

Uma análise comparativa do desempenho de quatro sistemas de umidificação do ar em condições de seca no centro-oeste brasileiro

A comparative performance analysis of four air humidification systems under drought conditions in the Brazilian Midwest

Marcelo Paes de Barros

Resumo

Quatro sistemas de umidificação do ar foram examinados e seus desempenhos comparados sob condições de seca do centro-oeste brasileiro. Esses sistemas são umidificador elétrico, bacia com água, toalha úmida e um sistema artesanal feito com telhas cerâmicas especialmente para este trabalho. A avaliação foi realizada entre julho e outubro de 2017, em Cuiabá, Brasil. As medidas da umidade relativa foram feitas em dois ambientes semelhantes, um com e outro sem sistema de umidificação. O umidificador elétrico proporcionou umidificação contínua e prolongada, mantendo essa condição até o final dos períodos de medições, mas destacam-se os altos tempos de resposta para umidificar um espaço, de até 292 min, e umidade relativa alcançada, de 85%, após tempos de operação mais longos. O sistema da bacia com água resultou numa umidificação de aproximadamente 59% da alcançada pelo umidificador elétrico, enquanto a toalha úmida, apesar do menor tempo de resposta em umidificar o ambiente, de até 18 min, não manteve a umidade de referência até o final dos períodos de medições, sob condição de 43% de umidade relativa, em média. O sistema artesanal proporcionou uma umidificação de cerca de 92% da umidade fornecida pelo umidificador elétrico, o que demonstra o potencial benéfico do sistema em umidificar ambientes fechados.

Palavras-chave: Umidificadores. Umidade do Ar no Interior das edificações. Conforto ambiental. Qualidade do ar.

Abstract

This study examined four air humidification systems and compared their performances under drought conditions in the Brazilian Midwest. Those systems were the electric humidifier, basin with water, wet towel, and an artisanal system made for this study using clay roof tiles. The evaluation was conducted between July and October 2017 in Cuiabá, Brazil. The measurements of the relative humidity were taken in two similar bedrooms, one without a humidifier and another one with an air humidification system. The electric air humidifier provided a continuous and prolonged humidification, maintaining this condition until the end of the measurement period in all situations, but the study highlights the high response time to humidify a space, up to 292 min, and the high relative humidity, around 85%, provided by the humidifier after longer running times. The basin with water system resulted in a humidification of about 59% of the moisture provided by the electric humidifier, while the wet towel, despite producing the best response time in humidifying an environment - up to 18 min, did not maintain the reference humidity until the end of the measurement period under ambient conditions of 43% relative humidity. The artisanal system presented a humidification of about 92% of the moisture provided by the electric humidifier, which demonstrates the potential of the system to increase humidity indoors.

Keywords: Humidifiers. Indoor residential humidity. Environmental comfort. Air quality.

¹Marcelo Paes de Barros

¹Universidade Federal de Mato Grosso
Cuiabá - MT - Brasil

Recebido em 04/05/18

Aceito em 26/07/18

Introdução

Nas proximidades do mês de junho tem início o período seco em grande parte do território brasileiro. Queimadas e fumaça, falta de chuvas e poeira, pólen e alergia, atrito e estática, atividades físicas e hidratação são questões que voltam a ser notícia em todas as mídias. O importante fator que está relacionado a todas essas questões, comuns do período seco, é a umidade do ar, que afeta tanto o conforto quanto a saúde humana.

A umidade do ar, termo geral usado para descrever a presença de vapor d'água no ar, pode ser elevada pelo acréscimo de moléculas de água que, por evaporação, escapam de uma superfície úmida, elevando, conseqüentemente, a pressão exercida pelo vapor sobre essa superfície (pressão parcial de vapor - p). A continuidade desse processo, ao elevar a concentração de vapor junto à superfície, diminui progressivamente a taxa líquida de evaporação, até que esta cesse. Nessa situação o ar contém a quantidade máxima de vapor d'água possível para a temperatura, e a pressão exercida pelo vapor é denominada pressão de saturação (p_{sat}).

Assim definida, a pressão de vapor, além das umidades absoluta e relativa, pode descrever quantitativamente a presença de vapor d'água no ar. A umidade relativa do ar (UR) é um parâmetro de interesse dos estudos em conforto térmico, sendo definida como a razão entre a pressão parcial de vapor e a pressão de saturação na mesma temperatura, conforme Equação 1, normalmente expressa em porcentagem (CORBELLA; YANNAS, 2003).

$$UR(\%) = (p/p_{sat}).100 \quad \text{Eq. 1}$$

Com relação à UR dos ambientes internos das construções, as preocupações têm se concentrado principalmente na prevenção ao excesso de umidade (QUINN; SHAMAN, 2017). O cuidado tem fundamento, segundo Arundel *et al.* (1986), pois as populações de ácaros atingem um tamanho máximo a 80% de UR. Para bactérias infecciosas e vírus transmitidos pelo ar, a sobrevivência desses organismos é minimizada pela exposição a umidades relativas entre 40% e 70%, e, no caso dos fungos, a maioria das espécies não pode crescer a menos que a UR exceda 60%.

Por outro lado, as conseqüências da baixa umidade no ambiente interno devem ser consideradas e avaliadas de uma maneira completamente diferente do que é feito hoje, uma vez que a incidência de infecções respiratórias aumenta quando as pessoas são expostas a longos períodos de baixa umidade em ambientes fechados (BYBER *et al.*, 2016; VON

HAHN, 2007; ALSMO; ALSMO, 2014; WOLKOFF, 2018).

Assim, para minimizar os efeitos adversos da baixa UR à saúde e ao conforto, Arundel *et al.* (1986) sugerem um aumento na UR de baixa a intermediária, tendo como resultado benéfico mais importante a redução na morbidade e possivelmente na mortalidade por influenza, além de melhorar a qualidade do sono e reduzir os efeitos sobre as cordas vocais. Alsmo e Alsmo (2014) indicam elevar a UR para níveis acima de 40% e abaixo de 70%, além de limitar o número de partículas transportadas pelo ar, uma vez que estas são transportadoras de bactérias e vírus, fatores importantes para o ambiente aéreo saudável dentro de casa.

O nível de umidade do ar interno pode ser aumentado por intervenções no nível do edifício, como sistemas de umidificadores centrais; intervenções locais, como umidificadores portáteis de ar; e outras intervenções, como colocar plantas em volta do local de trabalho ou colocar um recipiente de água ou roupas úmidas nas proximidades (FIDLER, 1989).

O umidificador portátil elétrico, de névoa quente ou fria, é uma estratégia muito comum para a umidificação dos ambientes residenciais. Por não produzir névoa por água fervente, o umidificador de névoa fria é considerado mais seguro, com autonomia de operação dependendo da capacidade do reservatório de água. Normalmente, um reservatório de 2 L pode operar por até 12 ou mais horas (XIAO; YUAN, 2010).

Outras estratégias de umidificação do ar envolvem a evaporação, passiva e ativa, da água de uma superfície porosa. Ainda que apresentem restrições de eficiência em condições de elevada UR, podem minimizar o uso de eletricidade, em algumas situações em condições de energia zero¹ (*net zero energy*), proporcionando condições confortáveis e saudáveis nos ambientes construídos em localidades quentes e secas (AIMIUWU, 1992; ARAUJO, 2006; BATISTA; LAMBERTS, 2007; RORIZ; RORIZ, 2008; XIAO; YUAN, 2010; NDUKWU *et al.*, 2013; GONZALEZ *et al.*, 2014; KRÜGER *et al.*, 2016).

Desenvolvendo uma cerâmica altamente porosa, He e Hoyano (2010) utilizaram uma estratégia de evaporação passiva como forma de aproveitar a superfície vertical de uma edificação, que promoveu a elevação da UR em até 40% em condições do verão japonês. Naticchia *et al.* (2010)

¹Produzir a energia que se consome.

apresentaram uma avaliação experimental realizada em Ancona, Itália, do desempenho energético de uma parede evaporativa de água capaz de anular ganhos de energia através de condução, impedindo a entrada de fluxos de energia do exterior para o interior e reduzindo as temperaturas da parede para valores abaixo dos encontrados dentro de casa.

Para Gonçalves *et al.* (2015), materiais de construção vulgares, como o tijolo cerâmico ou as pedras naturais, podem ser utilizados em climas quentes e secos de forma eficaz para fins de arrefecimento e umidificação por evaporação, reduzindo as necessidades energéticas dos edifícios. Entretanto, materiais alternativos, como fibras vegetais, de sisal e coco, foram utilizados por Araujo (2006) como superfícies porosas de sistemas evaporativos para arrefecimento e umidificação do ar, com desempenhos tão eficientes quanto os de painéis evaporativos comerciais. Na mesma linha, Park, Go e Ryu (2014) desenvolveram um umidificador usando hwangto, solo coreano de cor amarela rico em potássio, avaliado como eficaz para a umidificação do ar nos níveis projetados.

No entanto, para Quinn e Shaman (2017), apesar de essas intervenções serem muito utilizadas para umidificar o ambiente doméstico, o efeito desses umidificadores na evolução da umidade interna não é conhecido, de forma que pesquisas adicionais são necessárias para avaliar a eficácia desses sistemas em ambientes ocupados.

Nesse contexto, a pesquisa descrita neste trabalho teve por objetivo analisar comparativamente o desempenho de quatro sistemas de umidificação do ar em promover a umidificação, em níveis de conforto e saúde, do ambiente interno de uma edificação residencial, em condições de seca do centro-oeste brasileiro. Os sistemas são o umidificador ultrassônico elétrico de névoa fria, a

bacia com água, a toalha úmida e um sistema artesanal confeccionado com telhas cerâmicas.

Método

Ambiente de estudo

O experimento foi conduzido em uma residência, um sobrado sem ocupação, localizada em Cuiabá, MT, latitude 19° 26' 56" S, longitude 44° 44' 52" O e altitude de 718 m, durante os meses de julho a outubro de 2017, o que contempla todo o período de seca da região.

Foram utilizadas duas salas adjacentes, idênticas, situadas no pavimento superior da construção, cobertas com laje e telha de fibrocimento. As salas, dotadas de janelas, voltadas para o nascente, e uma porta, voltada para o interior da construção, apresentam as dimensões largura de 3,3 m, comprimento de 3,8 m e pé-direito de 3,0 m, perfazendo um volume de 37,62 m³ (Figura 1).

As janelas de PVC com uma área de 3,6 m², um total de 31,6% de abertura da fachada, contavam com escovas de vedação e borrachas de fixação em bom estado, capazes de garantir a vedação necessária ao estudo. A porta de madeira, além da fita de borracha de impacto no portal, contou com um veda-porta em sua porção inferior durante a realização das medições.

Caracterização climática

O clima da região, de acordo com Köppen, classifica-se como Aw, característico dos climas úmidos tropicais, com duas estações bem definidas: seca, no inverno, de maio até setembro, e úmida, no verão, com início em outubro até o mês de abril (Figura 2).

Figura 1 - Planta baixa dos ambientes monitorados da edificação

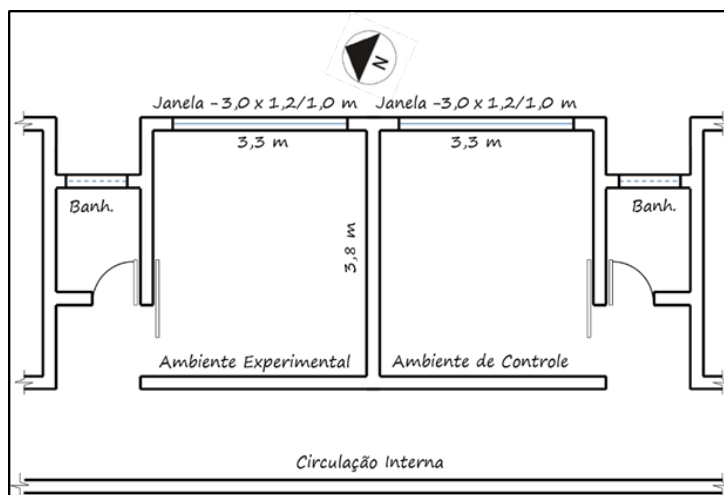


Figura 2 - Precipitação, temperatura e umidade relativa do ar mensal média para Cuiabá, MT (INMET 1961-2017)

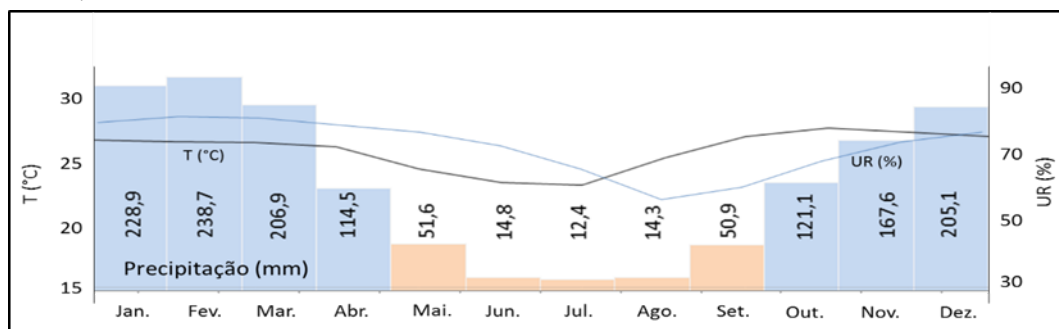


Tabela 1 - Taxa de evaporação (E) e amplitude térmica (AT) mensais médias

Mês	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
E (mm)	93	89	88	93	106	123	144	190	183	153	123	112
AT (°C)	9,3	9,4	9,8	10,5	11,6	13,4	15,2	15,8	13,3	11,5	10,4	9,5

A precipitação média anual é da ordem 1387,8 mm, concentrados na estação chuvosa, enquanto na estação seca são registradas, em média, apenas 5,6 ocorrências de precipitações, com intervalo máximo entre duas ocorrências de chuvas, em média, de 54,0 dias, entre os dias 18 de junho e 10 de agosto, em média. No ano de 2017 a estiagem teve início em 24 de maio e teve fim em 14 de agosto, totalizando 84 dias sem ocorrência de chuvas (BARROS, 2018).

A temperatura média anual varia entre 28 °C e 32 °C, ocorrendo períodos de curta duração com temperaturas baixas durante o inverno (seca), que ocorrem geralmente pela influência de massas de ar polar que conseguem atingir o interior do continente, também responsáveis pelas poucas chuvas que ocorrem nesse período.

Apesar de interromper a estiagem, essas chuvas ainda não indicam seu final, marcando o segundo período da estiagem, caracterizado por elevadas temperaturas do ar, com máximas diárias acima de 40 °C por dias seguidos e pela baixa UR, com valor médio diário de 60% e mínimo inferior a 30%, condições responsáveis pelos maiores valores da taxa de evaporação da água e da amplitude térmica, conforme a Tabela 1².

Instrumentos de medição

O monitoramento da temperatura (°C) e da umidade relativa (%) nos ambientes de estudo foi realizado com a utilização do termo-higrômetro digital, com *data logger*, da marca Testo, modelo 174H. O sensor de temperatura desse equipamento opera na faixa de temperaturas de -20,0 °C a 70,0 °C, com

precisão de $\pm 0,5$ °C, na faixa de operação, e resolução de 0,1 °C, enquanto o sensor de umidade opera na faixa de 0% a 100%, com precisão de $\pm 3\%$, e resolução de 0,1%.

A configuração dos dois equipamentos utilizados, programados para registrar os valores das temperaturas e umidade relativa do ar a cada 1,0 min, e a extração dos dados registrados por estes foram realizadas com o software ComSoft Basic 5 SP5, da Testo.

Ajustes e calibrações

Durante o mês de julho de 2017 vários períodos de medições foram realizados entre as 18h e as 6h do dia seguinte, intervalo do repouso noturno, para compreender a evolução da temperatura (°C) e da umidade relativa (%) nos dois ambientes a fim de definir os horários das medições. Esses períodos também foram utilizados para estabelecer, se necessário, funções de ajustes entre os registros simultâneos realizados pelos equipamentos em um mesmo ambiente (diferença entre os equipamentos) e pelos equipamentos colocados em ambientes diferentes (diferença entre os ambientes).

Essa avaliação preliminar mostrou que a UR começava a se elevar depois das 21h e invertia essa tendência após as 5h30min do dia seguinte. Assim, optou-se por estabelecer o período de medições entre 22h e 5h30min do dia seguinte para a sequência do estudo. Com relação à correlação entre as medições, não foram encontradas diferenças significativas entre os registros dos

²Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP) da estação de Cuiabá, MT, Código OMM: 83361, período 1961-

2017, disponível em www.inmet.gov.br/portal/, acesso em 8 jan. 2018.

equipamentos, nem entre os ambientes no que se refere às condições higrotérmicas.

Sistemas de umidificação

Para essa avaliação comparativa de desempenho foram utilizados quatro sistemas de umidificação do ar: um sistema comercial, o umidificador ultrassônico elétrico de névoa fria, dois sistemas populares, a bacia com água e a toalha úmida, e um sistema artesanal, confeccionado com telhas cerâmicas exclusivamente para este trabalho.

O umidificador ultrassônico de névoa fria produz micropartículas de água pela vibração de um diafragma de metal em frequência de 1,3 Mhz a 1,7 Mhz, que são expelidas pelo bocal do aparelho com o auxílio de um ventilador. O umidificador utilizado na análise é compacto, com dimensões de 28,5 cm x 19,5 cm x 19,5 cm, potência de 30 W e capacidade de 2 L. O ajuste de regulagem de saída de névoa foi realizado de forma a esgotar os 2 L de água dentro de um período de medições (22h–5h30min) (Figura 3).

Os demais sistemas utilizam a evaporação da água como princípio de funcionamento. A evaporação da água de uma superfície porosa envolve o fornecimento de calor pelo ar, que esfria e sorve a umidade removida da superfície. Assim, o processo é caracterizado como um fenômeno de superfície, sendo influenciado pela temperatura e pela pressão de vapor do ar que atuam sobre as moléculas da interface (COSTA, 2003). A taxa de evaporação de uma superfície pode ser estimada pela Equação 2:

$$\frac{dm}{dt} = \frac{K.A.(p_{sat}-p)}{P_{ext}} \quad \text{Eq. 2}$$

Onde:

K é uma constante característica do líquido;

A é a área da superfície livre do líquido; e

P_{ext} é a pressão externa ao líquido.

Para os sistemas populares foram utilizadas uma bacia de alumínio de 22 L de capacidade e dimensões de 13 cm de altura por 60 cm de diâmetro e uma toalha de banho, 100% algodão, com dimensões de 70 cm por 135 cm. A bacia foi preenchida até sua capacidade máxima, enquanto a toalha foi colocada em uma bacia plástica de forma a absorver 2 L de água, que eram dispostos sobre ela, para em seguida ser estendida em uma espécie de cabide (Figura 3).

O sistema artesanal foi construído com a junção de duas telhas cerâmicas, coladas e vedadas com massa plástica nas laterais e na base (Figura 4). O conjunto assim confeccionado pode armazenar 2,5 L de água em seu interior. Os estudos preliminares indicaram a necessidade de quatro conjuntos ventilados durante todo o período de medições, de forma a perder por evaporação algo próximo a 2 L de água, quantidade que foi utilizada em todos os períodos de medições (Figura 4).

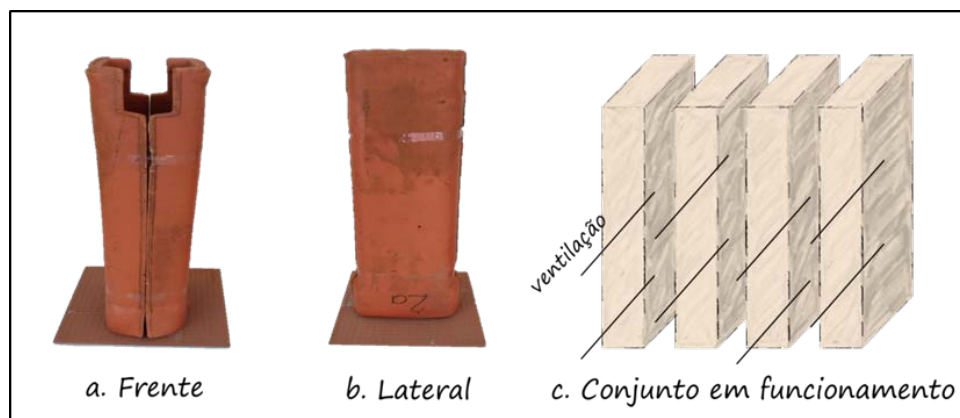
Rotina de medições

A cada período de medições, os equipamentos (termo-higrômetros) eram colocados em suportes nos centros dos ambientes, um no ambiente de controle e outro no ambiente experimental, a uma altura de 60 cm do piso, conforme as especificações para medições, pesquisas e avaliações de conforto em espaços existentes do apêndice K da ASHRAE 55 (AMERICAN..., 2013).

Figura 3 - Imagens ilustrativas da bacia com água, da toalha e do umidificador utilizados como sistemas de umidificação de ar



Figura 4 - Reservatório de água construído pela junção de telhas cerâmicas e utilizado como sistema de umidificação de ar



Os sistemas de umidificação do ar, um a cada dia de medição, foram colocados em funcionamento no piso do ambiente experimental, próximos à parede oposta à janela, na porção central desta. Como forma de comparar o desempenho do sistema comercial com os demais sistemas, optou-se por transformar os sistemas populares e artesanal em sistemas ativos de umidificação, com a utilização de um ventilador de 130 W colocado a 1 m dos sistemas, com circulação do ar na direção da parede (Figura 5). Para avaliar a influência da ventilação, alguns períodos foram realizados sem ventilação.

Os períodos de medições aconteceram nos meses de agosto a outubro de 2017, em ciclos de 5 dias seguidos, sem falhas, sendo o primeiro dia destinado à avaliação das evoluções das temperatura e umidade ambientais, a fim de caracterizar as condições higrotérmicas do ciclo. Os demais dias do ciclo foram destinados à avaliação da umidificação do ambiente experimental submetido à bacia com água, ao umidificador, à toalha úmida e às cerâmicas, utilizando um sistema a cada período (dia) de medição e nessa ordem. Ao todo foram realizados 15 ciclos de medições.

Tratamento dos registros e a análise dos dados

Após a realização de cada ciclo de medições (5 dias), foi realizada uma análise de variância (ANOVA) com as médias horárias das umidades no ambiente de controle (variável dependente) em cada um dos 5 dias de medições (tratamentos) para aferir, a um nível de significância adotado de 1%, se existem diferenças significativas entre as médias das umidades de cada dia de medições.

A ANOVA é um procedimento utilizado para comparar três ou mais tratamentos e baseia-se na decomposição da variação total da variável em partes devidas às variâncias entre os tratamentos e

às variâncias dentro do tratamento. Nesse procedimento, a estatística F é o parâmetro que fornece informações sobre a evidência contra a hipótese inicial (H_0) de que as médias dos tratamentos são iguais, para que o pesquisador possa decidir com o nível de significância apropriado. $F_{\text{calculado}} > F_{\text{tabelado}}$ implica a rejeição da H_0 e aponta para a existência de diferenças significativas entre as médias para pelo menos um par de tratamentos, diferenças que possivelmente sejam devidas a variações no ambiente higrotérmico entre os dias de medições de um mesmo ciclo. Assim evidenciado, os ciclos caracterizados como heterogêneos nesses critérios foram rejeitados na análise. Caso contrário, as médias das UR podem ser consideradas iguais entre si, o que garante a homogeneidade dos valores dessa variável nos dias em que ocorreram as medições. Condições ambientais semelhantes é uma garantia fundamental para a validade da análise comparativa dos desempenhos dos diferentes sistemas de umidificação.

O mesmo teste, com o mesmo nível de significância, foi realizado para distinguir os ciclos em fases, cada fase agrupando ciclos com condições higrotérmicas ambientais semelhantes. Justificada pela evolução do tempo meteorológico ao longo dos 3 meses de medições, a categorização dos ciclos em fases utilizou como variável dependente as médias horárias da UR no ambiente de controle no primeiro dia do ciclo (avaliação), tendo como tratamentos os registros médios horários de cada ciclo (Figura 6).

A comparação dos desempenhos dos sistemas foi realizada em função do ganho de umidade do ambiente experimental em relação ao ambiente de controle (ΔUR), determinado pela diferença dos valores, minuto a minuto, entre a UR do ambiente experimental (UR_{Exp}), onde foram instalados os sistemas de umidificação, e a UR do ambiente de controle.

Figura 5 - Disposição dos elementos do experimento no ambiente experimental

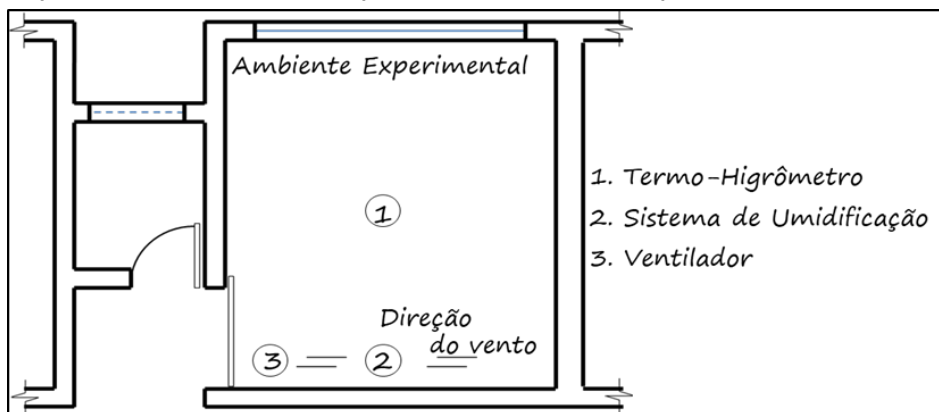


Figura 6 - Rotina de medições em ciclos e fases

SISTEMAS					
	AVALIAÇÃO	BACIA	UMIDIFICADOR	TOALHA	CERÂMICA
FASE 1	Ciclo 1				
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
	Ciclo 2				
	Dia 6	Dia 7	Dia 8	Dia 9	Dia 10
	...	Ciclo n			
	Dia
	Média				
	U_1, U_2, \dots, U_{450}	U_1, U_2, \dots, U_{450}	U_1, U_2, \dots, U_{450}	U_1, U_2, \dots, U_{450}	U_1, U_2, \dots, U_{450}
FASE 2	Ciclo 1				
	Dia 1	Dia 2	Dia 3	Dia 4	Dia 5
	Ciclo 2				

Para a análise da comparação dos desempenhos foram utilizados os valores médios do ganho de umidade do ambiente experimental em relação ao ambiente de controle (ΔUR) produzido por cada sistema nos ciclos realizados em cada fase. Os resultados foram apresentados em gráficos que mostram, minuto a minuto, a evolução do ganho médio em cada fase, proporcionado pelo sistema ao longo dos 450 min (22h–5h30 min) de realização dos experimentos.

Além de comparar seus desempenhos, a pesquisa buscou avaliar a capacidade dos sistemas em promover a umidificação do ambiente experimental em níveis de conforto e saúde. Para esta análise foram utilizados os valores médios da UR, minuto a minuto, do ambiente experimental (UR_{Exp}) produzida pelo sistema nos ciclos realizados em cada fase, comparados à UR de 60%, assumida

como umidade de referência para o trabalho, porque a maioria dos efeitos adversos à saúde, causados pela umidade, seria minimizada com a manutenção dos níveis internos nesse patamar (ARUNDEL *et al.*, 1986).

Resultados

Fases de medições

A realização da ANOVA, com as médias horárias das UR dos períodos de cada ciclo, apresentou evidências estatísticas suficientes da diferença, a 1% de significância, entre os ambientes em dois ciclos, entre 27 e 31 de agosto ($F_{calculado}=15,4 > F_{tabelado} = 4,02$) e entre 26 e 30 de setembro ($F_{calculado}=13,2 > F_{tabelado} = 4,02$). Assim, esses dois ciclos foram excluídos do estudo, que foi realizado com os dados de treze ciclos de medições.

A diferença da umidade relativa entre os dias desses ciclos, apontada na análise estatística, pode ter sido ocasionada pela influência de massas de ar polares acompanhadas de precipitações que ocorreram na região nas proximidades dessas datas.

A continuidade da análise estatística para categorizar os ciclos, por similaridade dos ambientes higrotérmicos, permitiu a distinção de três fases: a primeira fase, compreendida entre 7 e 26 de agosto, foi associada a quatro ciclos de medições ($F_{\text{calculado}} = 3,26 < F_{\text{tabelado}} = 4,72$); a segunda fase, compreendida entre 2 e 25 de setembro, foi associada a quatro ciclos de medições ($F_{\text{calculado}} = 3,27 < F_{\text{tabelado}} = 4,72$); e a terceira fase, compreendida entre 1º e 30 de outubro, foi associada a cinco ciclos de medições ($F_{\text{calculado}} = 3,81 < F_{\text{tabelado}} = 4,02$).

Condições meteorológicas das fases de medições

Para ilustrar as condições higrotérmicas do ambiente em cada fase do estudo são apresentadas as evoluções da umidade relativa e da temperatura do ar com base nos valores médios dessas variáveis, minuto a minuto, em cada fase (Figura 7).

Na fase 1, correspondendo às medições que ocorreram entre 7 e 26 de agosto, a UR, em média, variou de 52% a 57%, de forma linear, a uma taxa de 0,011% a cada minuto. Comparativamente às outras fases, a fase apresentou uma umidade intermediária com as menores temperaturas durante todo o período de medições, variando entre 30,8 °C e 28,6 °C, de forma linear, a uma taxa de 0,005 °C a cada minuto.

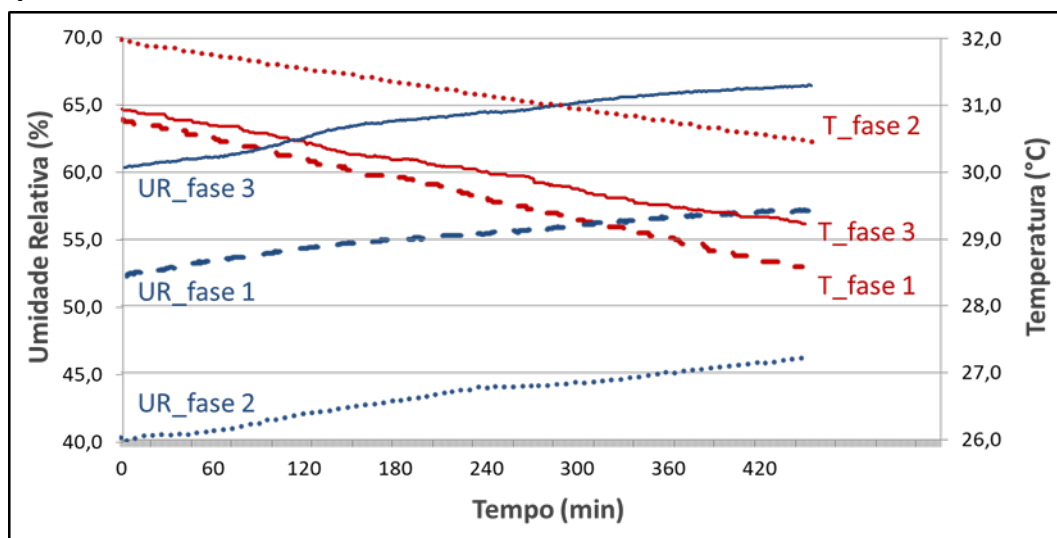
Agrupando os ciclos de medições que ocorreram entre 2 e 25 de setembro, a fase 2 apresentou, comparativamente às outras fases, os menores valores da umidade relativa e os maiores valores da temperatura do ar. Nesta fase as variações também apresentaram uma tendência linear, da ordem de 0,014% a cada minuto, entre 40% e 46%, em média, para umidade relativa, e da ordem de 0,056 °C a cada minuto, entre 29,7 °C e 32,3 °C, em média, para a temperatura do ar.

Na transição entre os períodos seco e úmido, os ciclos de medições da fase 3, entre 1º e 30 de outubro, ocorreram em um ambiente com elevada umidade e temperatura intermediária em comparação com as demais fases. A umidade teve uma variação linear da ordem de 0,0141% a cada minuto, entre 60% e 66%, em média, e a temperatura do ar, em média, variou de 29,2 °C a 31,0 °C, de forma linear, da ordem de 0,004 °C a cada minuto.

A variação linear da UR em todas as fases permitiu simplificar a análise, baseada no ganho de umidade do ambiente experimental em relação ao ambiente de controle, como também a categorização em fases, de acordo com a similaridade entre os ciclos de medições, permitiu avaliar o desempenho de cada sistema sob diferentes condições meteorológicas.

Os resultados mostraram ainda que a estação seca do ano de 2017 foi um período típico para a região, conforme caracterização climática de Barros (2018). No auge da estiagem, a fase 2 apresentou o melhor cenário para a avaliação de desempenho proposta neste trabalho.

Figura 7 - Evolução da temperatura e da umidade relativa ambientais médias durante as fases de medições



Desempenhos dos sistemas na fase 1

Os padrões assumidos podem ser agrupados de duas formas: uma elevação mais lenta e gradual do ganho máximo de umidade do ambiente experimental em relação ao ambiente de controle, tendendo a atingir um patamar, no caso do umidificador e das cerâmicas, mantido até o final do período. No caso da toalha e da bacia com água, ocorre elevação mais abrupta, atingindo um ganho máximo, logo seguido por um decréscimo gradual deste (Figura 8).

O ganho de umidade proporcionado pelo umidificador suplantou o proporcionado pela toalha úmida e pela bacia com água entre a terceira e a quarta hora do experimento. Com as cerâmicas, o valor da variável também suplantou a proporcionada pela toalha úmida e pela bacia com água, porém entre a quarta e a quinta hora do experimento.

Os experimentos realizados com a toalha e a bacia com água resultaram em uma UR de 60% no ambiente experimental a partir dos 18 min e dos 22 min após o início das medições respectivamente. Os valores da variável permaneceram acima desse valor durante todo o período de medições com ambos os sistemas. Para as cerâmicas e o umidificador esse valor foi atingido após 48 min e 62 min do início das medições respectivamente e se mantiveram acima desse valor durante todo o experimento.

Desempenhos dos sistemas na fase 2

Nesta fase as condições ambientais, de baixa umidade relativa e elevada temperatura do ar, foram determinantes para os resultados alcançados nos experimentos. Mantendo os mesmos padrões dos experimentos realizados na fase 1, o ganho máximo de umidade do ambiente experimental em relação

ao ambiente de controle variou em intensidade, de 16% na fase 2 contra 14% na fase 1, em média, porém com um gradiente (tempo de resposta para atingir determinada umidade) na fase 2 inferior ao ocorrido na fase anterior (Figura 9).

O maior tempo de resposta em umidificar o ambiente (menor gradiente) foi ocasionado pela reduzida umidade ambiental, que afeta a rapidez com que a umidade é adicionada ao ar do ambiente (QUINN; SHAMAN, 2017). No entanto, o ganho de umidade é maior em ambientes mais secos, como mostraram Xiao e Yuan (2010) em um experimento com umidificador de papel como meio poroso, na China, quando o ganho de umidade diminuiu de 20% para 13% ao fato de que a UR do ambiente aumentou em 4%.

A análise dos desempenhos individuais de cada sistema mostrou que, mesmo alcançando um ganho de umidade maior comparado com os experimentos da fase anterior, em nenhuma das medições em que foram utilizadas a toalha úmida e a bacia com água a UR_{Exp} ultrapassou o valor de 60%. No caso da toalha úmida foi atingida uma UR_{Exp} de 59%, após 229 min do início das medições, e no caso da bacia com água foi atingida uma UR_{Exp} de 56%, após 319 min do início das medições, chegando ao final do período em valores de 54% e 56% respectivamente.

Para as cerâmicas e o umidificador o valor de referência de 60% foi atingido em 292 min e 365 min após o início das medições respectivamente, valores que se mantiveram acima da referência durante todo o experimento. A UR_{Exp} proporcionada pelo umidificador e pelas cerâmicas suplantou a proporcionada pela bacia com água entre a primeira e a segunda hora do experimento e suplantou a UR_{Exp} proporcionada pela toalha úmida entre a quarta e a quinta hora do experimento.

Figura 8 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle na fase 1

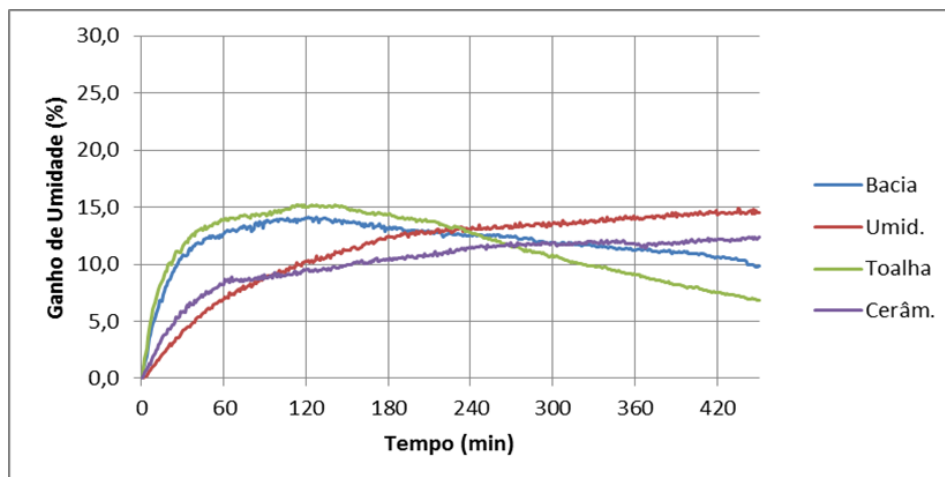
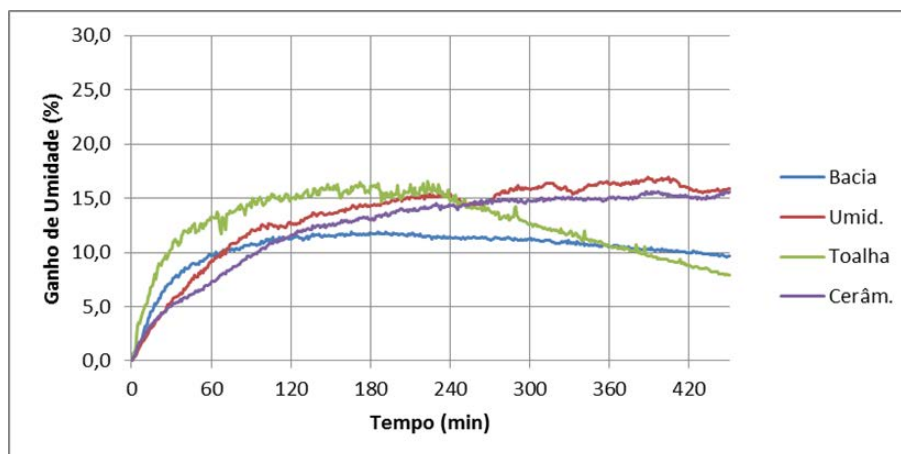


Figura 9 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle na fase 2



Desempenhos dos sistemas na fase 3

Novamente os resultados indicaram os mesmos padrões apresentados nos experimentos realizados nas fases anteriores, variando em intensidade, notavelmente no caso das cerâmicas (Figura 10).

O sistema artesanal confeccionado com telhas cerâmicas tem funcionamento baseado no princípio do resfriamento evaporativo, cujo desempenho é melhor à medida que a temperatura aumenta e a umidade diminui. Esta 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 força motora do processo, limitadora da eficiência de um sistema (CHAUDHARI *et al.*, 2015).

Em todos os experimentos realizados, a UR no início das medições foi superior a 60%, de forma que os valores da UR_{Exp} permaneceram acima desse valor em todos os ciclos realizados. Nessas condições o umidificador elétrico proporcionou uma UR_{Exp} de 86%, em média, ao final das medições, chegando próximo à saturação do ar em alguns períodos, enquanto os demais sistemas atingiram valores entre 73% e 75%, em média.

Ciclos realizados sem ventilação

Com os ambientes submetidos à toalha úmida ou à bacia com água, os ganhos na UR_{Exp} não apresentaram diferenças significativas entre os experimentos com e sem ventilação. Com relação ao umidificador, a curva de desempenho foi semelhante nas duas situações, no entanto, livre da ventilação, o ganho de umidade foi o maior de todos os ciclos de medições, uma diferença de 28% entre os dois ambientes (Figura 11).

No caso da bacia com água, foi atingida uma UR_{Exp} de 55% após 240 min do início do experimento, tempo semelhante para a toalha úmida atingir a UR_{Exp} de 60%, valores que se mantiveram até o final. No caso do umidificador elétrico, a UR_{Exp} de 60% foi atingida após 138 min de iniciado o experimento, que foi concluído com uma UR_{Exp} de 74%. Os desempenhos da toalha úmida e do umidificador são semelhantes até 99 min após iniciado o experimento.

Com a utilização do sistema cerâmico, o ganho de umidade, de 5%, foi muito inferior ao valor médio registrado, de 13%, quando submetido a ventilação, não tendo atingido a umidade de referência em nenhum momento, assim como ocorreu com a bacia com água. No caso das cerâmicas, foi atingida uma UR_{Exp} de 50% ao final do período.

Esta é uma característica dos sistemas evaporativos ativos, a necessidade da utilização de ventiladores para conduzir o ar ambiente através de meio poroso para dentro do sistema (NDUKWU *et al.*, 2013). Concentradas junto à superfície, as moléculas de água que se desprendem do líquido aumentam a pressão de vapor, dificultando a evaporação, de forma que a ventilação, ao dissipar o vapor d'água próximo à superfície, permite a evaporação da água restante (COSTA, 2003).

Desempenho individual de cada sistema

Bacia com água

As curvas do ganho de umidade apresentaram o mesmo padrão para as situações propostas no experimento, também variando no gradiente da elevação inicial e no nível desse patamar (Figura 12). Os valores mais elevados do ganho de umidade, que estão relacionados aos maiores gradientes, variaram entre 11% e 14%.

Figura 10 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle na fase 3

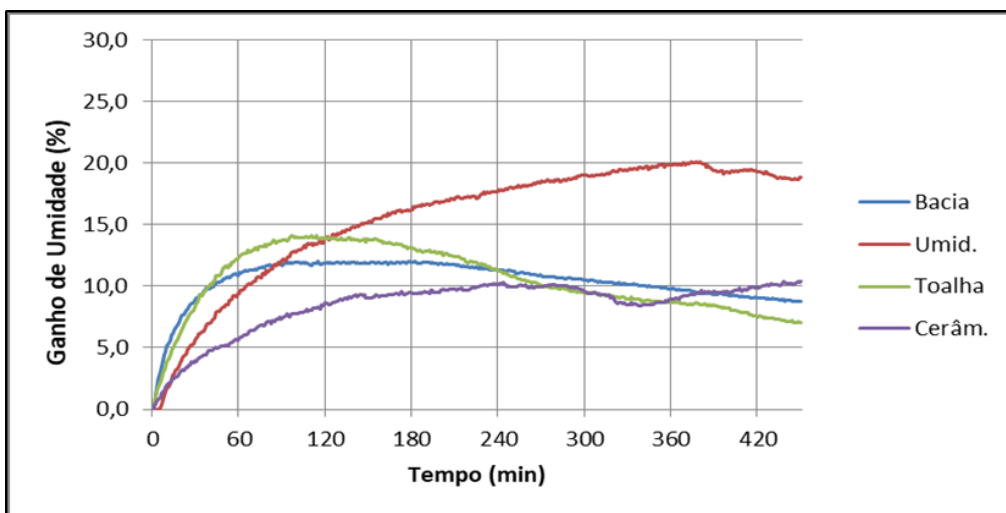


Figura 11 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle sem ventilação

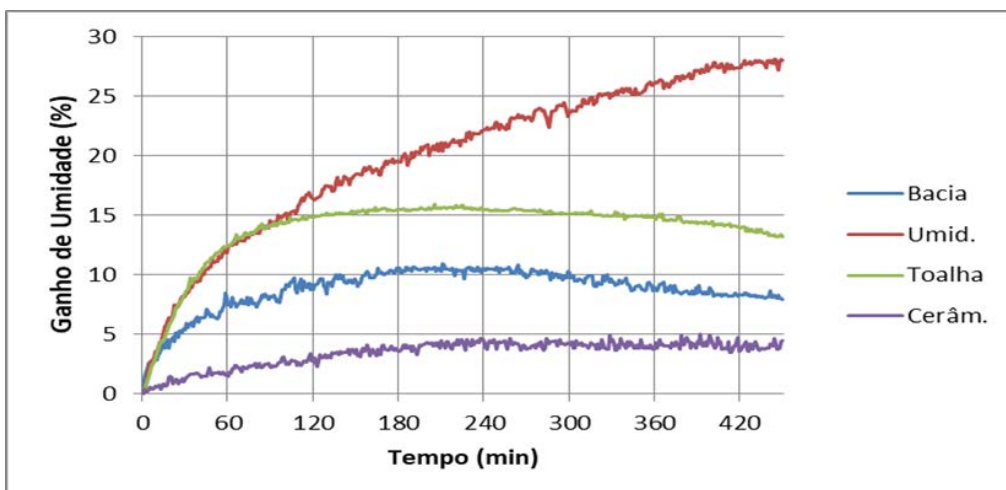
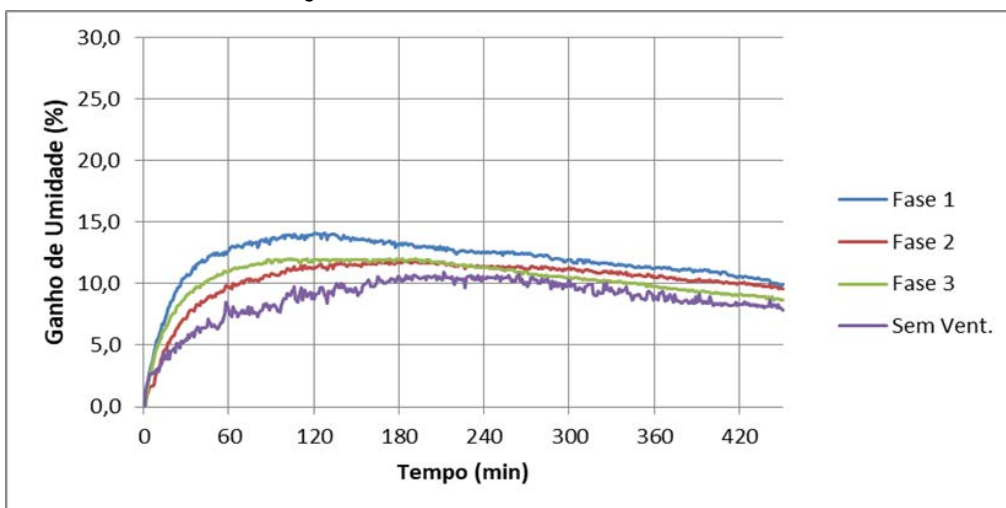


Figura 12 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle utilizando a bacia com água



Esse sistema apresentou desempenho inferior em relação a todos os demais sistemas na maior parte das situações experimentadas, produzindo uma umidificação de apenas 59% da proporcionada pelo umidificador elétrico nas condições climáticas da fase 2, portanto sem atingir a umidade de referência.

A perda de água por evaporação ao final dos períodos de medições esteve entre 279 mL e 1076 mL, sendo registrada a maior capacidade de umidificação nas condições da fase 1. Apesar do declínio do ganho de umidade em todas as condições, em decorrência da elevação natural da UR_{Ctrl} , a UR_{Exp} proporcionada por esse sistema se manteve constante, depois de atingido o patamar, até o final do período de medições.

Toalha úmida

As curvas do ganho de umidade apresentaram o mesmo padrão para as situações propostas no experimento, semelhante aos padrões das curvas com a bacia com água. Os valores mais elevados do ganho de umidade variaram entre 14% e 17%, com gradientes semelhantes durante os primeiros 60 min (Figura 13).

A toalha úmida perdeu por evaporação entre 1.160 mL e 1.950 mL de água ao final dos ciclos de medições, um volume médio 2,5 vezes maior que o evaporado nos ciclos realizados com a bacia com água, o que pode justificar o melhor desempenho da toalha úmida em umidificar o ar. A evaporação de 1.950 mL, com a toalha praticamente seca, aconteceu nas condições da fase 2, condizente com a maior taxa de evaporação do mês de agosto, conforme a caracterização climática.

Tanto com a toalha quanto com a bacia, a umidificação proporcionada é resultado do processo

evaporativo da umidade superficial. Assim, a maior superfície de contato com o ar oferecida pela toalha pode ser responsável pelo melhor desempenho. Nas condições climáticas da fase 2, o sistema proporcionou ganho de umidade de 97,6% do promovido pelo umidificador elétrico, com um tempo de resposta, entre 60 min e 240 min para atingir o patamar, menor que o apresentado pelo umidificador elétrico em todas as situações.

Com relação à importância da superfície exposta para os evaporadores, Paschold *et al.* (2003) explicam que os umidificadores comerciais utilizam painéis de papel corrugado como meio poroso, o que aumenta a superfície evaporante se comparado ao papel liso, com a finalidade de maximizar o contato com o ar e a evaporação.

A UR_{Exp} máxima variou entre 60% e 77%, valores superiores à umidade de referência em todos os experimentos. No entanto, na fase 2, período de UR reduzida, o valor de referência não foi mantido, chegando a um valor de 54% ao final do período de medições. De acordo com Park *et al.* (2014), a redução ocorre devido à quantidade de água disponível, insuficiente para que a migração de água do interior acompanhe a perda por evaporação, de forma que a taxa de secagem decresce, tendendo ao equilíbrio com o ar.

Umidificador elétrico

Diferentemente dos sistemas anteriores, as curvas do umidificador elétrico não apresentaram patamares, de forma que o ganho de umidade e a UR_{Exp} aumentaram até o final do período de medições, atingindo valores entre 15% e 28% para o ganho de umidade (Figura 14) e valores entre 62% e 85% para a UR_{Exp} .

Figura 13 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle utilizando a toalha úmida

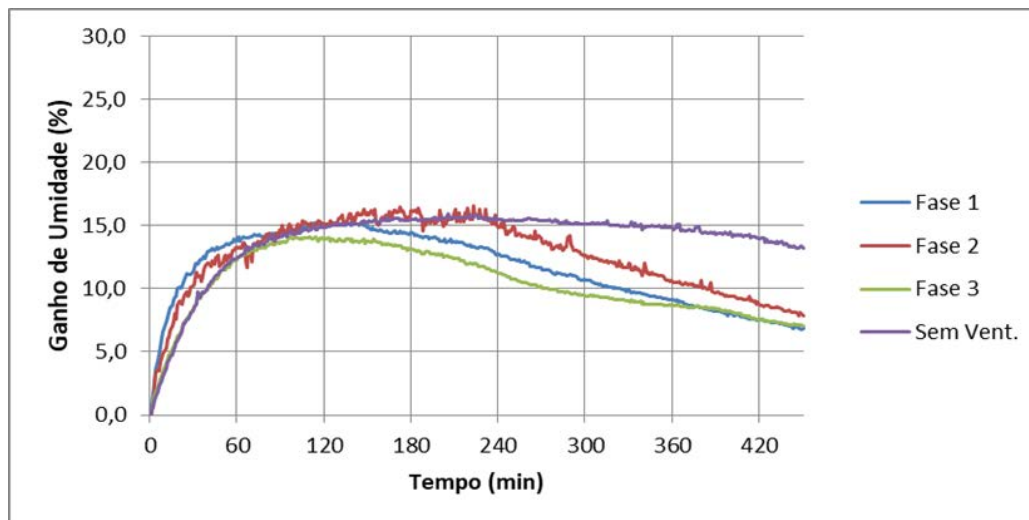
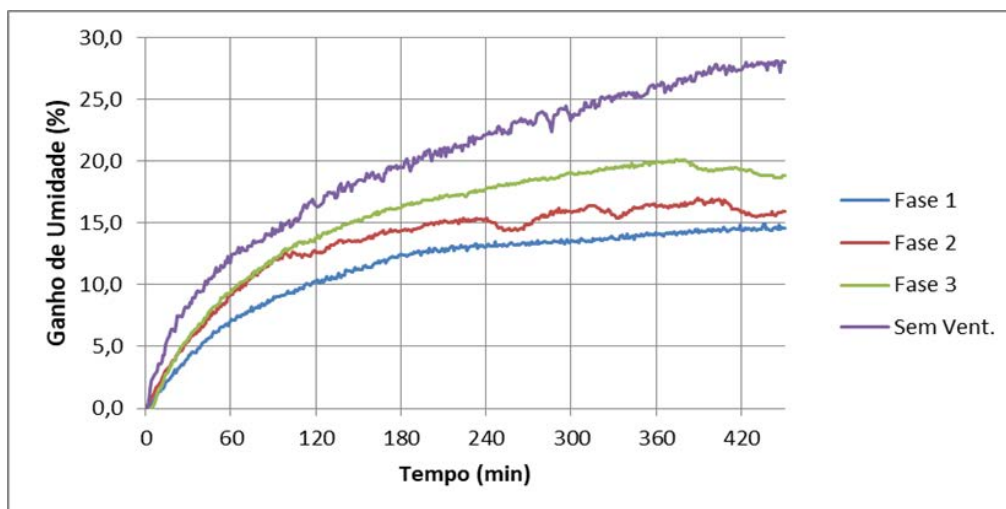


Figura 14 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle utilizando umidificador elétrico



Em todos os experimentos a UR_{Exp} atingiu o valor de referência, sendo na fase 2, período de UR reduzida, necessários 292 min para se atingir esse valor, chegando ao nível de 62% ao final do período. O sistema produziu o maior ganho de todo o estudo no experimento, de 28%, sem a utilização de ventilação e a maior UR_{Exp} , de 85%, no experimento realizado na fase 3, fase de UR elevada.

Os resultados são condizentes com os encontrados por Myatt *et al.* (2010), na comparação entre as UR de dois quartos, um com e outro sem umidificação, em condições ambientes de 20 °C e 30% de UR, quando foram necessários 240 min para produzir um ganho máximo de 16%, atingindo uma UR de 51% no quarto umidificado. Também no presente experimento, após alcançado o patamar, o ganho de umidade do ambiente experimental permaneceu constante até o final do experimento.

Os desempenhos inferiores apresentados no estudo norte-americano (MYATT *et al.*, 2010) podem ser explicados pela menor temperatura ambiente por ocasião do experimento, comparativamente aos resultados apresentados com o uso do umidificador na presente avaliação.

Cerâmicas

As curvas obtidas nos experimentos em que foram utilizadas as cerâmicas são similares às obtidas com o umidificador elétrico, de forma que o ganho de umidade e a UR_{Exp} também aumentaram até o final do período de medições, atingindo valores entre 51% e 75% para a UR_{Exp} e valores entre 5% e 16% para o ganho de umidade (Figura 15).

O ganho de umidade foi inferior ao apontado por Ibrahim, Shao e Riffat (2003), na Inglaterra, que

registraram ganho de umidade de até 30% com evaporadores cerâmicos para umidificação de uma edificação. No estudo inglês foram utilizadas cerâmicas de alta porosidade sob condição de fluxo contínuo de água.

Em todos os experimentos com ventilação, a UR_{Exp} atingiu os 60%, tendo nas fases 2 e 3, de UR média e baixa, atingido ao final do período valores da ordem de 69% e 62% respectivamente. O desempenho médio foi de 91,8% da umidificação conseguida com a utilização do umidificador elétrico.

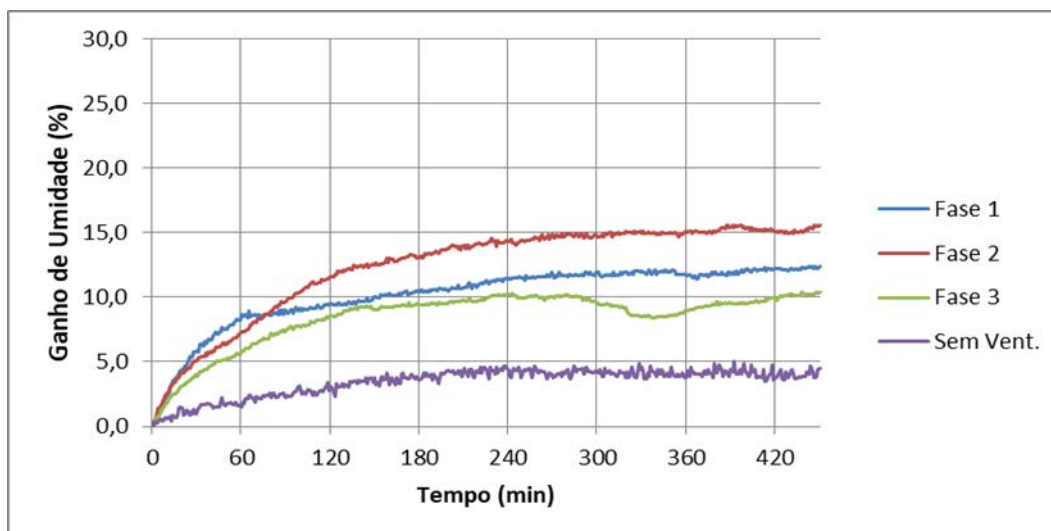
Na avaliação sem a utilização de ventilação, operando como sistema passivo, produziu um ganho de umidade de apenas 4% ao final do experimento.

Outros experimentos também buscaram materiais com extensa área superficial, abundantes e de baixo custo, como o conduzido por Araujo (2006), que conseguiu um ganho de umidade de 48% em condições ambientais de 37 °C e 36% de UR utilizando painéis evaporativos à base de fibra de coco. Vafai (2005) considera importante essa busca, pois os meios porosos, como as cerâmicas e as fibras vegetais, são de interesse científico e tecnológico significativo para conversão e armazenamento de energia, em sistemas de adsorção, de economia de energia térmica, de isolamento e de evaporação.

Conclusões

Este trabalho apresentou os resultados de uma avaliação comparativa do desempenho de quatro sistemas de umidificação do ar em promover a umidificação do ambiente interno de uma edificação residencial em período seco em Cuiabá.

Figura 15 - Evolução do ganho de umidade do ar no ambiente experimental em relação ao ambiente de controle utilizando as cerâmicas



A avaliação mostrou que a umidificação promovida pela bacia com água não resulta na umidade de referência em condições ambientais de UR, variando entre 40% e 46%, e atingindo valores de aproximadamente 59% de umidificação alcançada com a utilização do umidificador elétrico. Por outro lado, a também popular toalha umedecida, em todas as situações, promoveu a umidade de referência no ambiente e, comparando aos demais sistemas, apresentou o melhor tempo de resposta, de até 18 min.

Outro efeito apontado é a incapacidade desses sistemas populares, nas condições mais severas de seca, em manter o ganho de umidade inicial ao longo de todo o período de medições.

O umidificador elétrico apresentou o melhor desempenho, ao proporcionar uma elevação da UR em até 28% de forma contínua e prolongada em todas as condições. No entanto, deve se atentar para questões como o tempo de resposta, de até 292 min para atingir a umidade de referência, e a elevada UR produzida após longos tempos de uso.

Nesse sentido é recomendável que o uso do umidificador não ocorra durante a noite toda, ou quando a umidade do ar estiver acima de 60%. Para tanto, sugere-se um higrômetro para indicar esse nível e proporcionar o melhor ajuste da intensidade da névoa produzida, ou ainda a produção de aparelhos populares que possam ser configurados para manter um nível adequado de umidade ambiental.

O conjunto de cerâmicas proporcionou uma umidificação de cerca de 92% da umidade fornecida pelo umidificador elétrico, com um tempo de

resposta 25% a 29% maior, de forma que novos estudos devem ser empreendidos para aprimorar essa forma de umidificação do ar, seja de forma rudimentar como a aqui proposta, seja na forma de padrões industriais mais elaborados, em que se utilize o resfriamento evaporativo passivo. Assim, ambientalmente sustentável e economicamente viável, um sistema com tais características pode de fato induzir a noites de sono tranquilas, mesmo nas condições do inverno do centro-oeste brasileiro.

Referências

- AIMIUWU, V. O. Evaporative Cooling of Water in Hot Arid Regions. **Energy Conversion and Management**, v. 33, n. 1, p. 69-74, 1992.
- ALSMO, T.; ALSMO, C. Ventilation and Relative Humidity in Swedish Buildings. **Journal of Environmental Protection**, v. 5, p. 1022-1036, 2014.
- AMERICAN SOCIETY OF HEATING AND AIR-CONDITIONING ENGINEERS. **Standard 55: thermal environmental conditions for human occupancy**. Atlanta, 2013.
- ARAUJO, S. D. O. Análise do Desempenho Térmico de Fibras Vegetais no Resfriamento Evaporativo. In: CONGRESSO NACIONAL DE ENGENHARIA MECÂNICA, 4., Recife, 2006. **Anais...** Recife: Conem, 2006.
- ARUNDEL, A. V. *et al.* Indirect Health Effects of Relative Humidity in Indoor Environments. **Environmental Health Perspectives**, v. 65, p. 351-361, 1986.

- 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, 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., Ouro Preto, 2007. **Anais...** Ouro Preto: ANTAC, 2007.
- BYBER, K. *et al.* Humidification of Indoor Air For Preventing or Reducing Dryness Symptoms or Upper Respiratory Infections in Educational Settings and at the Workplace. **Cochrane Database of Systematic Reviews**, v. 6, 2016.
- CHAUDHARI, B. D. *et al.* A Review on Evaporative Cooling Technology. **International Journal of Research in Advent Technology**, v. 3, n. 2, p. 88-96, 2015.
- CORBELLA, O.; YANNAS, S. **Em Busca de Uma Arquitetura Sustentável Para os Trópicos:** conforto ambiental. Rio de Janeiro: Revan, 2003.
- COSTA, E. V. Medidas da Umidade Relativa do Ar em Um Ambiente Fechado. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 25, n. 3, p. 346-348, 2003.
- FIDLER, A. H. Air Humidifier: benefit or risk? **Öffentl Gesundheitswes**, v. 51, p. 764-769, 1989.
- GONÇALVES, T. *et al.* Evaporation From Porous Building Materials and Its Cooling Potential. **Journal of Materials in Civil Engineering**, v. 27, n. 8, p. 1-9, 2015.
- GONZALEZ, E. C. *et al.* Estudo Experimental Com Sistemas de Resfriamento Passivo em Florianópolis. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 15., Maceió, 2014. **Anais...** Maceió: ANTAC, 2014.
- 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, p. 461-472, 2010.
- 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.
- KRÜGER, E. L. *et al.* Avaliação do Potencial de Resfriamento de Um Sistema Teto-Reservatório Para Condições Subtropicais. **Ambiente Construído**, Porto Alegre, v. 16, n. 3, p. 107-125, jul./set. 2016.
- MYATT, A. T. *et al.* Modeling the Airborne Survival of Influenza Virus in a Residential Setting: the impacts of home humidification. **Environmental Health**, v. 9, n. 55, p. 1-7, 2010.
- NATICCHIA, B. *et al.* Energy Performance Evaluation of a Novel Evaporative Cooling Technique. **Energy and Buildings**, v. 42, p. 1926-1938, 2010.
- NDUKWU, M. C. *et al.* Development of an Active Evaporative Cooling System For Short-Term Storage of Fruits and Vegetable in a Tropical Climate. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v. 15, p. 313, 2013.
- PARK, H. K.; GO, S. S.; RYU, M. Y. Performance Evaluation of Eco-Friendly Humidifying Material Using Hwangto. In: DINCER, I.; MIDILLI, A.; KUCUK, H. (Eds.). **Progress in Exergy, Energy, and the Environment**. Berlin: Springer, 2014.
- PARK, K. J. P. *et al.* Secagem: fundamentos e equações. **Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais**, v. 16, n. 1, p. 93, 2014.
- PASCHOLD, H. *et al.* Laboratory Study of the Impact of Evaporative Coolers on Indoor PM Concentrations. **Atmospheric Environment**, v. 37, p. 1075-1086, 2003.
- QUINN, A.; SHAMAN, J. Indoor Temperature and Humidity in New York City Apartments During Winter. **Science of The Total Environment**, v. 583, p. 29-35, 2017.
- RORIZ, V.; RORIZ, M. Resfriamento Evaporativo Por Aspersão de Água Sobre Telhas de Fibrocimento em Clima Semi-Úmido. In: ENCONTRO NACIONAL DE TECNOLOGIA DO AMBIENTE CONSTRUÍDO, 12., Fortaleza, 2008. **Anais...** Fortaleza: ANTAC, 2008.
- VAFI, K. **Handbook of Porous Media**. New York: Taylor and Francis, 2005.
- VON HAHN, N. "Trockene Luft" und ihre Auswirkungen auf die Gesundheit: Ergebnisse einer Literaturstudie. **Gefahrstoffe Reinhaltung der Luft**, v. 67, p. 103-107, 2007.
- WOLKOFF, P. Indoor air Humidity, Air Quality, and Health: an overview. **International Journal of Hygiene and Environmental Health**, v. 221, n. 3, p. 376-390, 2018.

XIAO, D.; YUAN, Q. The Research of Water Evaporating-Cooling Humidifier's Application in Air Conditioner. In: INTERNATIONAL REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING CONFERENCE, 9., West Lafayette, 2010. **Proceedings...** West Lafayette: Purdue University, 2010.

Marcelo Paes de Barros

Instituto de Física | Universidade Federal de Mato Grosso | Av. Fernando Corrêa, s/n, Coxipó | Cuiabá - MT - Brasil | CEP 78060-900 | Tel.: (65) 3615-8730 | E-mail: marcelo.paes@fisica.ufmt.br

Revista Ambiente Construído

Associação Nacional de Tecnologia do Ambiente Construído

Av. Osvaldo Aranha, 99 - 3º andar, Centro

Porto Alegre - RS - Brasil

CEP 90035-190

Telefone: +55 (51) 3308-4084

Fax: +55 (51) 3308-4054

www.seer.ufrgs.br/ambienteconstruido

E-mail: ambienteconstruido@ufrgs.br



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.