

Um modelo simplificado para análise de desempenho de um refrigerador evaporativo de cerâmica

Marcelo Paes de Barros^{1,2} 

- (1) Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Bloco F, Avenida Fernando Correa da Costa, Boa Esperança 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil. E-mail: marcelo.paes@fisica.ufmt.br
- (2) Universidade Federal de Mato Grosso, Instituto de Física, Bloco F, Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências Naturais, Avenida Fernando Correa da Costa, Boa Esperança 78060-900, Cuiabá, Mato Grosso, Brasil.

Paes de Barros M. (2021) Um modelo simplificado para análise de desempenho de um refrigerador evaporativo de cerâmica. *Pesquisa e Ensino em Ciências Exatas e da Natureza*, 5: e1639. <http://dx.doi.org/10.29215/pecen.v5i0.1639>

Editor acadêmico: Francisco Ernandes Matos Costa. **Recebido:** 16 setembro 2020. **Aceito:** 19 janeiro 2021. **Publicado:** 30 janeiro 2021.

Resumo: O refrigerador cerâmico tem como princípio o resfriamento evaporativo, uma técnica conhecida desde a antiguidade, usada para manter baixa a temperatura dentro de um compartimento interno de armazenamento de produtos alimentares perecíveis, como frutas e legumes, em áreas rurais, quentes e secas, de países em desenvolvimento. Neste artigo, um modelo matemático simplificado é desenvolvido, baseado nas transferências de calor e de massa entre o ambiente e o refrigerador, para a predição da temperatura no interior de um refrigerador cerâmico, do tipo *pot-in-pot cooler*. Os resultados da análise apresentam uma comparação das temperaturas previstas com as temperaturas experimentais para o mesmo refrigerador e uma estimativa da temperatura do refrigerador sob uma variedade de temperaturas e umidades ambientes. Os resultados previstos mostraram a validade do modelo matemático simples e que o refrigerador cerâmico pode ser bem aplicado em condições climáticas quentes e secas do território brasileiro.

Palavras chave: Resfriamento evaporativo, transferência de calor e massa, condução, convecção, modelagem.

A simplified model for analysis performance of a clay-pot evaporative refrigerator

Abstract: The clay-pot refrigerator works on the evaporative cooling principle, a technique that has been known since ancient times, is used to maintain a low temperature inside an inner compartment of storage for perishable food products, like fruits and vegetables, in rural areas, hot and dry, of developing countries. In this paper, a simplified mathematical model is developed to describe the heat and mass transfer between air and clay-pot refrigerator. The analysis results presents a comparison of the computed temperatures with that of experimental temperatures for the same refrigerator an estimate of the refrigerator temperature under a variety of ambient temperatures and relative humidities. The predicted results show validity of simple mathematical model, and that the clay-pot refrigerator may be well applied in hot and dry climatic conditions of Brazilian territory.

Key words: Evaporative cooling, heat and mass transfer, conduction, convection, modeling.

Introdução

Talvez a mais antiga das artes, a cerâmica, na forma apresentada nas *moringas*, *potes* de cerâmica não esmaltada que reservam água, apresenta grande relevância para o povo brasileiro, fazendo parte de sua cultura. Para Leite (1954), na massa de argila brota uma força inventiva, inscreve-se um caráter peculiar a cada gente, originando maneiras distintas de utilizá-la.

Distinta como cada povo, a designação usual de argila abrange uma variedade de materiais terrosos, de granulação fina, que quando hidratados adquirem certa plasticidade. Moldada e endurecida sob a ação do calor, as características da argila se relacionam e influenciam as propriedades do produto final, a cerâmica (Ndukwu 2011).

Uma dessas propriedades, a porosidade, promove a redução da temperatura da água potável no interior de potes cerâmicos, de forma que a bebida pareça mais refrescante, fato que, aliado ao seu baixo custo, tornam esses potes de barro amplamente utilizados para condicionamento de água em localidades rurais de todo território brasileiro (Paes de Barros 2020).

No Oriente Médio e na África, além da finalidade primeira, potes de cerâmica são utilizados para o armazenamento de produtos alimentares perecíveis, como frutas e legumes, em áreas rurais de países em desenvolvimento, especialmente em condições ambientais quentes e secas, os refrigeradores cerâmicos (*clay-pot refrigerator*) (Mittal *et al.* 2006). Na sua forma mais elaborada, o refrigerador é construído com um pote externo poroso, no qual é inserido um pote interno, vitrificado, onde é disposto o alimento, o refrigerador de panela em panela (*pot-in-pot cooler*) (Chemin *et al.* 2018). O design e a otimização desses refrigeradores são o foco de uma vasta literatura em engenharia de diferentes habilitações (Taha *et al.* 1994; Mittal *et al.* 2006; Fouda & Melikyan 2011; Ndukwu 2011; Date 2012; Ndukwu *et al.* 2013; Harish & Gowda 2014; Date & Damle 2015; Dutt 2016; Chemin *et al.* 2018; Joshi *et al.* 2018).

A refrigeração observada nesses refrigeradores é devida ao resfriamento evaporativo, um fenômeno natural que garante uma geração reduzida de entropia em comparação com a do sistema de resfriamento artificial (Joshi *et al.* 2018). Esse processo termodinâmico se baseia no resfriamento de um corpo poroso através de um processo passivo de evaporação da água de sua superfície e, conseqüentemente, na rejeição desse calor latente (Fouda & Melikyan 2011). A transferência passiva de calor e de massa associada em meios porosos, por não envolver qualquer energia comercial, tem sido de grande interesse para cientistas e engenheiros devido às suas amplas aplicações (Ibrahim *et al.* 2003; Hsu 2005; He & Hoyano 2010; Givoni 2011; Chaudhari *et al.* 2015; Krüger *et al.* 2016).

O presente trabalho tem por objetivo analisar o desempenho, em termos da refrigeração produzida, de um refrigerador cerâmico, do tipo *pot-in-pot cooler*, em condições ambientais da estação seca do centro-oeste brasileiro. Uma análise das transferências de calor e de massa no refrigerador, com uma abordagem teórica simplificada, é realizada para a elaboração de um modelo matemático capaz de estimar a variação transitória da temperatura observada experimentalmente no refrigerador para diferentes condições de temperatura e umidade relativa do ar (UR).

Material e Métodos

O refrigerador cerâmico

O refrigerador foi construído com dois vasos de cerâmica porosa vermelha, com tampa, e areia peneirada no espaço entre os dois vasos (**Figura 1**).

De origem natural, oriunda do leito do rio Cuiabá, MT, a areia foi peneirada na peneira #50 (0.3 mm), assim classificada como areia média e areia fina. Após esse tratamento, a areia foi disposta, ainda seca, no fundo do vaso maior, até que as extremidades superiores dos dois vasos estivessem niveladas, em seguida mais areia foi criteriosamente colocada no espaço lateral entre os vasos, garantindo uma uniformidade de espessura em todo o seu perímetro, até próximo da extremidade superior dos vasos. Com o conjunto pronto, água foi adicionada à areia até sua saturação.

A **Tabela 1** lista as várias propriedades e relações físicas, enquanto a **Tabela 2** apresenta os parâmetros do refrigerador cerâmico usado neste trabalho.

Refrigerador evaporativo de cerâmica

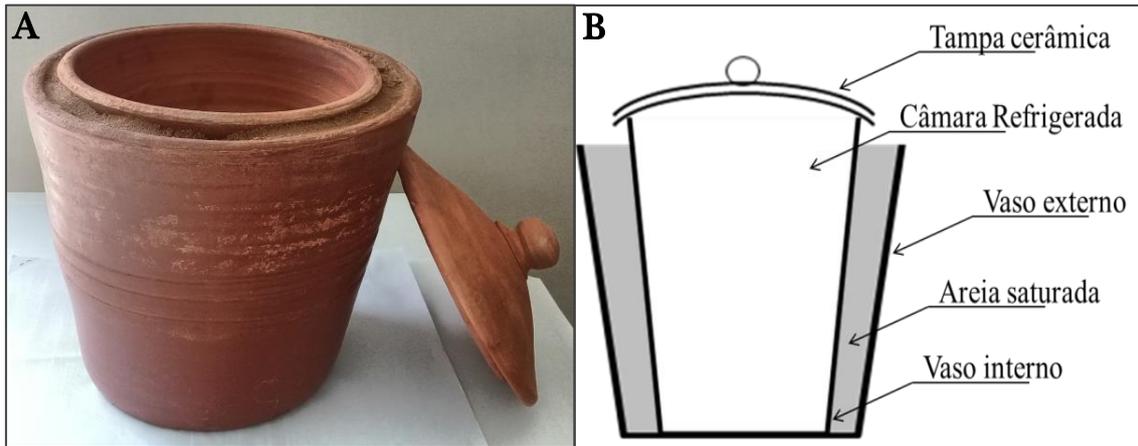


Figura 1. O refrigerador cerâmico: **A.** Foto do protótipo construído; **B.** Diagrama esquemático.

Tabela 1. Parâmetros físicos do refrigerador cerâmico.

Vaso interno	
Raio médio	18 cm
Altura	18 cm
Massa (seca/saturada)	3065 g/3478 g
Calor específico	0.938 J/kg.°C
Vaso externo	
Raio médio	23 cm
Altura	36 cm
Área externa	5199 cm ²
Massa (seca/saturada)	5888 g/6720 g
Calor específico	0.938 J/kg.°C
Areia úmida	
Massa (seca/saturada)	2500 g/3565 g
Calor específico	4.2 J/kg.°C

Tabela 2. Propriedades físicas dos materiais envolvidos.

Propriedades	Valores
Latente de vaporização (λ)	2257.2 J/g
Massa molar da água (M)	18.02 g/mol
Constante Universal dos Gases (R)	82.05 cm ³ .atm/mol.K

A condução do experimento

Foram monitoradas as temperaturas (°C) e umidades do ar (%) dos ambientes interno e externo ao refrigerador. Para isso foram utilizados dois termohigrômetros com *data loggers*, idênticos, da marca Testo, modelo 174H, que operam para a UR na faixa de 0% a 100%, com precisão de $\pm 3\%$ e resolução de 0.1%, e para a temperatura na faixa de -20.0 °C a 70.0 °C, com precisão de ± 0.5 °C e resolução de 0.1°C.

Os termohigrômetros foram configurados para registrar os valores da temperatura e da UR a cada 1.0 min, durante 14 dias, as duas últimas semanas do mês de julho de 2019, de 15 a 28 de julho de 2019. Após esse período apenas a temperatura e umidade do ambiente externo continuaram a ser registradas até o mês de setembro de 2019. Os dados do mês de julho foram utilizados para a calibração do modelo matemático enquanto que os dados do mês setembro, período mais seco e quente na região, foram utilizados, junto ao modelo matemático, para estimar o desempenho do refrigerador nessas condições.

Durante todo o período em que o refrigerador foi monitorado, para manter a saturação do conjunto, água foi adicionada no espaço entre os vasos a cada 6 h.

O modelo teórico

Para o modelo simplificado teórico é considerada uma fase, através da qual ocorrem as transferências de calor e de massa, entre a interface do conjunto com o ambiente, a superfície w-w, se estendendo até a superfície imaginária $\infty-\infty$, conforme **Figura 2** (Date & Damle 2015).

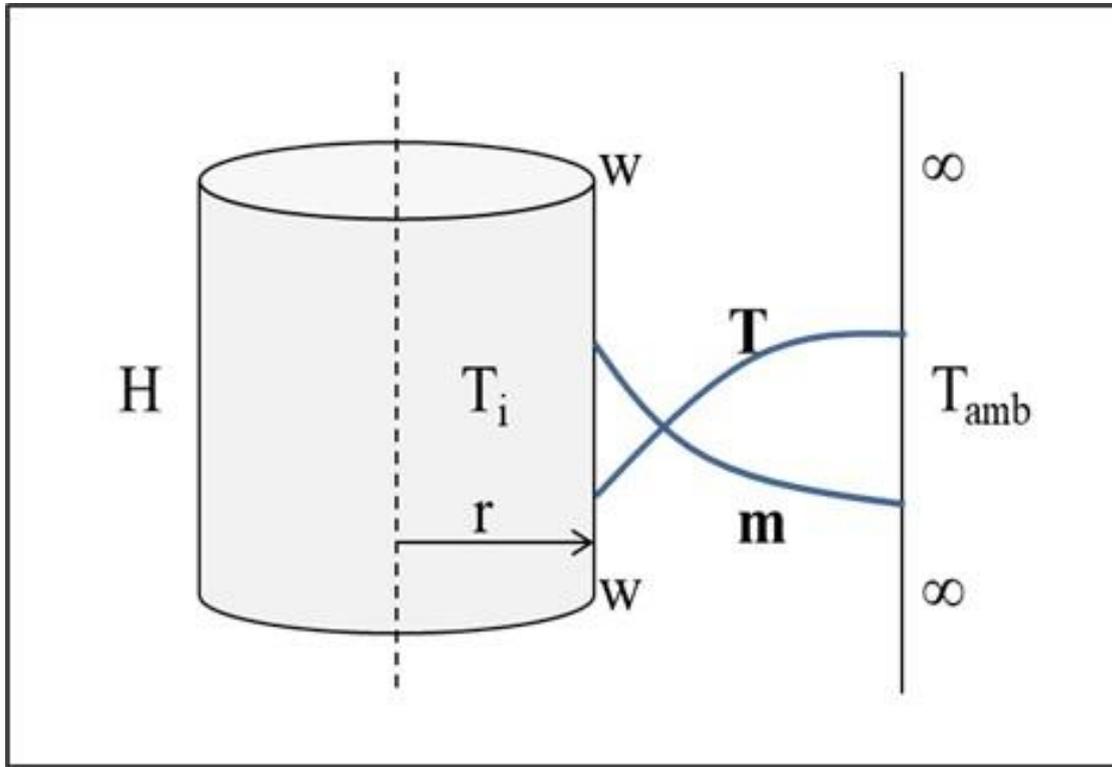


Figura 2. O modelo simplificado do refrigerador cerâmico.

As principais suposições para esse modelo que descreve o resfriamento do vaso cerâmico, são (Mittal *et al.* 2006):

- (1) as temperaturas, superficial (T_s) e interna (T_i), do conjunto são iguais em qualquer instante;
- (2) as propriedades térmicas do conjunto são independentes da temperatura;
- (3) o meio poroso, areia e cerâmica, permanece saturado durante todo o experimento;
- (4) a superfície w-w é considerada completamente saturada, UR = 100%;
- (5) a taxa de evaporação da água é constante durante o intervalo de tempo entre as reposições de água ao conjunto;
- (6) as trocas de calor pela tampa são negligenciadas.

A origem do resfriamento do refrigerador cerâmico está no calor latente de evaporação da água transportada por difusão do interior, através da parede cerâmica porosa do vaso externo, até a superfície do conjunto. Durante a secagem é necessário um fornecimento de calor para evaporar a umidade do material e também deve haver um sorvedor de umidade para remover o vapor água formado (Park *et al.* 2014).

A energia para a evaporação da película de água na superfície externa do conjunto é obtida, principalmente, do próprio vaso, o que resfria o conjunto. Levada pela fase considerada, para além da superfície $\infty-\infty$, com o vapor d'água na corrente de ar, essa energia é removida do

Refrigerador evaporativo de cerâmica

refrigerador a uma taxa proporcional à diferença de concentração do vapor d'água entre as duas superfícies que limitam a fase considerada.

A concentração do vapor d'água $c = m/V$ (razão entre a massa m de vapor de água e o volume V do ar), obtida a partir da Lei dos Gases Ideais, equação 1, e da definição de Umidade Relativa, equação 2, é dada pela equação 3:

$$P \cdot V = \frac{m}{M} \cdot R \cdot T \quad (\text{Equação 1})$$

$$UR = \frac{P}{P_{Sat}} \cdot 100 \quad (\text{Equação 2})$$

$$c = \frac{UR \cdot P_{Sat} \cdot M}{R \cdot T \cdot 100} \quad (\text{Equação 3})$$

onde, UR , P_{Sat} , M , R e T , correspondem, respectivamente, à umidade relativa do ar, à pressão de vapor de saturação, à massa molar da água, à constante universal dos gases e à temperatura.

A suposição da saturação do ar junto ao corpo, superfície w-w, sendo $c_{s(T_s)}$ a concentração de vapor d'água nesta, na temperatura superficial T_s do refrigerador, simplifica significativamente o tratamento teórico do processo de resfriamento evaporativo (Zalewski & Gryglaszewski 1997). Assim, a diferença de concentração do vapor d'água entre a superfície w-w, à temperatura T_s , e a superfície $\infty-\infty$, à temperatura T_{amb} , superfícies que limitam a fase considerada, pode ser encontrada por:

$$(c_{s(T_s)} - c_{amb}) = \frac{M \cdot P_{Sat}(T_{amb})}{R \cdot T_{amb}} \left(\frac{P_{Sat}(T_s)}{P_{Sat}(T_{amb})} \frac{T_{amb}}{T_s} - \frac{UR_{amb}}{100} \right) \quad (\text{Equação 4})$$

sendo $P_{Sat}(T_{amb})$ e $P_{Sat}(T_s)$ as pressões de saturação de vapor d'água no ar para, respectivamente, à temperatura do ar ambiente e à temperatura da superfície do refrigerador. Essas pressões podem ser estimadas, com uma boa aproximação, pela equação empírica de Tetens, equação 5, onde a temperatura T é dada em graus Celsius ($^{\circ}\text{C}$) (Luikov & Mikhaylov 1965):

$$P_s = 610,8 \cdot e^{\frac{17,3 \cdot T}{237,3 + T}} \quad (\text{Equação 5})$$

A taxa de transferência do calor latente de evaporação da água presente na superfície do corpo, ϕ_m , sendo λ o calor latente de vaporização da água, pode ser estimada a partir da avaliação da massa de água evaporada, Δm , no intervalo de tempo determinado, Δt , conforme equação 6:

$$\phi_m = \lambda \frac{\Delta m}{\Delta t} \quad (\text{Equação 6})$$

No entanto, a taxa líquida de calor trocada entre o refrigerador e o ambiente, ao resultar em variação da temperatura do mesmo, é dada em termos de fluxo de calor sensível por:

$$\rho_{ef} \cdot c_{p,ef} \cdot V \cdot \frac{dT_i}{dt} = -\phi_{ext} \quad (\text{Equação 7})$$

onde ϕ_{ext} é o fluxo de calor líquido com o meio externo na superfície do corpo, ρ_{ef} é a densidade efetiva, $c_{p,ef}$ é a capacidade térmica efetiva, V o volume e T_i a temperatura do corpo. A quantidade $\rho_{ef} \cdot c_{p,ef} \cdot V$, para este modelo, pode ser expressa por:

$$\rho_{ef} \cdot c_{p,ef} \cdot V = m_c \cdot c_c + m_a \cdot c_a \quad (\text{Equação 8})$$

Refrigerador evaporativo de cerâmica

como função das massas, m_c e m_a , e dos calores específicos, c_c e c_a , dos vasos cerâmicos e da areia saturada, respectivamente.

Assim, embora a temperatura do refrigerador não seja uniforme, o seu valor médio, adotado por simplificação, está diretamente vinculado ao seu centro. Portanto, o refrigerador cerâmico foi modelado como um sistema de temperatura uniforme T_i e capacidade térmica, $m_c \cdot c_c + m_a \cdot c_a$, resfriado a uma taxa dada por ϕ_{ext} , taxa líquida de calor trocada entre o refrigerador e o ambiente. Motor da variação da temperatura no refrigerador, essa taxa é resultado do balanço entre as taxas de transferência do calor latente de evaporação da água presente na superfície do corpo, ϕ_m , de dentro para fora, e a de transferência de calor devido à diferença de temperatura, ϕ , de fora para dentro, entre as superfícies w-w e $\infty-\infty$, expressos na equação 9:

$$\phi_{ext} = \phi_m + \phi \quad (\text{Equação 9})$$

Estimados conforme a equação 6, para ϕ_m , e a equação 7, para ϕ , é possível estimar os valores do coeficiente de transferência convectiva de massa, $k_{f,ext}$, e do coeficiente de película, h_{ext} , respectivamente pelas equações 10 e 11:

$$\phi_m = \lambda \cdot k_{f,ext} \cdot A_{ext} \cdot (c_{s(T_s)} - c_{amb}) \quad (\text{Equação 10})$$

e

$$\phi = h_{ext} \cdot A_{ext} \cdot (T_i - T_{amb}) \quad (\text{Equação 11})$$

O coeficiente de transferência convectiva de massa está associado à facilidade da umidade se difundir na convecção do ar, da superfície do conjunto até o ambiente. Na equação 10, com base na Equação de Difusão da Massa, o calor de vaporização da água, λ , transforma a equação de transferência de massa em transferência de energia, em função da área da interface, A_{ext} e da diferença de concentração do vapor d'água junto à superfície do corpo e no ambiente (Livi 2004).

O coeficiente de película expressa a taxa de transferência de calor entre uma superfície sólida e um fluido por unidade de área de superfície, por unidade de diferença de temperatura. Na equação 11, derivada da Equação de Transferência de Calor, a taxa de transferência de calor na interface sólida é diretamente proporcional ao produto da área dessa interface pela diferença de temperatura entre a parede do sólido e o ambiente (Sisson & Pitts 1996; Vafai 2005).

A multiplicidade de variáveis independentes associadas aos valores dos coeficientes de transferência convectiva de massa e de película conduz à adoção de uma série de hipóteses simplificativas, sendo possível encontrar na literatura uma grande variedade de correlações empíricas, aplicadas a situações específicas, para esses coeficientes (Garcia *et al.* 2017).

Neste trabalho foi adotada a hipótese, conforme Mittal *et al.* (2006), de uma relação entre os coeficientes de transferência de calor e de massa com a umidade relativa do ar. Assim, os coeficientes de transferência de massa e calor, exigidos para a elaboração do modelo, foram estimados, em função dos valores da UR ambiental, a partir dos valores experimentais.

Enfim, estabelecida a relação entre esses coeficientes e a umidade relativa do ar para o refrigerador em questão, foi desenvolvido o modelo matemático simplificado em planilha eletrônica para descrever a evolução da temperatura do refrigerador cerâmico sob condições climáticas dinâmicas.

As condições climáticas do experimento

O experimento foi conduzido na cidade de Cuiabá, MT, no Instituto de Física da Universidade Federal de Mato Grosso. O clima da região classifica-se como Aw, de acordo com a classificação climática de Köppen, com duas estações bem definidas: úmida, no verão, de outubro até o mês de abril, e seca, no inverno, de maio até setembro, uma característica dos climas tropicais úmidos (Paes de Barros 2018).

Durante a seca ocorrem períodos de curta duração com temperaturas baixas, de maio a julho, em média, geralmente provocados pela influência de massas de ar polares que conseguem atingir o interior do continente. O final do período de estiagem é caracterizado pela baixa umidade relativa do ar, com um valor médio diário de 60% e mínimo inferior a 30%, e elevadas temperaturas do ar, com máximas diárias acima de 40°C por dias seguidos (INMET 2019).

Para a elaboração do modelo teórico do refrigerador foram utilizados os registros, do refrigerador e do ambiente, produzidos durante a primeira semana de medições do mês de julho de 2019. As previsões do comportamento térmico do refrigerador foram realizadas a partir dos registros das condições ambientais da segunda semana de medições do mês de julho, mês de menor temperatura média diária, e do mês de setembro, quando as maiores temperaturas máximas diárias são registradas.

Resultados e Discussão

Os coeficientes de película, h_{ext} , e de transferência convectiva de massa, $k_{f,ext}$

A **Figura 3** apresenta os diagramas de dispersão e as respectivas equações obtidas a partir da correlação linear simples dos coeficientes de transferência convectiva de massa, $k_{f,ext}$, e de película, h_{ext} , como funções da UR e as respectivas equações, uma correlação linear forte entre as variáveis a partir dos dados experimentais (Costa 1998). Essa estatística, expressa pelo coeficiente de determinação, R^2 , estabelece a força da relação entre dois conjuntos de valores, quantificando a variação da variável y que pode ser explicada pela variação da variável x (Montgomery & Runger 2012).

Na faixa dos valores ambientais da UR de 35 a 58%, durante o experimento, o coeficiente de transferência convectiva de massa assumiu valores entre 0.79 e 0.97 $W.m^{-2}.K^{-1}$, enquanto que o coeficiente de película variou 0.00144 a 0.00201 $m.s^{-1}$. Esses valores são comparáveis aos encontrados por Mittal *et al.* (2006), em experimento com refrigerador *pot-in-pot*, submetido a redução da UR ambiental, em estado estacionário, de 60 para 15%, quando o coeficiente de transferência convectiva de massa diminuiu de 1.06 para 0.44 $W.m^{-2}.K^{-1}$ e o coeficiente de película assumiu valores de 0.00110 a 0.00165 $m.s^{-1}$, com coeficientes de determinação, R^2 , respectivamente iguais a, 0.984 e 0.960, considerados, pelos autores, como uma representação muito boa dos dados experimentais.

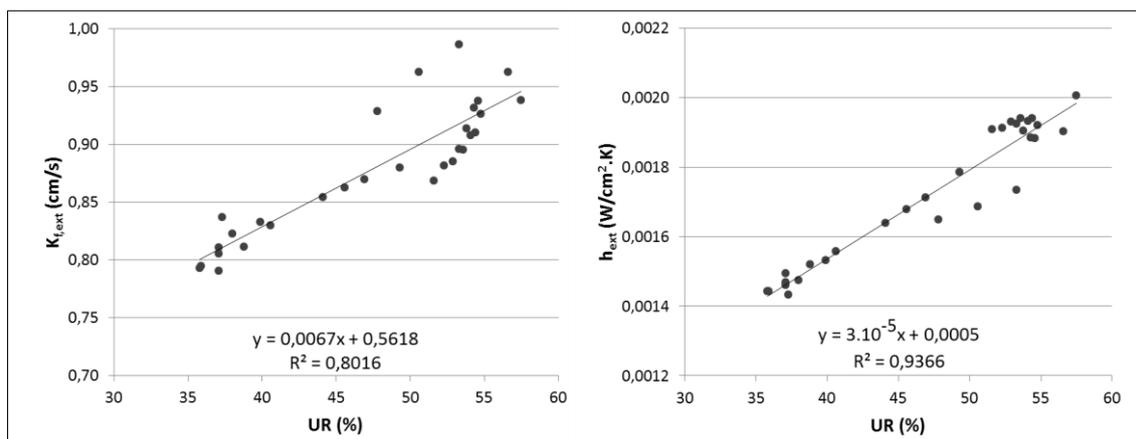


Figura 3. Variação do coeficiente de transferência convectiva de massa do refrigerador ($k_{f,ext}$) com a umidade do ar e variação do coeficiente de película do refrigerador (h_{ext}) com a umidade do ar.

O modelo matemático

A evolução da temperatura do modelo matemático do refrigerador comparativamente a evolução da temperatura do refrigerador, e as respectivas diferenças entre essas, minuto a minuto, são apresentadas na **Figura 4**. O desvio entre os dados experimentais da temperatura no

interior do refrigerador e os valores teóricos previstos no modelo produzido foi de, no máximo, 0,4°C, e podem estar associados a modificações no valor do coeficiente de película, pela movimentação de pessoas no entorno do experimento, uma vez que na convecção natural o escoamento do fluido ocorre a velocidades baixas (Garcia *et al.* 2017). Contudo, essa diferença é significativamente baixa, de forma que é possível sugerir que o modelo matemático simplificado representa adequadamente o comportamento do sistema objeto de análise.

Dash & Chandra (2001) encontraram um desvio médio entre as temperaturas medidas e previstas de 1,4°C em um modelo matemático para prever os efeitos de uma estrutura de armazenamento resfriada por evaporação de 1 m³ de volume para produtos hortícolas. Esse modelo computacional utilizou análise térmica de elementos finitos transitórios para estimar a temperatura do ar na estrutura.

Utilizando o modelo de van der sman (2003), Mittal *et al.* (2006), apesar da diferença inicial entre 1,4 e 1,2°C, entre os valores experimentais e previstos, afirmam que o modelo capturou a tendência da variação experimental da temperatura do refrigerador. Os erros absolutos médios entre os valores previstos e medidos estiveram entre 0,1 e 0,3°C.

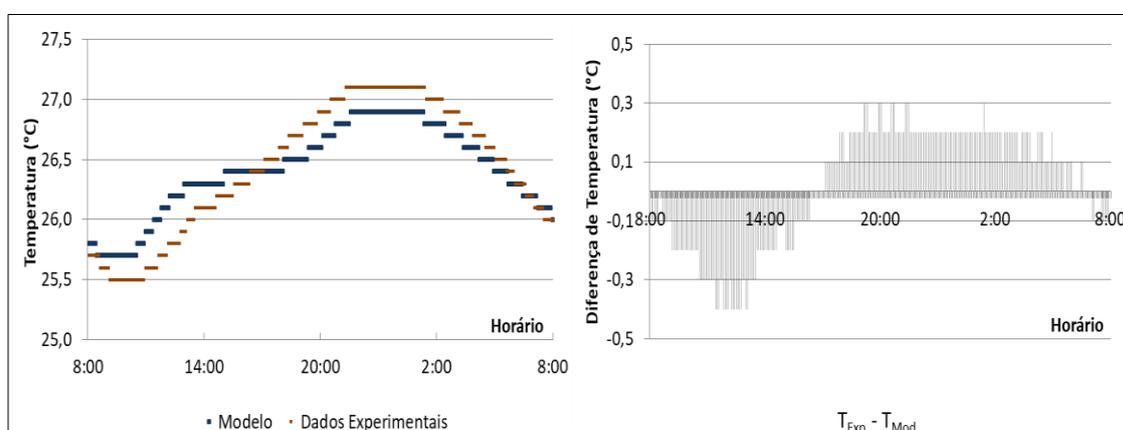


Figura 4. Evolução das temperaturas e das diferenças entre as temperaturas do refrigerador e do modelo matemático ao longo de um dia.

Previsão da evolução da temperatura no refrigerador

O modelo matemático foi utilizado para avaliar a capacidade de refrigeração do refrigerador cerâmico sob duas condições: de temperaturas e umidades médias, ao final do mês de julho, e de temperaturas elevadas e umidades reduzidas, características ambientais do mês de setembro. As referências citadas acima têm por base as condições climáticas do período seco do centro-oeste brasileiro.

Para as condições climáticas do mês de julho, com temperaturas variando entre 27,3 e 31,3°C, com uma média de 29,6°C, e umidade relativa variando entre 38,0 e 60,3%, com uma média de 52,3%, o modelo estimou uma refrigeração máxima de 4,8°C, que ocorreu por volta das 16 h (Figura 5).

A temperatura mínima prevista para o refrigerador foi de 25,6°C, uma temperatura média de 26,5°C para uma variação de apenas 1,4°C, enquanto a temperatura ambiente variou em 4,0°C. Dutt (2016) destaca a estabilidade da temperatura no espaço de armazenamento para este tipo de refrigerador, apesar da variação da temperatura ambiente.

O melhor desempenho do refrigerador aconteceu entre as 10 h e 18 h, período do dia em que ocorrem as menores umidades e maiores temperaturas do ar. Para Ndukwu (2011), a proximidade das temperaturas da câmara de armazenamento do refrigerador e do ambiente, a partir de 18 h às 6 h, implica que nenhum resfriamento significativo pode ser alcançado nesse período. Essa constatação se deve ao fato do refrigerador funcionar pelo princípio da refrigeração passiva, respondendo, com certo atraso, às variações das condições ambientais.

Refrigerador evaporativo de cerâmica

Assim, a redução de temperatura inicial está associada às menores temperaturas que ocorrem no início da manhã, quando, no balanço de energia, a transferência de calor resultante da evaporação da água superficial do corpo deve ter prevalecido. Em seguida, por volta das 9 h, a temperatura do refrigerador inverte de tendência, quando passa a prevalecer a transferência de calor do ar circundante para o conjunto, devido à diferença de temperatura entre estes.

Para as condições climáticas do mês de setembro, a temperatura mínima prevista para o refrigerador foi de 25,6°C, uma temperatura média é de 27,2°C para uma variação de apenas 2,7°C, enquanto a temperatura ambiente variou em 12,3°C. Com a temperatura ambiental variando entre 27,9°C e 40,2°C, com uma média de 33,5°C, e umidade relativa ambiental variando entre 19,5% e 50,9%, com uma média de 35,5%, o modelo estimou uma refrigeração máxima de 12,1°C, que ocorreu por volta das 16 h (**Figura 6**).

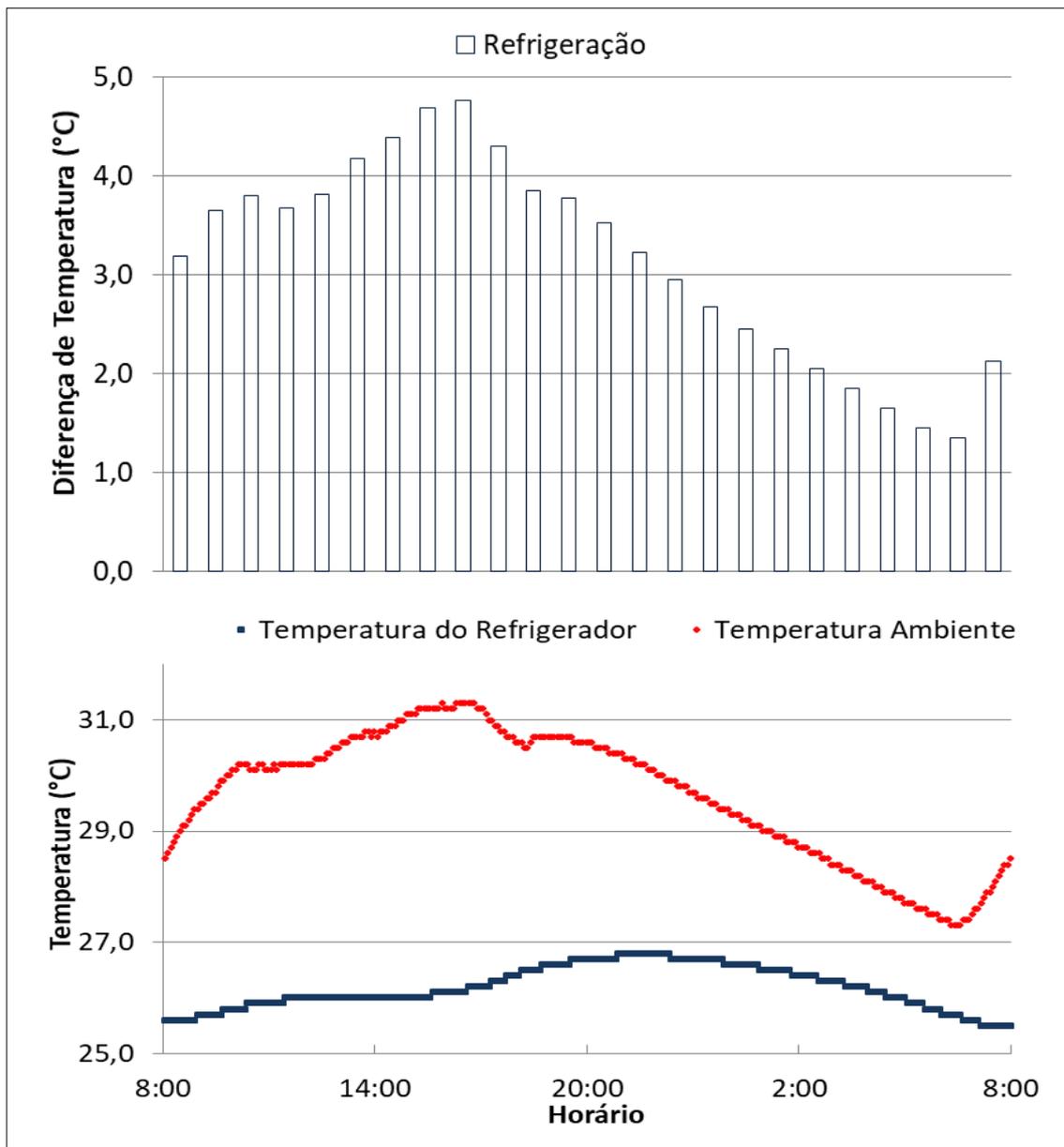


Figura 5. Avaliação da temperatura do refrigerador prevista conforme condições climáticas do mês de julho de 2019.

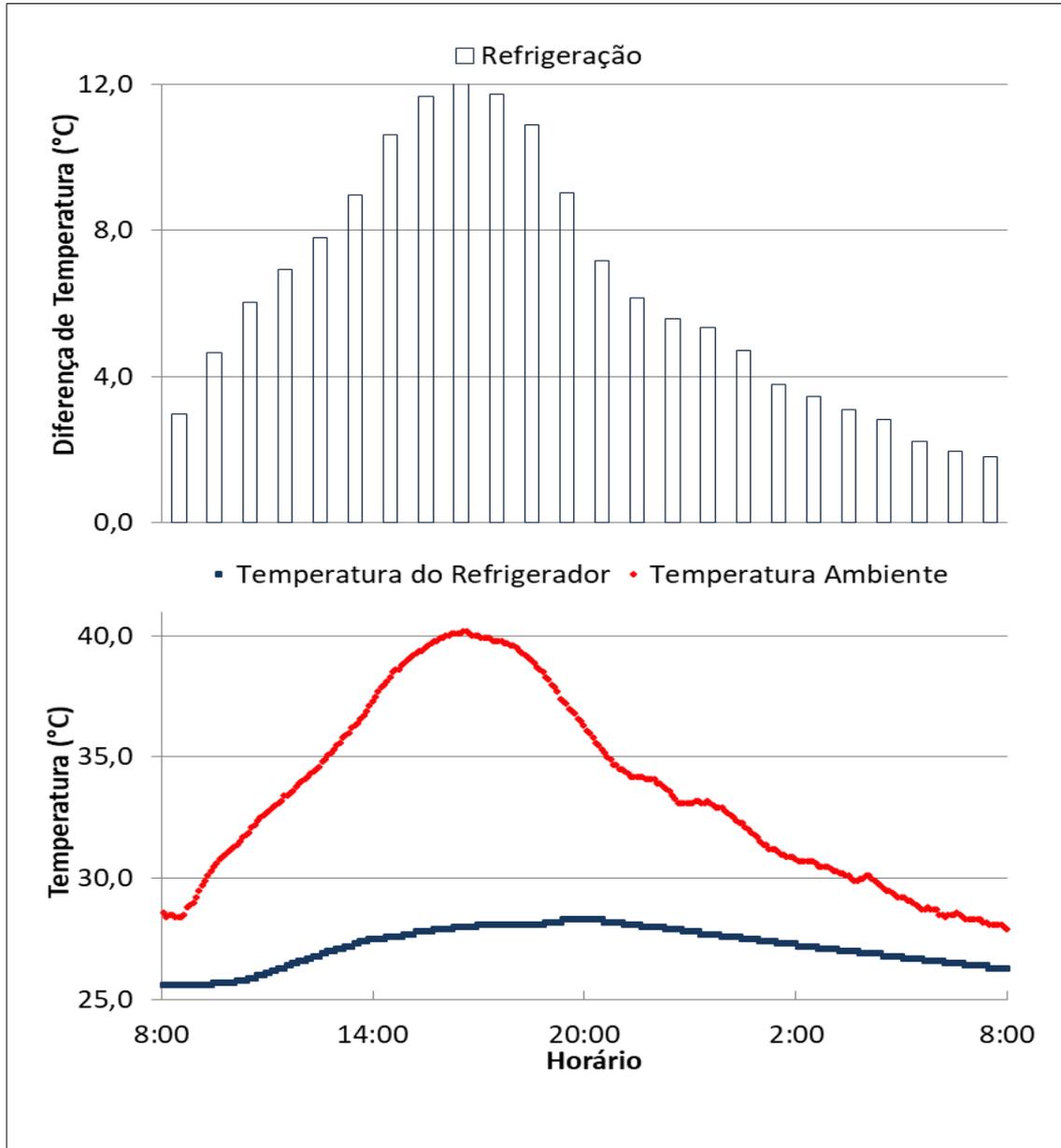


Figura 6. Avaliação da temperatura do refrigerador prevista conforme condições climáticas do mês de setembro de 2019.

Esses resultados são semelhantes aos encontrados na literatura sobre refrigeradores cerâmicos passivos. [Aimiwwu \(1992, 1993\)](#), em trabalho com vaso cerâmico nas condições do verão nigeriano, encontrou temperaturas variando entre 9,4°C a 15,0°C abaixo da temperatura ambiente. Com o mesmo tipo de refrigerador, [Dut \(2016\)](#) encontrou uma variação de $\pm 1,4^{\circ}\text{C}$ em torno de uma temperatura média de 25,2°C em uma situação em que a temperatura ambiente apresentou uma variação de $\pm 3,2^{\circ}\text{C}$ em torno de um valor médio de 27,6°C.

[Ndukwu \(2011\)](#) mostrou que o resfriador evaporativo pode reduzir a temperatura para valores entre 24°C e 29°C, aumentando a umidade relativa do ar na câmara de armazenamento de 40% para 92%, em uma situação em que a temperatura ambiente variou entre 32°C e 40°C, uma redução de temperatura de até 10°C.

Em condições tropicais da cidade de Calcutá, Índia, [Mittal et al. \(2006\)](#) utilizando um protótipo de câmara de refrigeração por evaporação (*Evaporatively Cooled Chamber ECC*) durante uma tarde de maio de 2004, quando a temperatura ambiente variou entre 34,5°C e 35°C,

o efeito de resfriamento atingiu um máximo de 7°C entre 15 h e 15:30 h e depois caiu para 4.5°C por volta das 18 h. No mesmo trabalho, em experimento em estado estacionário com o vaso cerâmico, para uma temperatura ambiente mantida constante em 23°C, encontrou-se que o efeito de resfriamento devido à evaporação, representado pela diferença entre a temperatura ambiente e a temperatura no refrigerador, aumentou de 4.7 para 8.3°C, pela redução gradual da UR de 60% para 15%, o que, segundo os autores, mostra a influência crítica da UR ambiente na redução da temperatura no refrigerador.

Essa influência também aparece nos resultados do protótipo objeto deste estudo, quando comparamos os resultados em termos de refrigeração alcançados nos meses de julho e setembro, maiores neste último, função das condições mais extremas desta estação. Também é possível destacar a maior eficiência do refrigerador no período vespertino, condição de maior temperatura e menor umidade do ar do dia, credenciando a sua aplicação em diversas situações nas condições ambientais de grande parte do território brasileiro. No entanto, essa alta dependência das condições atmosféricas do ar, a força motora do resfriamento evaporativo, limitadora da capacidade de arrefecimento de um sistema, também é a principal desvantagem desse processo (Date 2012).

Conclusão

Neste estudo, experimentos em regime dinâmico foram realizados para investigar o desempenho, em termos da refrigeração produzida, de um refrigerador cerâmico, do tipo *pot-in-pot cooler*, em condições ambientais da estação seca do centro-oeste brasileiro.

Adotando a hipótese de uma relação entre os coeficientes de transferência de calor e de massa com a umidade relativa do ar, esses coeficientes de transferência, exigidos para a elaboração do modelo, foram estimados, em função dos valores da UR ambiental, a partir dos valores experimentais. Para a faixa dos valores ambientais da UR de 35 a 58%, durante o experimento, o coeficiente de transferência convectiva de massa assumiu valores entre 0.79 e 0.97 W.m⁻².K⁻¹, enquanto que o coeficiente de película variou 0.00144 a 0.00201 m.s⁻¹, com coeficiente de determinação, R², respectivamente iguais a, 0.8016 e 0.9366, uma correlação linear forte entre as variáveis a partir dos dados experimentais.

O modelo matemático simplificado desenvolvido foi considerado como adequado para descrever a evolução da temperatura do refrigerador, em condições ambientais dinâmicas, com base nas diferenças verificadas, de no máximo 0.4°C, entre os dados experimentais e os teóricos produzidos pelo modelo. O resultado credencia o modelo para utilização em projetos de câmaras refrigeradas por evaporação para condicionar ambientes.

A refrigeração obtida na simulação, de até 12.1°C, ainda confirma descobertas anteriores na literatura de que um efeito de resfriamento de vários graus Celsius pode ser realizado através do resfriamento evaporativo e esse efeito será potencializado em um ambiente mais seco e quente.

Agradecimentos

Aos avaliadores pelas críticas ao manuscrito.

Referências

- Aimiwwu V.O. (1992) Evaporative cooling of water in hot arid regions. *Energy Conversion and Management*, 33(1): 69–74. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(92\)90148-P](https://doi.org/10.1016/0196-8904(92)90148-P)
- Aimiwwu V.O. (1993) Ceramic storage system based on evaporative cooling. *Energy Conversion and Management*, 34(8): 707–710. [https://doi.org/10.1016/0196-8904\(93\)90106-K](https://doi.org/10.1016/0196-8904(93)90106-K)
- Chaudhari B.D., Sonawane T.R., Patil S.M. & Dube A. (2015) A Review on Evaporative Cooling Technology. *International Journal of Research in Advent Technology*, 3(2): 88–96.

- Chemin A., Vehel V.D., Caussarieu A., Plihon N. & Taberleta N. (2018) Heat transfer and evaporative cooling in the function of pot-in-pot coolers. *American Journal of Physics*, 86(3): 206–211. <https://doi.org/10.1119/1.5016041>
- Costa S.F. (1998) Introdução Ilustrada à Estatística. 2ª edição. São Paulo: Harbra. 303 p.
- Dash S.K. & Chandra P. (2001) Effects of different structural and operational parameters on the thermal environment of an evaporatively cooled storage structure. *International Agricultural Engineering Journal*, 10(3-4): 231–253.
- Date A.W. (2012) Heat and Mass transfer analysis of a clay-pot refrigerator. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 55: 3977–3983. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2012.03.028>
- Date A.W. & Damle R.M. (2015) Heat and Mass Transfer in a Clay-Pot Refrigerator: Analysis Revisited. *Journal of Energy, Heat and Mass Transfer*, 37: 11–25.
- Dutt P.S. (2016) Experimental comparative analysis of clay pot refrigeration using two different designs of pots. *International Journal of Latest Research in Engineering and Technology*, 2(2): 30–35.
- Fouda A. & Melikyan Z. (2011) A simplified model for analysis of heat and mass transfer in a direct evaporative cooler. *Applied Thermal Engineering*, 31(5): 932–936. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2010.11.016>
- Garcia R.L., Zabadal J., Amaral R.A., Neto J.A.D.G. & Schmitz A. (2017) Transferência de calor e massa: Fusão de uma placa de gelo. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 39(3): 3502.1–3502.8. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2016-0280>
- Givoni G. (2011) Indoor Temperature Reduction by Passive Cooling Systems. *Solar Energy*, 85(8): 1692–1726. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2009.10.003>
- Harish H. & Gowda Y.K. (2014) Thermal analysis of clay pot in pot refrigerator. *International Journal of Modern Engineering Research*, 4: 50–55.
- He J. & Hoyano A. (2010) Experimental study of cooling effects of a passive evaporative cooling wall constructed of porous ceramics with high water soaking-up ability. *Building and Environment*, 45(2): 461–472. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2009.07.002>
- Hsu C.T. (2005) Dynamic Modeling of Convective Heat Transfer in Porous Media (p. 39–80). In: Vafai K. (Org.). *Handbook of Porous Media*. Boca Raton: Taylor & Francis. 959 p. <https://doi.org/10.1201/9780415876384.ch2>
- Ibrahim E., Shao L. & Riffat S.B. (2003) Performance of Porous Ceramic Evaporators for Building Cooling Application. *Energy and Buildings*, 35(9): 941–949. [https://doi.org/10.1016/S0378-7788\(03\)00019-7](https://doi.org/10.1016/S0378-7788(03)00019-7)
- INMET (2019) Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa da estação de Cuiabá, MT. Código OMM: 83361.
- Joshi V.V., Tiwari M. & Rao A.S. (2018) Experimental investigations to reduce unwanted evaporative losses of drinking water from a clay pot. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 377: 1–5.
- Krüger E.L., Lange S.C., Fernandes L. & Rossi F. (2016) Avaliação do Potencial de Resfriamento de um Sistema Tetoreservatório para Condições Subtropicais. *Ambiente Construído*, 16(3): 107–125. <http://dx.doi.org/10.1590/s1678-86212016000300095>
- Leite F.B. (1954) Cerâmica popular do nordeste. *Revista Brasileira de Geografia*, out/dez: 111.
- Livi C.P. (2004) Fundamentos de Fenômenos de Transporte. 3ª edição. Rio de Janeiro: LTC. 224 p.
- Luikov A.V. & Mikhaylov Y.A. (1965) Theory of Energy and Mass Transfer. Oxford: Pergamon Press. 392 p.
- Mittal A., Katariaa T., Dasb G.K. & Chatterjeea S.G. (2006) Evaporative cooling of water in a small vessel under varying ambient humidity. *International Journal Green Energy*, 3(4): 1–42. <https://doi.org/10.1080/01971520600704654>
- Montgomery D.C. & Runger G.C. (2012) Estatística aplicada e probabilidade para engenheiros. 5ª edição. Rio de Janeiro: LTC Editora. 652 p.
- Ndukwu M.C. (2011) Development of Clay Evaporative Cooler For Fruits and Vegetables Preservation. *Agriculture Engineering International: CIGR Journal*, 13(1): 1–6.

- Ndukwu M.C., Manuwa S.I., Olukunle O.J. & Oluwalana I.B. (2013) Development of an active evaporative cooling system for short-term storage of fruits and vegetable in a tropical climate. *Agricultural Engineering International: CIGR Journal*, 15: 307–313.
- Paes de Barros M. (2018) Identifying the Popular References of Rainfall Prediction in Observed Precipitation Trends in the Brazilian Savanna. *International Journal of Recent Scientific Research*, 9(4): 26425–26431.
- Paes de Barros M. (2020) Resfriamento Evaporativo da Água em um Refrigerador de Vaso Cerâmico: estudo experimental da transferência de calor e massa. *Revista Brasileira de Ensino de Física*, 42: 124.1–124.7. <https://doi.org/10.1590/1806-9126-rbef-2020-0124>
- Park K.J.P., Park K.J., Alonso L.F.T., Cornejo F.E.P. & Fabbro I.M.D. (2014) Secagem: Fundamentos e Equações. *Revista Brasileira de Produtos Agroindustriais*, 16(1): 93–127. <https://doi.org/10.15871/1517-8595/rbpa.v16n1p93-127>
- Sisson L.E. & Pitts D.R. (1996) Fenômenos de Transporte. Rio de Janeiro: Guanabara Dois. 765 p.
- Taha A.Z., Rahim A.A.A. & Eltom O.M. (1994) Evaporative cooler using a porous material to be used for reservation of food. *Renewable Energy*, 5(1): 474–476. [https://doi.org/10.1016/0960-1481\(94\)90417-0](https://doi.org/10.1016/0960-1481(94)90417-0)
- Vafai K. (2005) Handbook of Porous Media. 3ª edição. Boca Raton: Taylor and Francis. 959 p.
- van der Sman R.G.M. (2003) Simple model for estimating heat and mass transfer in regular-shaped foods. *Journal of Food Engineering*, 60: 383–390. [https://doi.org/10.1016/S0260-8774\(03\)00061-X](https://doi.org/10.1016/S0260-8774(03)00061-X)
- Zalewski W. & Gryglaszewski P.A. (1997) Mathematical model of heat and mass transfer processes in evaporative fluid coolers. *Chemical Engineering and Processing*, 36: 271–280. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(97\)00006-8](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(97)00006-8)