

LICENÇA



Este trabalho está licenciado sob uma licença [Creative Commons Attribution-NonCommercial 4.0 International License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/). Fonte:

<https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/3269>. Acesso em: 26 fev. 2024.

Referência

CARVALHO, Danilo Vieira de; SANT'ANA, Daniel. Uma revisão abrangente dos modelos de oferta de água condensada de ar condicionado. **Observatório de la Economía Latinoamericana**, Curitiba, v. 22, n. 2, p. e3269, 2024. DOI: 10.55905/oelv22n2-120. Disponível em: <https://ojs.observatoriolatinoamericano.com/ojs/index.php/olel/article/view/3269>. Acesso em: 26 fev. 2024.

Uma revisão abrangente dos modelos de oferta de água condensada de ar condicionado

A comprehensive review of air-conditioning condensed water supply models

Una revisión exhaustiva de los modelos de suministro de agua condensada para aire acondicionado

DOI: 10.55905/oelv22n2-120

Originals received: 01/02/2024

Acceptance for publication: 01/26/2024

Danilo Vieira de Carvalho

Mestrando em Uso e Conservação de Água em Edificações

Instituição: Universidade de Brasília (UNB)

Endereço: Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília – DF, CEP: 70910-900

E-mail: daniloenm@gmail.com

Daniel Sant’Ana

Doutor em Uso e Conservação de Água em Edificações

Instituição: Universidade de Brasília (UNB)

Endereço: Campus Universitário Darcy Ribeiro, Brasília – DF, CEP: 70910-900

E-mail: dsantana@unb.br

RESUMO

Sistemas prediais de água não potável têm o potencial de reduzir consideravelmente o consumo de água, ajudando a preservar os recursos hídricos utilizados no abastecimento urbano. Dentre as fontes alternativas de uso de água não potável em edifícios, destaca-se as águas claras, que apresentam significativa qualidade. A água de condensação de ar condicionado é um tipo de água clara, que geralmente é descartada ao esgoto. Pouco se sabe sobre aplicabilidade de sistemas prediais de aproveitamento de água de condensação de ar condicionado em edificações - especialmente dentro do contexto brasileiro. Para analisar o potencial de redução do consumo de água potável e, conseqüentemente, avaliar a viabilidade da instalação de sistemas de aproveitamento de água de condensação de ar condicionado, torna-se crucial verificar a quantidade de água de condensação de ar condicionado ofertada ou disponível. Com isso, este trabalho tem como objetivo identificar por meio de uma revisão sistemática os modelos de previsão de oferta de água condensada de sistemas de ar condicionado e analisar métodos e variáveis adotados para averiguar sua aplicabilidade dentro do contexto climático brasileiro.

Palavras-chave: conservação de água, sistemas prediais de água não potável, água clara, água de condensação, modelo de previsão.

ABSTRACT

Non-potable water building systems have the potential to significantly reduce water consumption, aiding in the preservation of water resources used in urban supply. Among the alternative sources of non-potable water use in buildings, clear waters stand out due to their considerable quality. Condensate water from air conditioning is a kind of clear water that is typically discarded into the sewage. Little is known about the applicability of building systems for using condensate water from air conditioning in buildings - especially within the Brazilian context. To assess the potential for reducing potable water consumption and consequently evaluate the feasibility of implementing air conditioning condensate recovery systems, it is crucial to determine the quantity of available air conditioning condensate. Therefore, this work aims to identify, through a systematic review, the models for predicting the supply of condensed water in air conditioning systems and analyze methods and variables adopted to investigate their applicability within the Brazilian climate context.

Keywords: conservation of water, building non-potable water systems, clear water, condensate water, predictive model.

RESUMEN

Los sistemas de construcción de agua no potable tienen el potencial de reducir significativamente el consumo de agua, ayudando a preservar los recursos hídricos utilizados en el suministro urbano. Entre las fuentes alternativas para el uso de agua no potable en los edificios, destaca el agua clara, de calidad significativa. El agua de condensación del aire acondicionado es un tipo de agua transparente, que generalmente se desecha en el alcantarillado. Poco se sabe acerca de la aplicabilidad de los sistemas de construcción para el uso de agua de condensación del aire acondicionado en edificios - especialmente en el contexto brasileño. Para analizar el potencial de reducción del consumo de agua potable y, en consecuencia, evaluar la viabilidad de instalar sistemas de recuperación de agua de condensación de aire acondicionado, es crucial verificar la cantidad de agua de condensación de aire acondicionado ofrecida o disponible. Con esto, este trabajo tiene como objetivo identificar mediante una revisión sistemática los modelos de pronóstico de suministro de agua condensada en sistemas de aire acondicionado y analizar los métodos y variables adoptados para determinar su aplicabilidad en el contexto climático brasileño.

Palabras clave: conservación de agua, sistemas de construcción de agua no potable, agua clara, agua condensada, modelo de predicción.

1 INTRODUÇÃO

A crise de abastecimento de água é um produto de uma elevada demanda urbana de água e de mudanças nos regimes pluviais do país. Condições climáticas extremas

associadas à elevada demanda de água potável podem resultar em novas ondas de estresse hídrico pelo Brasil (SANT'ANA e LIMA, 2021). Em 2018, as crises de abastecimento de água enfrentadas por regiões metropolitanas expandiram a discussão de segurança hídrica para áreas de grande concentração populacional. O abastecimento urbano, responsável por cerca de 25% de toda água utilizada no país, tem provocado uma pressão crescente sobre os sistemas produtores de água (ANA, 2020).

Como amostra disso, mais da metade dos municípios brasileiros decretaram situação de emergência ou estado de calamidade pública, por conta de seca ou estiagem, entre 2003 e 2018. Dos casos registrados em 2018, cerca de 43 milhões de pessoas foram afetadas, sendo 5 milhões a mais do que em 2017 (ANA, 2019). O Sistema Cantareira - responsável pelo abastecimento de aproximadamente metade da Região Metropolitana de São Paulo - sofreu a maior crise hídrica da sua história entre os anos de 2014 e 2015. Além disso, uma estiagem assolou a região Sudeste em 2014, pior desde o ano 1930, e a oferta de água reduziu drasticamente (ANA, 2019). Como medidas emergenciais, foi necessário realizar a captação do volume morto dos principais reservatórios, reduzir as pressões da rede urbana de distribuição de água, realizar rodízios de abastecimento de água nas cidades e criar uma política tarifária para a redução do consumo (ANA, 2017).

Em 2016, o Distrito Federal aderiu a um racionamento no abastecimento de água pela primeira vez em sua história, demonstrando a vulnerabilidade de seus sistemas produtores de água. Segundo ADASA (2018), o estresse hídrico desta região foi causado por períodos de secas consecutivas e elevada demanda urbana de água, agravada pelo constante crescimento populacional. Como medida emergencial, a ADASA estabeleceu um regime de rodízio de abastecimento de água e redução nas pressões da rede até a normalização dos níveis dos reservatórios (Resolução ADASA nº 20 de 2016) e, para aumentar o volume de produção de água foram implementados os subsistemas do Lago Paranoá e Ribeirão Bananal (CODEPLAN, 2020).

Os governos das regiões sul e sudeste também passaram por estado de crise hídrica. A cidade de Curitiba adotou medidas de racionamento em março de 2020, e mais outras sete cidades dessas regiões limitaram a disponibilidade de água devido à baixa dos reservatórios (FELLET, 2021). No Sudeste, o Sistema de Cantareira atingiu o nível de

alerta novamente, por apresentar volume abaixo de 40%, quando o esperado seria de 60% (MARI, 2021).

Observa-se, dentro desse cenário de incertezas, a necessidade de se promover ações voltadas à conservação de água nas cidades pelo uso racional e pelo uso de fontes alternativas de água em edificações. Sistemas prediais de água não potável têm sido vistos como opção capaz de promover reduções significativas na demanda urbana de água potável.

Águas claras podem ser caracterizadas como efluentes provenientes de sistemas de resfriamento, sistemas de vapor e de sistemas de destilação (MARQUES e OLIVEIRA, 2014). Em geral, são fontes de água de relativa qualidade e baixa necessidade de tratamento para uso não potável, que vêm sendo descartadas na rede de esgoto sanitário. Dessa forma, dispensar águas claras na rede de esgoto sanitário pode ser considerado um procedimento antiquado em edificações de alto desempenho (LAWRENCE, 2010b), onde a água deve ser considerada uma fonte tão importante quanto a energia especialmente, em um país que a matriz energética é baseada em hidroelétricas (EPE, 2021).

Dentre as águas claras, a descartada de sistemas de ar condicionado podem ser utilizadas como fonte alternativa de água não potável, em sistemas prediais de água (ABNT 16783, 2019). A condensação da água presente no ar é um efeito natural em sistemas de ar condicionado (STOECKER, 1985). Em sistemas de ar condicionado, é comum que a temperatura de resfriamento do ar fique abaixo do ponto de orvalho e, conseqüentemente, ocorre a condensação do ar úmido após passar pelas serpentinas de resfriamento (CREDER, 2004). Assim, essa água de condensação pode ser descartada ou aproveitada (GLAWE et al., 2016).

O aproveitamento da água de condensação é uma alternativa para reduzir a demanda de água potável em edificações. Segundo Lawrence (2010b), os principais fatores a serem considerados para estimar a oferta de água de condensação estão relacionados ao clima local, ao tipo de ar condicionado e o uso dos ambientes da edificação. Com isso, este trabalho tem como objetivo identificar os modelos de previsão de oferta de água condensada de sistemas de ar condicionado e analisar os métodos e

variáveis utilizadas para averiguar sua aplicabilidade dentro do contexto climático brasileiro.

2 MÉTODO

Para alcançar o objetivo proposto realizou-se uma revisão sistemática, utilizada para uma análise de modelos de previsão de água de condensação quanto a variáveis e métodos adotados.

Para a revisão sistemática realizou-se uma busca exploratória por termos recorrentes da área de estudo. Por meio desses, foi realizada busca nas bases referenciais selecionada - Web of Science e ProQuest - utilizando combinação desses termos na língua inglesa.

Na Web of Science, o protocolo de busca adotado foi estruturado pela combinação de termos no título (TI) e no resumo (AB). Dessa maneira, foram utilizados no título termos relacionados a: água, ar condicionado e recuperação; e no resumo termos como: ar condicionado, água, recuperação e modelo. Foram excluídas do protocolo termos relacionados a: absorção, adsorção; dessalinização; e bomba, sendo assim:

(TI=((water OR HVAC OR "air-conditioning" OR "air handling" OR "vapor compression" OR evaporator) AND (recovery OR produc OR captur* OR generet* OR condensa* OR collection OR extract* OR conservat* OR predict*)) NOT absorption NOT adsorption NOT desalinat* NOT pump)) AND AB=((HVAC OR "air-conditioning" OR "air handling" OR "vapor compression" OR evaporator) AND (predict* OR model OR equation OR formula) AND water AND (recovery OR produc* OR captur* OR generet* OR condensa* OR collection OR extract* OR conservat* OR predict*))*

Na ProQuest, o protocolo de busca aplicado foi estruturado da mesma maneira utilizada na Web Of Science com a adição de filtro de publicações apenas na Ashrae Jornal e na Ashrae Transactions, dessa forma:

ti((water OR HVAC OR "air-conditioning" OR "air handling" OR "vapor compression" OR evaporator or AHU) AND (recovery OR produc OR captur* OR generet* OR condensa* OR collection OR extract* OR conservat* OR predict*)) NOT absorption NOT adsorption NOT desalinat* NOT pump) AND ft((HVAC OR "air-*

conditioning” OR “air handling” OR “vapor compression” OR evaporator) AND (predict OR model OR equation OR formula) AND water AND (recovery OR produc* OR captur* OR generet* OR condensa* OR collection OR extract* OR conservat* OR predict*))*

Com isso, no dia 23 de fevereiro de 2023, foram obtidos como resultados na Web of Science de busca 93 trabalhos e na ProQuest 50 trabalhos. Por meio de uma leitura de títulos e resumos, selecionou-se os estudos que tratavam sobre modelo de previsão de água de condensação.

Com isso, os estudos foram exportados em formato de planilha, os resultados compilados e organizados por: autor (data); local/clima; método; modelo de previsão utilizado e descritos os procedimentos metodológicos dos estudos prévios. Em sequência, foi realizada análise crítica comparativa das principais variáveis e dos métodos utilizados para a construção dos modelos de previsão de água condensada. E por fim, foram elaboradas as considerações finais quanto a aplicabilidade dos modelos de estudos anteriores dentro do contexto brasileiro.

3 RESULTADOS

Sistemas de aproveitamento de água de condensação de ar condicionado possuem potencial de aplicabilidade em edificações que fazem uso intensivo de ar condicionado, a exemplo de escritórios, hotéis, comércio e edificações de ensino. De acordo com Lawrence e Perry (2010a), métodos e ferramentas de previsão de água de condensação de ar condicionado não estão amplamente disponíveis para avaliar se é viável aproveitar água de condensação de ar condicionado em usos não potáveis em edificações. Para analisar o potencial de redução do consumo de água potável e, conseqüentemente, avaliar a viabilidade da instalação de sistemas de aproveitamento de água de condensação de ar condicionado, torna-se crucial verificar o volume de oferta de água de condensação ao longo do ano. Estudos prévios estimaram o volume de água de condensação produzido por sistemas de ar condicionado em distintos tipos de edificação e clima. Por meio de equações hipotéticas, modelagem matemática e estudos de caso, diferentes modelos de previsão de oferta água de condensação de ar condicionado foram apresentados.

Gus (2005) indicou que a produção de água de condensação de ar condicionado em uma edificação relaciona-se com as atividades humanas, de manufaturas e de iluminação. Ressaltou que locais que necessitam de elevado controle das condições de umidade possuem elevado potencial para aproveitamento de água condensada, a exemplo de estoques de farmácias e edificações com alto nível de renovação de ar como shopping center. Orientou para uma rápida e realística estimativa de água de condensação de ar condicionado deve-se realizar uma visita e observar as instalações de dreno de ar condicionado, sendo um desafio prever a produção para novos edifícios. Desse modo, propôs um modelo baseado em estudos de casos que considera uma relação direta entre a carga térmica dos ambientes e a quantidade de água descartada. Para esse modelo adotou-se como variável dependente a capacidade térmica de equipamentos, informação mais tangível do que a carga térmica dos ambientes por geralmente constarem nas etiquetas dos equipamentos. Além disso, considerou para a estimativa a área da serpentina de resfriamento das evaporadoras do ar condicionado, sendo admitido como pico de produção de água condensada valores aproximados de 6 a 7 ml/s por área (m^2) da serpentina de resfriamento, no verão e em regiões de clima quente e úmido. Para tanto, foram utilizados estudos de caso da produção média de edifícios de grande porte, sendo coletado dados de poucos edifícios.

Habeebullah (2009) observou a prática de atividades recreativas ao ar livre em algumas regiões costeiras. Com a intenção de melhorar as condições de conforto em volta das pessoas foram instalados sistemas resfriamento nessas áreas abertas. Dessa forma, foram instalados sistemas de alta capacidade de refrigeração, alcançando sistemas com capacidade de refrigeração de até 35.000 TR. Com isso, foi realizado um estudo para avaliar limites máximos e mínimos de produção de água condensada, tendo em vista a alta capacidade desses equipamentos. Adotou-se um método analítico que considerou três possíveis estados da serpentina durante o processo de resfriamento: molhada, parcialmente molhada ou seca. Como a estimativa para essa situação intermediária mostrou-se complexa, foram realizadas simulações computacionais para verificar a produção de água de condensação de ar condicionado em diferentes condições de temperatura bulbo seco e bulbo úmido. Com isso, verificou-se que a produção de água de

condensação de ar condicionado reduziu com o aumento da velocidade do ar. Acredita-se que esse efeito é devido a uma insuficiente capacidade de resfriamento do ar em velocidade de ar muito elevada. Já em velocidade de ar muito baixa parece ocorrer um empecilho para produção de água condensada, por conta da formação de gelo nas serpentinas.

Painter (2009) investigou o uso de água de condensação de ar condicionado para reduzir a demanda por água potável em uma edificação. Para esse estudo, utilizou dados de temperatura e umidade de uma base de dados meteorológica, considerando a média diária da temperatura de bulbo seco e de umidade absoluta. Dessa forma, a produção de água de condensação de ar condicionado estimada foi comparada com usos possíveis em edificações, como descarga sanitária e irrigação.

Segundo Lawrence *et al.* (2010a), estimar os custos de instalação de sistema de aproveitamento de água de condensação de ar condicionado não é difícil, sendo mais complicado verificar o *payback* devido a métodos e ferramentas de previsão de produção de água de condensação de ar condicionado não estarem amplamente disponíveis. Dessa forma, foi desenvolvido um aparato experimental composto por um reservatório, uma base estrutural, uma bomba de água, um medidor visual (escala de 0,38 litros) e válvula de retenção para evitar o refluxo da bomba. Esse aparato foi conectado a tubulação de dreno das evaporadoras, sendo aferidos e registrados dados de temperatura e umidade relativa do ar na entrada de ar externo e na seção de ventilação da evaporadora, por meio de *data loggers* (medições em intervalos de 5 min). Dados de fluxo de ar foram obtidos por meio da velocidade do ventilador pelo monitoramento da corrente elétrica do motor do ventilador. Assim, a aferição do fluxo de ar foi realizada quando o ventilador estava em operação aproximadamente normal, consumo de corrente nominal. Além disso, foram instalados tubos de *pitot* para verificar o fluxo de ar na linha de corrente de ar escolhida como referência. Para a produção de água de condensação de ar condicionado foi admitida a diferença entre a umidade absoluta de entrada e de saída da serpentina da evaporadora. Com isso, quantidade de água de condensação de ar condicionado coletada em campo - aferida diariamente durante cada semana - foi comparada com o valor de previsão de água condensada resultando em um erro de aproximadamente 30%.



Lawrence *et al.* (2012) abordaram o estudo de coleta de água de condensação de ar condicionado com três objetivos: desenvolver um método de estimativa anual utilizando correlações e dados meteorológicos; avaliar a economia para um sistema de coleta típico; e por último, analisar aspectos econômicos e ambientais para identificar regiões com potencial de coleta de água de condensação de ar condicionado. Para isso, foram selecionadas 47 cidades nos Estados Unidos, utilizados parâmetros climáticos obtidos em um handbook da ASHRAE e o ponto de orvalho médio foi calculado partir dos dados de um ano meteorológico típico. Para mensurar a produção de água de condensação de ar condicionado foram usados dados de campo. No intuito de construir um método de previsão caracterizado com poucos parâmetros, foram desenvolvidas correlações e regressão para diversas combinações dos parâmetros climáticos. O processo de regressão começou considerando todos os parâmetros meteorológicos, se avaliou como determinados grupos de parâmetros responderam a modificações, e assim o número de parâmetros foram reduzidos em cada etapa da regressão. Como critérios para as combinações selecionadas adotou-se parâmetros que apresentaram forte influência na produção de água de condensação de ar condicionado: umidade e tempo necessário para resfriamento. Ao analisar os gráficos de correlações verificou-se que as cidades de clima muito seco produziram pouca quantidade de água de condensação de ar condicionado. Desse modo, para uma análise mais aprofundada optou-se por realizar separadamente a correlação dessas cidades. Na última etapa desse estudo, realizou-se uma análise financeira para determinar o tempo de retorno de investimento em um sistema de aproveitamento de água de condensação de ar condicionado (baixa, média e alta produção). O ar externo foi considerado fonte principal de umidade, sendo desprezada a umidade relacionada atividade de pessoas e outros processos. Dessa maneira, a fluxo de ar externo foi definido como nível baixo (500 l/s), médio (2.500 l/s) e alto (10.000 l/s). Esses valores de fluxo de ar externo podem ser atendidos por uma evaporadora ou pela combinação de duas ou mais evaporadoras ou uma unidade de ar externo dedicada. Para o custo de um sistema de aproveitamento de água de condensação de ar condicionado considerou-se uma instalação típica que apenas bombeia a água do reservatório para uma bacia de torre de resfriamento. E para a análise de viabilidade econômica foi feita a

comparação com a tarifa de água cobrada por uma concessionária local, admitindo tarifação combinadas de água e esgoto.

Al-Farayedhi *et al.* (2014) realizaram um estudo analítico e experimental de produção de água de condensação de ar condicionado, utilizando de dados climáticos horários locais. O modelo analítico foi construído no software Engineering Equation Solver (EES), considerou-se que parte do ar entra em contato direto com a serpentina e outra parcela passa entre os tubos e aletas sem fazer contato físico e, portanto, sem sofrer influência da serpentina nesse processo. Na saída da evaporadora, o ar frio que teve contato com a serpentina é misturado com a corrente de ar restante, assim a temperatura dessa mistura pode ser maior que a temperatura da superfície da serpentina. Desse modo, a análise separa as influências da mistura de ar de saída em dois termos, um referente ao ar que teve contato físico com a serpentina com fator de contato e outra que passou direto com fator de *by-pass*. Considera-se a eficácia da serpentina expressa em termo de entalpia para levar em conta os efeitos simultâneos de transferência de calor e massa, que ocorrem na superfície da serpentina. A eficácia foi definida como a razão entre a transferência de calor real e a transferência de calor máxima possível. Com isso, determina-se a umidade absoluta do ar de saída, para obter a produção de água de condensação de ar condicionado aplica-se a conservação de massa de Lavoisier em torno da serpentina. Para análise experimental, foi selecionado um ar condicionado do tipo split de 18.000 BTU/h, construída uma câmara que simula condições climáticas, e utilizado dados climáticos de junho a setembro dos últimos três anos de Dhahran, Arábia Saudita. Então, foram comparadas a produção de água de condensação de ar condicionado do modelo analítico com os resultados experimentais para averiguar a precisão do modelo analítico, sendo obtido como resultado uma correlação maior do que 90%.

Eades (2018) investigou o aproveitamento de água de condensação de ar condicionado para redução do consumo de água potável e o potencial de recuperação de energia em um laboratório, onde ocorre 100% de renovação de ar. Dessa forma, foram pesquisados na *Typical Meteorological Year* (TMY3) a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e a elevação locais. Com base em equações psicrométricas e os dados da TMY3 obteve-se os parâmetros locais de: umidade absoluta, densidade do

ar, entalpia e pressão atmosférica. Em sequência, aplicou-se equações de continuidade e conservação de energia para determinar a produção de água de condensação de ar condicionado. Com isso, foi realizado um estudo de caso em um edifício de laboratório, na Flórida, Estados Unidos.

Zolfagharkani *et al.* (2018) desenvolveram uma simulação computacional para previsão de produção água de condensação de ar condicionado, evitando algumas suposições simplificadoras para obter maior precisão. Desse modo, não foi adotada a suposição de saturação do ar após passar pela serpentina, pela possibilidade de uma parcela passe pela serpentina sem contato com as aletas. Com isso, apresentou resultados para uma faixa de temperatura de ar entre 20 e 40°C e uma umidade relativa de 30 a 100%. Sendo observado um efeito insignificante da temperatura de entrada sobre a umidade relativa de saída, entretanto verificou-se uma relação direta de linearidade e proporcionalidade entre as variáveis de umidade relativa interna e produção de água de condensação de ar condicionado; velocidade do ar e produção de água de condensação de ar condicionado; e umidade relativa e tamanho da área da serpentina da unidade evaporadora.

Poredos *et al.* (2021) verificaram correlações para diversas geometrias e parâmetros de processo para condensação de ar úmido, vapor de água na presença de gás não condensável. Mesmo uma pequena quantidade de ar pode impactar na redução da produção de água de condensação de ar condicionado, por diminuir o valor do coeficiente de transferência de calor. Assim, esse estudo adotou investigações teóricas e experimentais em placas de tubos verticais e horizontais. Para se obter correlações foi construído um aparato experimental com trocadores de calor em placas verticais (altura 74 mm) e horizontais (3 tubos com diâmetro de 40 mm e 7 tubos de 15 mm). O aparato experimental foi construído como um circuito fechado, composto por uma rede de dutos, ventilador radial e instrumentações - termopar, sensor de umidade e temperatura, balança, placa de orifício, transmissor de pressão diferencial, e sistema de aquisição de dados. Dessa forma obteve-se equacionamentos diferentes para as placas verticais e para os tubos horizontais.



A Tabela 1 traz um resumo do levantamento realizado, apresentando as principais variáveis analisadas e métodos adotados na construção de modelos de previsão de oferta de água condensada para diferentes locais e climas. Observa-se dos estudos anteriores selecionados enfoque das pesquisas em explorar locais de clima quente e úmido, e admitindo assim como principais variáveis preditoras: temperaturas (interna, externa e ponto de orvalho), umidade relativa (interna e externa), umidade absoluta (interna e externa), características geométricas da serpentina e capacidade de refrigeração dos equipamentos. Sendo esses dados obtidos por fontes primárias ou secundárias, adotando valores médios.

Tabela 1. Trabalhos caracterizados por autor(data), Local/Clima, Principais Variáveis Utilizadas, Método e Modelo de Previsão utilizado.

Autor (Data)	Local/Clima	Principais Variáveis Utilizadas	Método	Modelo de Previsão Utilizado
Gus (2005)	San Antonio, EUA Quente e Úmido	\dot{Q}_{ev}	Análise de estudos de casos para coleta de dados, e relaciona a capacidade de refrigeração com a taxa de produção utilizando um fator de carga.	$Taxa\ de\ Produção = (Toneladas\ de\ Refrigeração) \cdot (fator\ de\ carga) \cdot (0,2\ galões)$
Habeebullah (2009)	Jeddah, Arábia Saudita Quente e Úmido	$\dot{Q}_{ev}, U, A, \dot{m}_a, \omega_i, T_i, T_e, \omega_e$	Construção de modelagem analítica no software Engineering Equation Solver.	Gráfico de trabalho para previsão rápida do rendimento de água para temperaturas do ar entre 25° a 40°C e umidade relativa entre 30% a 40%.
Painter (2009)	Texas, EUA Quente e Úmido	$\Delta\omega_{cc}, \rho_a$	Formulação analítica em software e aplicação em um estudo de caso.	$Potencial\ de\ Condensado\ Produzido = \Delta\omega_{cc} * \frac{\rho_a}{8,33}$
Lawrence (2010a)	Geórgia, EUA Quente e Úmido	$fluxo\ de\ ar, \Delta\omega$	Experimental utilizando aparato para coleta de dados.	$Condensado\ Coletado = Fluxo\ de\ Ar \cdot densidade \cdot 60 \cdot \Delta\omega$
Lawrence (2012)	EUA Quente e Úmido	$ponto\ de\ orvalho\ médio, CDD$	Computacional com dados meteorológicos e regressão.	$Condensado = 0,4777 \times Avg. DP + 0,00204 CDD + 0,32596 \times [chuvas\ entre\ Abril\ e\ Outubro] - 22,5$ $\dot{m}_c = \dot{m}_a(\omega_i - \omega_e)$
Al-Farayedhi (2014)	Dharan, Arábia Saudita Quente e Úmido	T_{BS}, ϕ_e, V_a	Analítico com a utilização de software para busca de parâmetros e com estudo de caso.	
Eades (2018)	Carolina do Norte, EUA Quente e Úmido	$T_{BS}, T_{Bw}, elevação\ local$	Analítico e experimental	$\dot{m}_w = \dot{m}_a(\omega_i - \omega_e)$
Zolfagharkhani (2018)	Bushehr, Iran Quente e Úmido	$\omega_{a,in}, \omega_{a,e}, \phi_i, \phi_e, V_a, T_i, T_e$	Simulação computacional.	$W_{prod} = A_{fr} \cdot V_a \cdot 3600 \cdot \rho_{av} \cdot (\omega_{a,in} - \omega_{a,e})$
Poredos (2021)	Liubliana, Eslovênia Quente e Úmido	$U_a, T_i, T_w, T_{a,dew}, T_w, RH$	Experimental, em condições controladas dentro de laboratório.	$m''_{avg,M1,corr} = 0,077 Re_L^{-0,2} Sc^{-2/3} U_a^{0,747} \cdot \frac{C_0(W_{2,a}\rho_{a,a-i} - W_{2,i}\rho_c)}{1 + \frac{0,68C_p(T_i - T_w)}{h_{fg}}}$ $m''_{avg,num} = 33,89 Sc^{0,33} Re^{0,31} RH^{2,6} \cdot \left(\frac{T_{a,dew} - T_w}{T_a - T_w}\right)^{-0,6} - \rho_a) Z$

Fonte: Autor (2024)

4 DISCUSSÃO

Observa-se dos estudos anteriores selecionados enfoque das pesquisas em explorar locais de clima quente e úmido, e admitindo assim como principais variáveis preditoras: temperaturas (interna, externa e ponto de orvalho), umidade relativa (interna e externa), umidade absoluta (interna e externa), características geométricas da serpentina e capacidade de refrigeração dos equipamentos. Sendo esses dados obtidos por fontes primárias ou secundárias, adotando valores médios.

Gus (2005) apresenta como variáveis preditoras para a produção de água de condensação de ar condicionado relacionadas a parâmetros de carga térmica, como iluminação e pessoas. Em edifícios construídos pode-se verificar esses dados pelas capacidades de refrigeração dos equipamentos instalados. Já para projetistas, recomendou valores médios de produção de água de condensação de ar condicionado entre 6 e 7 ml/s por área (m^2) da serpentina. Assim, exceto pela variável de área da serpentina, percebe-se nesse estudo o uso de variáveis mais acessíveis para profissionais de construção civil (potência de refrigeração de equipamentos de ar condicionado).

Habeebullah (2009) admitiu a velocidade do ar como forte influência na produção de água condensada, realizando uma análise com foco nessa relação. Entretanto, explica que a temperatura e umidade absoluta do ar que sai do evaporador depende da capacidade térmica do evaporador, da temperatura do refrigerante, da velocidade do fluxo de ar e, em particular, da umidade absoluta do ar de entrada. Dessa forma, quando a temperatura da superfície cai abaixo do ponto de orvalho (corresponde à pressão parcial do vapor d'água), o ar úmido sofre uma queda de temperatura e o vapor condensa nas superfícies das serpentinas e coletado pela bandeja de dreno. Dessa forma, depreende-se novamente para a análise variáveis que correspondem as características dos equipamentos (capacidade térmica, área superficial das serpentinas e velocidade do ar), sendo acrescentados parâmetros termodinâmicos do ar (externo e interno) que flui pela serpentina do ar condicionado.

Painter (2009) considerou a média diária de temperatura de bulbo seco e umidade absoluta. Lawrence *et al.* (2010b) adotou variáveis de temperaturas, umidades relativas e de fluxo de ar. Lawrence *et al.* (2012) admitiu como principais variáveis a umidade e o

tempo de resfriamento, sendo o ar externo considerado como fonte principal de umidade, e desprezando a umidade relacionado as pessoas e processos. Al-Farayedhi *et al.* (2014) e utilizaram dados climáticos horários e Eades (2018) adotou a temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido também obtidas de fontes secundárias. Depreende-se das relações termodinâmicas que existe uma relação entre temperatura de bulbo seco, temperatura de bulbo úmido e umidade absoluta e umidade relativa, quando se conhece o valor de duas as demais podem ser determinadas pelo uso de equacionamentos ou da carta psicrométrica. Dessa forma, observa-se uma forte tendência nesses ao uso dessas variáveis climáticas.

Zolfagharkhani *et al.* (2018) verificaram uma relação direta da umidade relativa interna e velocidade do ar com a produção de água de condensação de ar condicionado. Além disso, observou-se uma relação de proporcionalidade direta entre a umidade relativa e o tamanho de área da serpentina, e um efeito insignificante da temperatura externa na umidade relativa interna. Desse modo, percebe-se uma influência da umidade relativa interna, da velocidade do ar, tamanho da serpentina, e em contraponto aos estudos anteriores apresentou como não significativa dados de temperatura externa.

Poredos *et al.* (2021) aprofundaram sobre a influência dos parâmetros de geometria nas serpentinas na produção de água de condensação de ar condicionado. Assim, identificou como principais variáveis a considerar: umidade relativa, temperaturas (do ar seco, de orvalho, da parede e do ar úmido) e velocidade do ar.

Com isso, percebe-se desses estudos a predominância de variáveis preditoras que caracterizem as condições do ar (temperatura e umidade) e parâmetros dos equipamentos de ar condicionado (potência de refrigeração e geometria da serpentina). Vale destacar que Zolfagharkhani *et al.* (2018) não consideraram a influência da temperatura externa na umidade relativa interna, bem como as relações de proporcionalidades obtidas. Observa-se que a determinação das variáveis preditoras não foi pacificado na literatura, sendo assim esse cenário dificultado a pensar na realidade de profissionais de construção civil que necessitam de informações de acesso rápido e corriqueiro.

Além disso, percebe-se dos estudos prévios apresentados a utilização de procedimentos metodológicos com diversas abordagens. Sendo assim, foram



desenvolvidos estudos analíticos, computacionais, estatísticos e experimentais, sendo que alguns estudos adotaram mais de uma abordagem. A fim de compilar a análise desses procedimentos metodológicos foi gerada a Tabela 2, onde se descreve vantagens e desvantagens das técnicas aplicadas, levando em conta custo, precisão e aplicação dos resultados obtidos.

No contexto brasileiro observa-se algumas especificidades climáticas, tendo em vista a sua vastidão territorial que engloba regiões: quentes e úmidas; quentes e secas; frias e úmidas; e frias e secas. A literatura abordou investigação em regiões de clima predominantemente quente e úmido, por entendimento que regiões quentes e úmidas possuem maior potencial para produção de água condensada. Desse modo, percebe-se uma necessidade de maiores estudos de previsão que abordem as demais condições climáticas, sobretudo em vista que a água condensada é um subproduto de sistemas de climatização geralmente desperdiçada quando encaminhada a rede de esgoto.

Tabela 2. Análise de métodos de trabalhos anteriores quanto a custo e qualidade de dados obtidos.

Técnicas	Vantagens	Desvantagens
<i>Analítico</i>	Baixo custo comparado aos demais; Aprofundamento de conhecimentos teóricos.	Considera limites máximos e mínimos para produção de água condensada, obtendo resultados superestimados e mais imprecisos; Difícil aplicação dos resultados obtidos por profissionais de engenharia civil.
<i>Computacional</i>	Baixo custo comparado a estudos experimentais; Pode considerar situações intermediárias, entre limites máximos e mínimos, sendo assim maior precisão de resultados; O modelo proposto pode ser de fácil aplicação por profissionais de construção civil.	Por ser uma simulação de um pode não representar condições reais; Utilizam dados secundários, nem sempre completos, atualizados, e em sintonia com o objetivo da pesquisa.
<i>Experimental por meio de estudo de caso</i>	Dados primários, possibilitando controle da coleta de dados para que atendam diretamente as especificidades da pesquisa; Permite coleta de dados em diferentes condições; Resultados empíricos; O modelo proposto pode ser de fácil aplicação por profissionais de construção civil.	Custo moderado; Exige atenção a limitação do uso dos dados obtidos em situações fora das condições aplicadas na pesquisa.
<i>Experimental em condições controladas</i>	Permite uma maior qualidade de coleta de dados; Dados primários e de maior controle da coleta de dados para que atendam diretamente as especificidades da pesquisa; Permite coleta de dados em diferentes condições;	Custo elevado; Exige atenção a limitação do uso dos dados obtidos em situações fora das condições aplicadas na pesquisa.

Resultados empíricos;
O modelo proposto pode ser de fácil aplicação por
profissionais de construção civil.

Fonte: Autor (2024)

5 CONCLUSÃO

Este estudo teve como objetivo principal a identificação de modelos de previsão da oferta de água de condensação em sistemas de ar condicionado, bem como a análise dos métodos e variáveis empregados para avaliar sua aplicabilidade no contexto climático do Brasil. A pesquisa envolveu uma busca exploratória por termos relevantes na área de estudo e uma subsequente revisão sistemática, que resultou na seleção de nove trabalhos específicos relacionados aos modelos de água de condensação de ar condicionado.

No âmbito dessa investigação, notou-se a significativa prevalência do uso de determinadas variáveis preditoras em estudos pertinentes à previsão da oferta de água condensada em sistemas de ar condicionado. Essas variáveis incluíram temperatura, umidade relativa, umidade absoluta, temperatura de ponto de orvalho e velocidade do ar, destacando-se um estudo que adotou a capacidade dos equipamentos como variável preditora, oferecendo uma abordagem mais acessível a profissionais da construção civil e acrescentando uma perspectiva inovadora ao campo.

No que diz respeito à seleção das outras variáveis preditoras, como temperatura, umidade relativa, umidade absoluta, temperatura de ponto de orvalho e velocidade do ar, a revisão da literatura evidenciou uma notável falta de consenso entre os pesquisadores. Os métodos divergem consideravelmente, com alguns pesquisadores preferindo a umidade relativa, enquanto outros optam pela umidade absoluta, exemplificando a variabilidade de abordagens empregadas na modelagem preditiva desses sistemas. Essa diversidade de enfoques ressalta a complexidade do problema e enfatiza a necessidade de uma análise criteriosa para selecionar as variáveis mais apropriadas em contextos específicos de previsão de condensação de água em sistemas de ar condicionado.

Adicionalmente, a análise dos métodos utilizados em estudos anteriores revelou uma ampla gama de procedimentos metodológicos, incluindo métodos analíticos, computacionais, estudos de caso e experimentos em condições controladas. Ficou claro



que os métodos analíticos e computacionais tendem a ser mais econômicos em termos de custos do que os métodos experimentais, como estudos de caso e experimentos laboratoriais. No entanto, os estudos experimentais têm o mérito de serem potencialmente mais representativos das condições reais, proporcionando resultados mais precisos.

Por fim, é importante ressaltar que a maioria dos estudos anteriores analisou locais com climas predominantemente quentes e úmidos. No entanto, essa abordagem pode não ser totalmente representativa do contexto climático diversificado do Brasil, que abrange uma vasta extensão territorial com variações climáticas significativas. Portanto, futuras investigações devem considerar a adaptação e a contextualização desses modelos e métodos às condições climáticas específicas encontradas no país, a fim de melhor atender às demandas de previsão da oferta de água de condensação de ar condicionado em diferentes regiões brasileiras.

REFERÊNCIAS

ABNT. **NBR 16783**: uso de fontes alternativas de água não potável em edificações, Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2019.

ADASA; CAESB; SEAGRI; EMATER. **Gestão da crise hídrica 2016-2018**: experiências do Distrito Federal. Brasília, 2018.

ADASA; Resolução nº 20. Brasília, 2016.

ANA (BRASIL). **Conjuntura dos Recursos hídricos no Brasil 2020**: informe anual. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2020.

ANA (BRASIL). **Conjuntura dos Recursos hídricos no Brasil 2019**: informe anual. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2019.

ANA (BRASIL). **Conjuntura dos Recursos hídricos no Brasil 2017**: informe anual. Agência Nacional de Águas. Brasília: ANA, 2017.

AL-FARAYEDHI, A. A.; Ibrahim, N. I.; Gandhidasan, P. Condensate as a water source from vapor compression systems in hot and humid regions. *Desalination*, v. 349, p. 60-67, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.desal.2014.05.002>.

CODEPLAN. **Atlas do Distrito Federal**. Companhia de Planejamento do Distrito Federal. Brasília: **CODEPLAN**, 2020. Disponível em: <https://www.codeplan.df.gov.br/atlas-do-distrito-federal-2020/>. Acesso em: 03 de novembro de 2021.

CREDER, H. **Instalações de Ar Condicionado**. Rio de Janeiro: LTC, 2014. ed. 6 p. 43-44. ISBN 978-85-216-1346-6.

EADES, W. Energy and water recovery using air-handling unit condensate from laboratory HVAC systems. *Sustainable Cities and Society*, v.42, p. 162-175, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scs.2018.07.006>.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA. **Balço Energético Nacional 2021: Ano base 2020**. Rio de Janeiro: EPE, 2021.

FELLET, J. **O que cidades que já vivem racionamento revelam sobre futuro da crise da água**. BBC NEWS, 24 de julho de 2021. Disponível em: <https://g1.globo.com/natureza/noticia/2021/07/24/o-que-cidades-que-ja-vivem-acionamento-revelam-sobre-futuro-da-crise-da-agua.ghtml>. Acesso em: 18 ago. 2021.

GLAWE, D., WOOTEN, M. LYE, D. Quality of condensate from air-handling. *ASHRAE Journal*, 12 ed., v. 58, p. 14-23, 2016.

GUZ, K. Condensate water recovery. *ASHRAE Journal*, 6 ed, v. 47, p. 54-56, 2005.

HABEEBULLAH, B. A. Potential use of evaporator coils for water extraction in hot and humid areas. *Desalination*, v. 237, p. 330-345. 2009.

LAWRENCE, T. M.; PERRY, J.; DEMPSEY, P. Predicting condensate collection from HVAC air handling units. **ASHRAE Transactions**, v. 116, p. 3–15, 2010a.

LAWRENCE, T.; PERRY, J. Capturing condensate. **High Performing Buildings**, v. 3, p. 56-61, 2010b.

LAWRENCE, T.; PERRY, J.; TYLER, A. AHU condensate collection economics **ASHRAE Journal**, 5 ed., v. 54, p. 18-20,22,24-25, 2012.

MARI, J. **Cantareira entra em nível de alerta com volume de água abaixo dos 40%**. CNN Brasil, 18 de agosto de 2021. Disponível em: <<https://www.cnnbrasil.com.br/nacional/2021/08/18/cantareira-entra-em-nivel-de-alerta-com-volume-de-agua-abaixo-dos-40>>. Acesso em: 18 ago. 2021.

MARQUES, I. G.; OLIVEIRA, L. H. **Padronização de terminologia e de conceitos de sistemas prediais de água não potável**. Conselho Brasileiro de Construção Sustentável. São Paulo: CBCS, 2014. 9p.

PAINTER, F. Condensate harvesting from large dedicated outside air-handling units with heat recovery. **ASHRAE Transactions**, v. 115, p. 573-580, 2009.

POREDOS, P.; PETELIN, N.; TILLEN, Z.; VIDRIH, B.; GATARIC, P.; KITANOVSKI, A. Performance of the condensation process for water vapour in the presence of a non-condensable gas on vertical plates and horizontal tubes. **Energies**, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14082291>

SANT'ANA, D.; LIMA, T. Mudanças climáticas, mercantilização das águas e sistemas de água não potável. In: MORAES, G. G. B.; MONTEZUMA, T. F. P. F.; FERRAÇO, A. A. G. (Org.). **Estudos de direito das águas: desafios jurídicos, sociais e agravantes climáticas**. 1ed. Rio de Janeiro: Lumen Juris, v.1, p. 229-255, 2021.

STOECKER, W.; JONES J. **Refrigeração e ar condicionado**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1985. p.163.

ZOLFAGHARKHANI, S; ZAMEN, M.; SHAHMARDAN, M. Thermodynamic analysis and evaluation of a gas compression refrigeration cycle for fresh water production from atmospheric air. **Energy Conversion Management**, v. 170, p. 97-107, 2018