41, 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-03062015v1n26p27-41>. Disponível em: <http://periodicos.ifpb.edu.br/index.php/principia/article/view/53>. Acesso em: 15 fev. 2019.

MITTAL, A.; KATARIAA, T.; DASB, G. K.; CHATTERJEEA, S. G. Evaporative Cooling of Water in a Small Vessel Under Varying Ambient Humidity. *International Journal of Green Energy*, v. 3, n. 4, p. 347-368, 2006. DOI: <https://doi.org/10.1080/01971520600704654>. Disponível em: <https://www.tandfonline.com/doi/full/10.1080/01971520600704654>. Acesso em: 5 jun. 2016.

NATICCHIA, B.; D'ORAZIO, M.; CARBONARI, A.; PERSICO, I. Energy Performance Evaluation of a Novel Evaporative Cooling Technique. *Energy and Buildings*, v. 42, n. 10, p. 1926-1938, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.05.029>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S037877881000191X>. Acesso em: 20 out. 2017.

NDUKWU, M. C.; MANUWA, S. I.; OLUKUNLE, O. J.; OLUWALANA, I. B. Development of an Active Evaporative Cooling System for Short-Term Storage of Fruits and Vegetable in a Tropical Climate. *Agricultural Engineering International*, v. 15, n. 4, p. 307-313, 2013. Disponível em: <https://cigrjournal.org/index.php/Ejournal/article/view/2655/1821>. Acesso em: 15 jun. 2018.

PARK, K. J. P.; PARK, K. J.; ALONSO, L. F. T.; CORNEJO, F. E. P.; FABBRO, I. M. D. Secagem: Fundamentos e Equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, Campina Grande, v. 16, n. 1, p. 93-127, 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127>. Disponível em: <http://www.bibliotekevirtual.org/index.php/2013-02-07-03-02-35/2013-02-07-03-03-11/1431-rbpa/v16n01/15352-secagem-fundamentos-e-equacoes.html>. Acesso em: 10 abr. 2017.