



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA QUÍMICA



RODRIGO CARRILHO DA CUNHA

EFEITO DOS SOLVENTES ACETONA, ETANOL E SUAS SOLUÇÕES AQUOSAS
SOBRE O DECAIMENTO TÉRMICO EM SISTEMAS PSICROMÉTRICOS

UBERLÂNDIA

2024

EFEITO DOS SOLVENTES ACETONA, ETANOL E SUAS SOLUÇÕES AQUOSAS
SOBRE O DECAIMENTO TÉRMICO EM SISTEMAS PSICROMÉTRICOS

RODRIGO CARRILHO DA CUNHA

Monografia de dissertação
apresentada à Universidade Federal
de Uberlândia como parte dos
requisitos necessários para a
aprovação na disciplina de Trabalho
de Conclusão de Curso da graduação
em Engenharia Química.

Orientador: Prof. Dr. Luiz Gustavo
Martins Vieira.

UBERLÂNDIA

2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, eu gostaria de agradecer ao meu orientador, o professor doutor Luiz Gustavo Martins Vieira por ter depositado sua confiança em mim para um trabalho tão especial e por ter sido parcialmente responsável por alavancar meu gosto pelos fenômenos de transporte. Além dele, gostaria de agradecer aos professores doutores Danylo de Oliveira Silva e Érika Ohta Watanabe por terem sido mais do que bons professores, mas grandes amigos, tanto durante minha estadia no PET, quanto fora dela, especialmente o Danylo por ter sido também meu orientador de estágio. Quero agradecer ao professor doutor Fábio de Oliveira Arouca, por ter sempre conversado comigo, sobre a carreira e afins, e também por ter me recomendado o doutor Luiz Gustavo como orientador. Gostaria de agradecer também ao professor doutor Claudio Roberto Duarte por ter prestado sua homenagem na cerimônia de colação simbólica de grau da minha turma. Vocês todos são exímios docentes!

De seguida, quero agradecer aos meus pais, Luciano Garcia Cunha e Valquíria Carrilho da Costa, por sempre estarem à disposição, terem sempre me motivado a seguir o melhor caminho da vida e ser sempre estudioso e dedicado. Eles me ensinaram que a vida é sobre vencer grandes batalhas e aqui estou eu vencendo mais uma. Quero também agradecer ao meu irmão Raphael Carrilho da Cunha que sempre deixou a vida mais leve com seu companheirismo e seu humor.

Além disso, quero agradecer à minha namorada Larissa Guimarães Santos, que além de me apoiar e estar do meu lado 100% do tempo, sempre me trouxe motivação para seguir em frente de cabeça erguida, deixando a minha vida muito mais feliz. Além disso agradeço a ela por ter me ajudado com o presente trabalho, com dicas de didática e escrita, bem como formatação textual técnico-científica.

Quero agradecer imensamente também aos meus primos, Lélío Carrilho de Oliveira, Izabela Carrilho de Oliveira, Bruna de Oliveira Carrilho, Maria Clara Pereira da Costa, André Garcia Cunha Filho e Marina Calixto Cunha por terem sempre me apoiado e nunca terem saído do meu lado, deixando a minha vida mais divertida a cada dia.

Também tenho muito a agradecer a todos os amigos mais próximos que eu fiz ao longo da graduação, Lucas Dias Vanzela, Danielle Turatto Amin, Roberto Vargas Chaul, Victor Mitleton Herrera, Giovanna Franco Gouveia, Ana Luísa Gabriel Santos, Felipe Fernandes Tolentino e Luiz Felipe Souza, por terem deixado o curso muito mais leve e me alegrado muito em todos os momentos difíceis. Eu com certeza não teria chegado aqui sem a ajuda de vocês!

Finalmente, gostaria de agradecer a todos os amigos que eu fiz durante os três anos em que fiquei no programa PET EQ, Ângelo, Marina, Lucas Macedo, Lucas Netto, Elmis, Ana Gabriela, Ana Laura, Maria Fernanda, Marcos, Oscar, Washington, Ignácio, Vinícius, Gabriel Bonifácio, Gabriel Nunes, Ana Júlia, Maria Eduarda, Enrico, Izabel, Jayc, Júlia Moraes, Júlia Santos, Thiago, Vitor, Vitória, Vito e especialmente o Antônio. Todos vocês foram tão especiais na minha jornada que eu não poderia deixar de agradecer um por um por toda a ajuda que vocês me deram.

RESUMO

Na incessante busca por resfriar o ambiente à sua volta, a humanidade acaba utilizando métodos muitas vezes poluentes e de altíssimo gasto energético, como geladeiras e sistemas de ar-condicionado. Sendo assim, a ciência tem buscado alternativas sustentáveis e de baixo custo para o resfriamento, principalmente de ambientes internos como, escritórios, salas e quartos. A principal alternativa atualmente são os sistemas de resfriamento evaporativos (sistemas psicrométricos) que utilizam o decaimento térmico proveniente da evaporação natural da água para resfriar correntes de ar, como sistema proposto por DIAS *et al.* (2020) que usa um ciclone separador como um refrigerador evaporativo. Entretanto, poucos estudos tratam desses sistemas no que tange à evaporação natural de água na presença de solventes ou até mesmo de outros fluidos puros. O presente trabalho teve o objetivo de investigar o efeito da presença de solventes no decaimento térmico de sistemas psicrométricos, utilizando acetona, etanol e a mistura destes com água, investigando a possibilidade de utilizá-los em sistemas evaporativos indiretos, e avaliar sua utilização no resfriamento de ambientes domésticos. Os resultados obtidos mostraram que álcool e acetona puros geraram um aumento significativo no decaimento térmico, que variou de 2,4°C a 24,5°C a depender das condições operacionais. Entretanto, a mistura destes com a água resultaram em decaimentos térmicos intermediários, que dependem fortemente da proporção molar. Além disso, a utilização destes em ciclones resfriadores foi analisada via simulação para o resfriamento de um cômodo de 14 m², resultando em temperaturas finais entre 26,7°C e 5,6°C a depender da solução e das condições operacionais utilizadas. Entretanto, o consumo de solvente, teoricamente calculado, inviabiliza a aplicação de tais fluidos para o resfriamento de ambientes domésticos, a menos que um sistema de recuperação de solvente seja desenvolvido.

Palavras-chave: psicrometria; refrigeração; ciclones industriais; solvente.

ABSTRACT

Humanity nowadays ends up using methods that are often polluting and require very high energy expenditure restlessly searching to cool the environment around them, such as refrigerators and air conditioning systems. Therefore, science has been looking for sustainable and low-cost alternatives for refrigeration, mainly in internal environments such as offices, living rooms and bedrooms. The main alternatives currently are evaporative refrigeration systems (psychrometric systems) that use thermal decay from the natural evaporation of water to cool air currents, as the system proposed by DIAS *et al.* (2020) which uses a cyclone separator as an evaporative cooler. However, only a few studies deal with these systems in terms of the natural evaporation of water in the presence of solvents or even other pure fluids. This work aimed to investigate the effect of the presence of solvents on the thermal decay of psychrometric systems, using acetone, ethanol and their mixture with water, investigating the possibility of using them in the Dias system, and evaluating their use in refrigeration. of domestic environments. The results obtained showed that pure alcohol and acetone generate a significant increase in thermal decay, which varies from 2.4°C to 24.5°C depending on the conditions and solvents. However, mixing these with water results in intermediate thermal decays, which strongly depend on the molar ratio. Furthermore, the use of these in cooling cyclones was analyzed via simulation for the cooling of a 14m² room, which resulted in final temperatures between 26.7°C and 5.6°C depending on the solution and conditions used. Despite of this, the theoretically calculated solvent usage makes the application of such systems for refrigeration of domestic environments unfeasible, unless a solvent recovery system is developed.

Key-words: psychrometry; refrigeration, industrial cyclones; solvent.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1 - Sistema para aferição da temperatura de bulbo úmido.....	10
Figura 1.2 - Ciclone metálico de paredes final (0,3 mm) descoberto (a) e revestido com tecido externo de algodão (b)	11
Figura 2.1 - Diferenças entre diversas geometrias padrão de ciclones.....	17
Figura 3.1 – Montagem experimental da calibração dos termômetros.....	20
Figura 3.2 – Montagem experimental da avaliação do decaimento térmico.....	21
Figura 3.3 - Dimensões do ciclone utilizado no balanço Energético.....	25
Figura 4.1 - Curva de calibração do termômetro seco.....	27
Figura 4.2 - Curva de calibração do termômetro de água.....	27
Figura 4.3 - Curva de calibração do termômetro de álcool.....	27
Figura 4.4 - Curva de calibração do termômetro da mistura de álcool e água.....	27
Figura 4.5 - Curva de calibração do termômetro de acetona.....	28
Figura 4.6 - Curva de calibração do termômetro da mistura de acetona e água.....	28
Figura 4.7 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 08/09/2023 para os diferentes fluidos e soluções.....	30
Figura 4.8 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 02/11/2023 para os diferentes fluidos e soluções.....	31
Figura 4.9 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 12/01/2024 para os diferentes fluidos e soluções.....	32
Figura 4.10 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 27/06/2024 para os diferentes fluidos e soluções.....	33
Figura 4.11 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 28/06/2024 para os diferentes fluidos e soluções.....	34
Figura 4.12 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 17/07/2024 para os diferentes fluidos e soluções.....	35
Figura 4.13 – Simulação referente à condição mais quente do dia 08/09/2023.....	37
Figura 4.14 – Simulação referente à condição mais quente do dia 02/11/2023.....	37
Figura 4.15 – Simulação referente à condição mais quente do dia 12/01/2024.....	38
Figura 4.16 – Simulação referente à condição mais quente do dia 27/06/2024.....	38
Figura 4.17 – Simulação referente à condição mais quente do dia 28/06/2024.....	39
Figura 4.18 – Simulação referente à condição mais quente do dia 17/07/2024.....	39

LISTA DE TABELAS

Tabela 4.1 - Equações de calibração para cada termômetro utilizado.....	28
Tabela 4.2 - Decaimentos térmicos obtidos no dia 08/09/2023.....	29
Tabela 4.3 - Decaimentos térmicos obtidos no dia 02/11/2023.....	30
Tabela 4.4 - Decaimentos térmicos obtidos no dia 12/01/2024.....	31
Tabela 4.5 - Decaimentos térmicos obtidos no dia 27/06/2024.....	32
Tabela 4.6 - Decaimentos térmicos obtidos no dia 28/06/2024.....	33
Tabela 4.7 - Decaimentos térmicos obtidos no dia 17/07/2024.....	34
Tabela 4.8 - Condições operacionais selecionadas para as simulações.....	36
Tabela 4.9 - Consumos de solvente por ciclone para cada solução e condição.....	40

SUMÁRIO

1	Introdução.....	9
1.1	Objetivos.....	13
2	Revisão Bibliográfica	14
2.1	Fundamentos da Psicrometria	14
2.2	A Psicrometria no contexto do resfriamento	15
2.3	Fundamentos básicos de ciclones	16
2.4	Utilização de Ciclones na Troca Térmica Evaporativa.....	17
3	Materiais e Métodos	19
3.1	Calibração dos termômetros	19
3.2	Determinação da temperatura de bulbo úmido	20
3.3	Simulação do resfriamento de um quarto com ciclone psicrométrico.....	23
3.4	Cálculo do consumo de solvente evaporativo do ciclone	25
4	Resultados e Discussões	27
4.1	Calibração dos Termômetros	27
4.2	Determinação da temperatura de bulbo úmido	29
4.3	Simulação do resfriamento de um quarto com um ciclone psicrométrico.....	36
4.4	Cálculo do consumo do solvente evaporativo do ciclone.....	40
5	Conclusão	42
6	Sugestões para Trabalhos Futuros	43
	Referências Bibliográficas	44
	Apêndice 1 – Artigo publicado no ENEMP 2024 a partir do estudo realizado	47

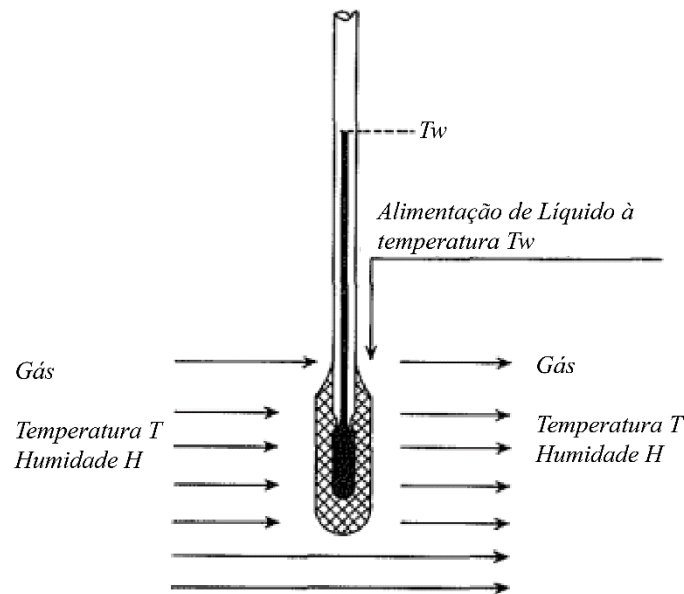
1 Introdução

É fato que o ser humano, desde os primórdios da civilização, tenta resfriar o mundo à sua volta, sejam ambientes domésticos, alimentos, ou até mesmo a água. Entretanto, de acordo com a própria termodinâmica, adicionar calor em qualquer sistema é mais fácil do que retirar. É possível aquecer qualquer ambiente de forma extremamente arcaica, como uma fogueira ou uma lareira, mas resfriar, é um processo muito mais dispendioso. Um exemplo claro disso é um ciclo de refrigeração por compressão de vapor que exige um compressor, um condensador, uma válvula de estrangulamento e um evaporador ligados em série (VAN NESS *et al.*, 2007).

Entretanto, a utilização de sistemas de compressão de vapor apresenta duas grandes desvantagens. A primeira delas, é o fato de serem ciclos dispendiosos, tanto em sua montagem, quanto em sua manutenção e funcionamento. Já a segunda, é que, muitas vezes, utilizam fluidos poluentes como R134A ou, em alguns casos, tóxicos, como a amônia. Desse modo, o mundo encontra-se em uma incessante busca de alternativas para atingir o conforto térmico dos ambientes de maneira a economizar energia e poluir menos (CAMIOTO *et al.*, 2018). Tendo isso em vista, uma alternativa para o resfriamento de ambientes é a utilização de sistemas psicrométricos, também conhecidos como sistemas evaporativos.

A psicrometria trata do estudo do efeito térmico obtido quando o ar ganha ou perde umidade (RODRIGUES, 2018). Em outras palavras, ao umedecer ou secar determinado sistema com ar, é possível reduzir a sua temperatura, o que acontece porque, ao evaporar, a água retira calor latente da estrutura, resfriando-a. A temperatura mais baixa possível de se atingir com esse fenômeno é chamada de temperatura de bulbo úmido, que ocorre quando há transferência de massa de um líquido que evapora para uma corrente de ar (MCCABE *et al.*, 1993). Tal temperatura ganha essa denominação porque pode ser obtida umidificando o bulbo de um termômetro e submetendo-o a uma corrente de ar insaturada (Figura 1.1).

Figura 1.1 - Sistema para aferição da temperatura de bulbo úmido.

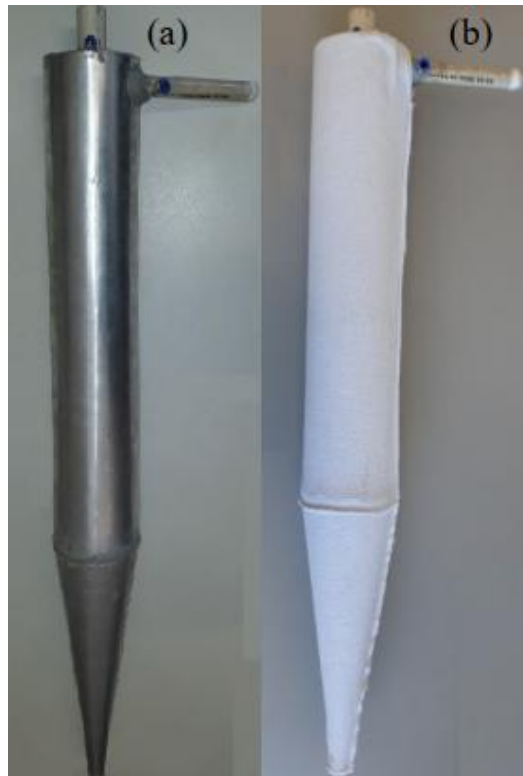


Fonte: MCCABE *et al.*, 1993

Sistemas que utilizam a psicrometria são amplamente utilizados no mundo como um todo, seja em torres de resfriamento, saturadores, ou até mesmo processos de secagem adiabáticos. Nesse contexto, os engenheiros têm buscado sistemas capazes de resfriar ambientes por efeito psicrométrico, uma vez que podem ser uma alternativa sustentável e menos dispendiosa para se atingir o conforto térmico, principalmente em países quentes e secos, como o sistema proposto por QIU e RIFFAT (2018).

Um exemplo funcional de um sistema de resfriamento de ambientes foi proposto por DIAS *et al.* (2020), que se baseia em um ciclone de paredes finas, revestido externamente por um material maleável, poroso e umedecido (Figura 1.2). Desse modo, ao evaporar o líquido, o tecido umedecido atinge a temperatura de bulbo úmido que resfria a parede do ciclone que, por sua vez, troca calor com o ar que escoar na parte interna do equipamento. Tais equipamentos mostraram-se extremamente eficientes com decaimentos térmicos de até 7°C, capazes de resfriar ambientes relativamente grandes (20 m²).

Figura 1.2 - Ciclone metálico de paredes finas (0,3 mm) descoberto (a) e revestido com tecido de algodão (b).



Fonte: DIAS *et al.* (2020).

Sabe-se que ciclones são equipamentos que originalmente foram concebidos como separadores de partículas sólidas suspensas em gases. Por meio da entrada tangencial à estrutura cônico-cilíndrica do equipamento, a suspensão é sujeita a uma força centrífuga que direciona as partículas em direção às paredes, separando-as majoritariamente pela corrente de *underflow*. Entretanto, utilizar um ciclone como descrito acima para resfriar ambientes é uma ideia extremamente inovadora, uma vez que seu regime de escoamento turbulento maximiza a troca térmica do ar com suas paredes internas (DIAS *et al.*, 2024).

Entretanto, a principal barreira no caminho dos sistemas de resfriamento evaporativo está no fato de que, como dependem da insaturação do ar, eles não funcionam de forma eficaz em dias úmidos, principalmente chuvosos, uma vez que nesses dias, o ar já se encontra saturado ou próximo à saturação. Como descrito por MCCABE *et al.* (1993), a variação na temperatura obtida, é diretamente proporcional à diferença entre a umidade absoluta e a umidade de saturação, ou seja, em dia mais úmidos, um menor decaimento térmico é observado. Além disso, a região geográfica em que a cidade de Uberlândia se encontra, possui um clima bem definido entre

períodos secos e úmidos (CARRIJO e BACCARO, 2000), sendo, portanto, uma localidade oportuna para se analisar o decaimento térmico de sistemas psicrométricos.

No entanto, os estudos psicrométricos são classicamente feitos com a água. Neste aspecto, pouco se sabe sobre o efeito psicrométrico quando se diz respeito a soluções. Com isso em mente, esse trabalho propõe analisar como o tipo de solvente (puro ou combinado) influencia na temperatura de bulbo úmido em sistemas de resfriamento psicrométrico a partir de correntes gasosas insaturadas de ar. Além disso, esse trabalho também propõe estudar, por meio de uma simulação de balanço entálpico, o decaimento térmico ao longo do tempo de um ambiente doméstico acoplado a um ciclone, a fim de analisar a viabilidade da troca de solventes na obtenção do conforto térmico.

1.1 Objetivos

Este trabalho teve como objetivo principal analisar o ganho no decaimento térmico de sistemas evaporadores psicrométricos indiretos ao substituir a água por outros fluidos (puros ou combinados). Os fluidos selecionados foram o álcool etílico, a acetona e as misturas equivolumétrica e equimolar para os sistemas álcool etílico/água e acetona/água.

Tal escolha foi feita levando em consideração uma série de fatores. Dentre eles, disponibilidade nos laboratórios da Universidade, custo, e de forma mais impactante, a volatilidade, a miscibilidade com a água.

Para tanto, os objetivos específicos foram:

- determinar a temperatura de bulbo úmido de fluidos diferentes da água em dias com diferentes umidades relativas;
- analisar, via balanço energético, o decaimento térmico do interior de um quarto de 14 m² ao longo do tempo mediante o acoplamento a um ciclone psicrométrico;
- calcular teoricamente o consumo do solvente utilizado para resfriar o quarto de 14 m² pelo ciclone.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Fundamentos da Psicrometria

A psicrometria não possui uma data de surgimento exata, sabe-se que existem artigos desde a metade do século XIX que já estudavam os efeitos da água presente no ar (NOBLE, 1856 *apud* CALLAHAN *et al.*, 2019). Sabe-se também que diversas obras literárias propõem equações matemáticas para descrever os fenômenos psicrométricos, sendo a principal, a de MCCABE *et al.* (1993).

O estudo da psicrometria começa com uma analogia entre os transportes de energia e massa, os quais partem do pressuposto de que o decaimento térmico se dá pela retirada de calor que o líquido promove durante sua mudança de fase. MCCABE *et al.* (1993) propuseram um equacionamento relativamente simples para explicar o fenômeno (Equação 2.1).

$$\frac{\mathcal{H} - \mathcal{H}_w}{T - T_w} = - \frac{h}{M_B k_c \lambda_w} \quad (2.1)$$

na qual $\mathcal{H}$ (kmol/m³) é a umidade absoluta do ar, $\mathcal{H}_w$ (kmol/m³) é a umidade de saturação na temperatura de bulbo úmido, T é a temperatura ambiente, T_w (°C) é a temperatura de bulbo úmido, M_B (kg/kmol) é a massa molecular da água, k_c (m/s) é o coeficiente convectivo de transferência de massa do sistema, h (W/m²·°C) é o coeficiente convectivo de transferência de calor do sistema e λ_y (J/kg) é a entalpia de vaporização da água à temperatura de bulbo úmido.

À primeira vista, a equação é simples, entretanto, h e k_c são grandezas termofluidodinâmicas difíceis de serem estimadas, mas a obra de MCCABE *et al.* (1993) também mostra que, com a combinação dos números adimensionais de Prandtl (Pr) e Schmidt (Sc), é possível aproximar a razão entre h e k_c pela Equação 2.2.

$$\frac{h}{k_c} = M_B C_p \left(\frac{Sc}{Pr} \right)^{2/3} \quad (2.2)$$

$$Sc = \frac{\mu}{\rho D_{AB}} \quad (2.3)$$

$$Pr = \frac{\mu C_p}{k} \quad (2.4)$$

nas quais μ (Pa · s) e ρ (kg/m³) são, respectivamente, a viscosidade dinâmica e a densidade, c_p (J/(kg · °C)) é o calor específico à pressão constante e k (W/m · °C) é a condutividade térmica, todos se referindo ao gás (fluido majoritário que recebe os vapores do líquido evaporado). Além disso, D_{AB} (m²/s) é a difusividade mássica da espécie química evaporada (A) no gás (B), ou seja, para o caso atual, a difusividade mássica do vapor de água no ar.

Como expósito anteriormente, a temperatura de bulbo úmido é a mínima temperatura possível de ser atingida via evaporação de água por efeito psicrométrico. Já a umidade é uma variável também proposta por MCCABE *et al.* (1993), que se trata de uma forma distinta de se descrever a concentração de vapor de água no ar. As umidades na Equação 2.1 são expressas de forma absoluta, o que significa que descrevem literalmente a massa de água presente em um certo volume de ar em base seca.

2.2 A Psicrometria no contexto do resfriamento

É de conhecimento público que a psicrometria tem uma utilização extremamente ampla no mundo como um todo. O maior exemplo são as torres de resfriamento, que são necessárias, uma vez que a água quente remanescente de processos deve sempre ser reaproveitada. Tais sistemas usam *sprays* de água que se chocam com correntes de ar em contracorrente, gerando uma evaporação de parte da água e, subsequentemente, o resfriamento da água remanescente por efeito psicrométrico (CORTINOVIS *et al.*, 2006). Além das torres de resfriamento, outros exemplos clássicos e que funcionam de maneira extremamente parecida, são os saturadores adiabáticos, que se consistem em equipamentos que resfriam correntes forçadas de ar a partir de jatos particulados de água (FRADE *et al.*, 2006).

O potencial da psicrometria de resfriar é explorado pela engenharia a partir de diversos trabalhos técnico-científicos que buscam propor novos equipamentos de climatização que utilizam esse fenômeno evaporativo (direto ou indireto), tais como os sistemas propostos por Al-ZUBAYDI e HONG (2019), QIU e RIFFAT (2006) e DIAS *et al.* (2020). Estes últimos autores aproveitaram a fluidodinâmica dos escoamentos turbulentos de um ciclone para maximizar a troca térmica do ar em seu interior (DIAS *et al.* 2024) com as paredes finas resfriadas externamente por efeitos psicrométricos.

Entretanto, todos esses sistemas utilizaram a água como fluido de trabalho, sendo escassas na literatura referências que utilizaram misturas de solventes ou até mesmo outros fluidos.

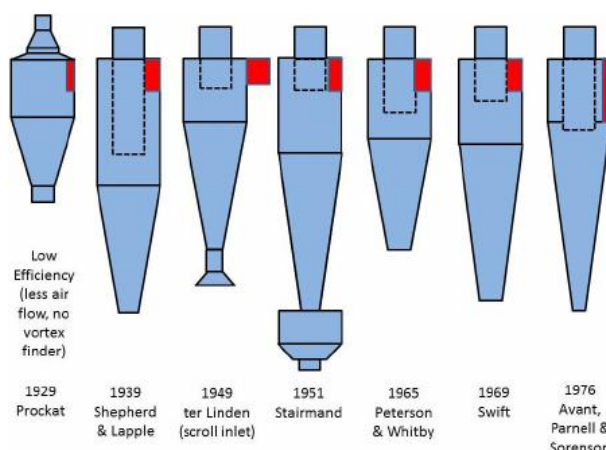
O sistema proposto por DIAS *et al.* (2019) é a base de estudo desse trabalho, pois consiste em um ciclone que resfria o ar interior ao evaporar líquido em seu exterior. Cujo funcionamento será melhor abordado no item 2.4.

2.3. Fundamentos básicos de ciclones

Ciclones são equipamentos de separação compostos por uma parte cilíndrica (superior) conectada a uma parte cônica (inferior), que utilizam da força centrífuga como principal meio de separação. A entrada do ar é realizada sob pressão à tangente da parte cilíndrica, o que força o ar sujo a espiralar dentro do equipamento. Posteriormente, esse movimento giratório alcança a região inferior do ciclone, que por ser cônica, gera um estrangulamento na sua saída inferior, o que cria um contrafluxo ascendente de gás limpo que sai pela abertura superior do equipamento. A abertura inferior no cone do ciclone é denominada de orifício de *underflow*, que é por onde saem os sólidos que foram separados, enquanto a saída superior no topo do cilindro é denominada de tubo de *overflow*, por onde sai o ar mais limpo acompanhado das partículas mais finas (HOFFMAN e STEIN, 2008).

Além disso, ciclones possuem diversas geometrias distintas, cujas principais dimensões podem ser combinadas entre si, tais como o diâmetro do cilindro, o diâmetro da alimentação, o diâmetro do *overflow*, o comprimento do *vortex finder*, o comprimento total do equipamento e o ângulo do troco de cone. As razões geométricas de um determinado ciclone geram resultados distintos em termos de perda de carga e eficiência de coleta de material particulado. Dentre as diversas possibilidades, as configurações geométricas mais tradicionais são as de Lapple e de Stairmand (MASSARANI, 1997). Entretanto, existem diversas patentes de proporções geométricas diferentes, como mostrado por FUNK *et al.*, (2000) (figura 2.1).

Figura2.1- Diferenças entre diversas geometrias padrão de ciclones.



Fonte: FUNK *et al.* (2000).

Vale ressaltar que ciclones, por mais que não sejam tão eficientes quanto filtros de manga ou ciclofiltros, são amplamente utilizados na maioria dos setores industriais, pois geralmente entregam uma eficiência de separação aceitável unida a um baixo custo, alta praticidade e baixa necessidade de manutenção (GAWALI e BHAMBERE, 2015). Dessa forma, aproveitar o máximo da funcionalidade desses equipamentos é indispensável para diversos setores. Sendo assim, independentemente da separação de material particulado, um equipamento de resfriamento com as características citadas acima representa um grande avanço na tecnologia e na ciência, pois devido ao seu escoamento turbulento, podem os ciclones serem utilizados como bons trocadores de calor.

2.4. Utilização de Ciclones na Troca Térmica Evaporativa

Uma característica notável de ciclones é o escoamento extremamente turbulento do ar nos seus interiores. Devido ao fato de que dois vórtices contrários competem espaço dentro do equipamento, o meio se torna extremamente agitado, o que pode ser comprovado pelo estudo fluidodinâmico de ciclones apresentado por DIAS *et al.* (2024). Tal estudo também mostra como o coeficiente convectivo de transferência de calor (coeficiente de película) também é acentuado pela turbulência do interior do equipamento, favorecendo trocas térmicas.

O sistema de DIAS *et al.* (2020) consiste na umidificação de um meio poroso (algodão ou gaze) que reveste as paredes externas de um ciclone. Essas paredes, por sua vez, são submetidas a uma corrente de ar externa, o que força a evaporação psicrométrica

da água contida no meio poroso. Tal fenômeno gera um decaimento térmico na estrutura, que resfria a parede do ciclone e interage com o ar quente que circula internamente, uma vez que sua carcaça é construída com paredes extremamente finas (0,3 mm) e um material bom condutor de calor (alumínio). Subsequentemente, a turbulência observada no interior do ciclone contribui para que o ar quente em seu interior troque calor com as paredes resfriadas em uma taxa relativamente elevada em face dos bons coeficientes de película estabelecidos.

Além disso, DIAS *et al.* (2021) também propuseram uma expressão empírica que estima o valor do coeficiente convectivo de transferência de calor entre o ar e as paredes do ciclone, dada pela Equação 2.5.

$$h = 2825 Q^{0,93} \quad (2.5)$$

na qual Q (m^3/s) corresponde à vazão volumétrica de operação do ciclone.

Após realizar simulações de balanço energético, DIAS *et al.* (2020) conseguiram prever o resfriamento de uma sala de 20 m^2 a temperaturas próximas de 18°C em apenas 15 min em condições operacionais de dias mais secos ($\mathcal{H}=22,5\%$). Neste trabalho, simulações semelhantes foram realizadas, porém, além da água, outros fluidos ou soluções foram testados durante o procedimento evaporativo.

3 Materiais e Métodos

Para estudar os efeitos psicrométricos do tipo de solvente a ser evaporado no sistema de bulbo úmido, quatro condições operacionais foram analisadas inicialmente. A primeira condição operacional foi uma solução com padrão analítico de etanol puro; a segunda foi uma solução equivolométrica de etanol e água; a terceira foi uma solução com padrão analítico de acetona pura; e a quarta foi uma solução equivolométrica de acetona com água. Posteriormente, as análises foram refeitas, mas dessa vez com as mesmas soluções em proporção equimolar (0,76 para o etanol e 0,8 para a acetona em volume). No caso das soluções equivolométricas para etanol/água e acetona/água, registra-se que elas equivalem a razões molares de 0,76/0,24 e 0,8/0,2; respectivamente.

Posto isso, vale ressaltar novamente, que tais solventes foram escolhidos por sua disponibilidade nos laboratórios da Universidade, seus custos, e por serem miscíveis em água e muito voláteis, o que facilita a obtenção, o manuseio e a evaporação na primeira etapa do trabalho.

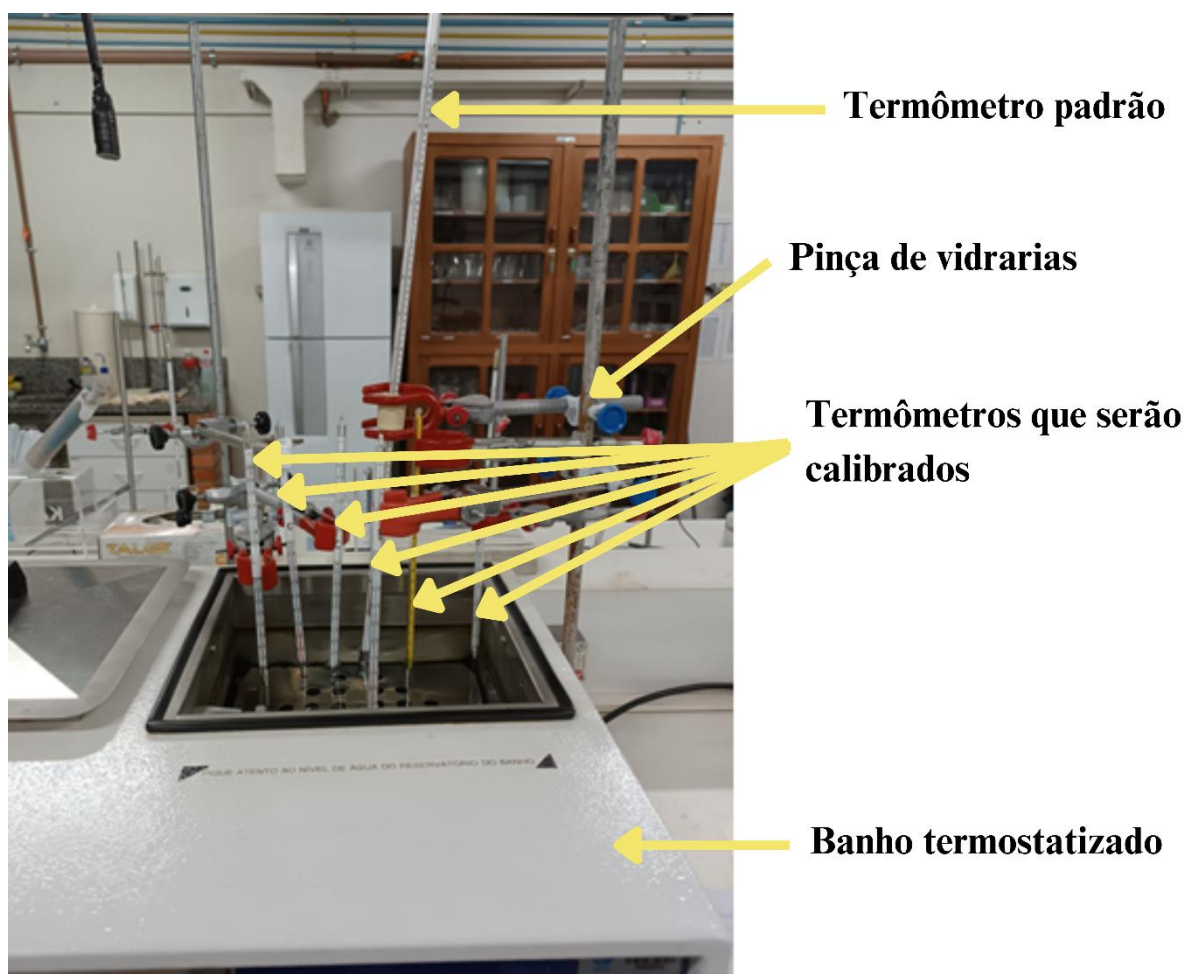
Primeiramente, a temperatura de bulbo úmido foi medida para todas as soluções. Posteriormente, as temperaturas encontradas para cada solução foram utilizadas em cálculos teóricos de balanço de energia, a fim de se analisar o comportamento térmico no interior de um quarto de 14 m² ao longo do tempo.

3.1 Calibração dos termômetros

Para os testes de temperatura de bulbo úmido e seco, foi necessário o uso de seis termômetros analógicos, dos quais, quatro foram de mercúrio e dois de etanol. Entretanto, os modelos, os fluidos e as marcas de alguns termômetros eram diferentes, fazendo-se necessária uma calibração.

A calibração foi feita com um banho termostatzado e um termômetro padrão, ou seja, os bulbos dos termômetros que seriam usados no experimento foram mergulhados em banhos em algumas temperaturas conhecidas. Posteriormente, os valores das temperaturas aferidas em todos os termômetros foram anotados para serem comparados com as temperaturas do termômetro padrão. Com isso, curvas de calibração foram construídas e, por regressão linear, uma equação de reta foi gerada para cada um dos termômetros que transforma a temperatura aferida (abscissa), na temperatura padrão (ordenada). Uma imagem da montagem da calibração pode ser vista na Figura 3.1.

Figura 3.1 – Montagem experimental da calibração dos termômetros.



Fonte: o autor.

A calibração dos termômetros foi realizada no Laboratório Didático 1 da Faculdade de Engenharia Química da Universidade Federal de Uberlândia (FEQUI-UFU), cujos materiais utilizados foram:

- banho Termostatizado Tecnal TE-183;
- prendedores de vidrarias;
- termômetro Padrão com divisão de $0,5^{\circ}\text{C}$;
- 6 termômetros da marca INCONTERM com divisão de 1°C .

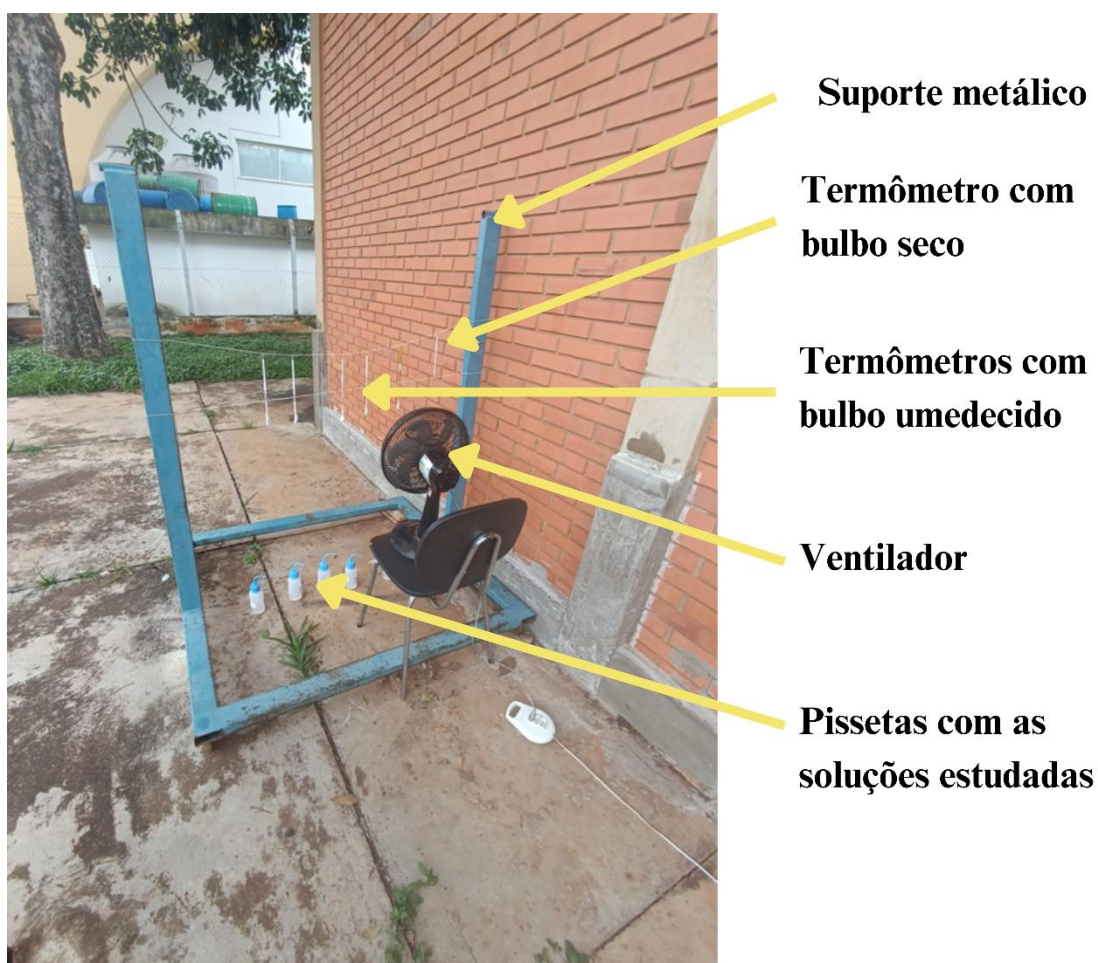
3.2 Determinação da temperatura de bulbo úmido

Essa etapa foi realizada com o intuito de avaliar o potencial de decaimento térmico das soluções etanol/água (hidroetanólica) e acetona/água (hidroacetônica) e dos fluidos

etanol e acetona. Dessa forma, se consistiu em uma estratégia de prever qual solução teria um resultado melhor quando utilizada no ciclone resfriador.

A montagem experimental consistiu em seis termômetros fixados a dois barbantes que estavam presos a um suporte metálico, de maneira que eles pudessem se mover para os lados. Dessa forma, o barbante superior os manteve pendurados, enquanto o barbante inferior serviu como um amparo para evitar movimentação com as correntes de ar. Dos seis termômetros, cinco tiveram o bulbo revestido com algodão umedecido com o fluido/solução de interesse. Uma foto da montagem experimental pode ser vista na Figura 3.2.

Figura 3.2 – Montagem experimental da avaliação do decaimento térmico.



Fonte: o autor.

Nessa etapa, quatro termômetros foram umedecidos com as soluções citadas anteriormente (etanol/água, acetona/água, etanol e acetona) e um termômetro com a água para fins de comparação. Dessa forma, todas as soluções de água com etanol e água com acetona foram preparadas utilizando-se duas provetas de 200 mL, uma para cada solução. As soluções e os fluidos puros foram colocadas em pissetas distintas.

Em frente aos termômetros, foi posicionado um ventilador que promovia uma corrente de ar com velocidade média de 4,5 m/s, medida com o anemômetro de fio quente, cujo valor estava dentro da faixa ideal descrita por MCCABE *et al.* (1993). A cada medida, para evitar interferências na evaporação do composto do termômetro ao lado, os termômetros vizinhos eram deslizados para longe e o ventilador era posicionado na frente do termômetro em questão. Durante a realização dos experimentos, a umidade relativa do *campus* Santa Mônica foi consultada, via internet, a partir da estação Meteorológica instalada junto ao Instituto de Geografia da UFU.

Essa etapa experimental foi conduzida na parte externa do bloco 1Z-B da Universidade Federal de Uberlândia, em frente ao Laboratório de Separação e Energias Renováveis da Faculdade de Engenharia Química (LASER/FEQUI), cujos materiais utilizados encontram-se listados a seguir:

- 6 termômetros da marca INCONTERM com divisão de 1°C.
- solução de etanol padrão analítico;
- anemômetro de fio quente da marca Minipa MDA-11;
- solução de acetona padrão analítico;
- água destilada;
- 5 pissetas;
- suporte metálico;
- cadeira;
- extensão elétrica;
- ventilador Britânia Ventus 30 Six (40 Watts);
- algodão;
- barbante;
- tesoura;
- fita adesiva.

Esse experimento foi realizado em seis datas diferentes, todas com a mesma montagem experimental. O primeiro teste ocorreu no dia 08 de setembro de 2023, o segundo no dia 02 de novembro de 2023, o terceiro no dia 12 de janeiro de 2024, o quarto no dia 27 de junho de 2024, o quinto no dia 28 de junho de 2024 e o sexto no dia 17 de julho de 2024, sendo os três primeiros dias realizados com proporção equivolúmica e os três últimos dias com a proporção equimolar. Tais dias foram escolhidos objetivando uma alternância entre períodos quentes e frios, bem como secos e úmidos. Além disso, com a finalidade de melhorar a reprodutibilidade dos experimentos, os termômetros foram etiquetados de uma forma que o mesmo termômetro fosse usado para cada fluido nos seis dias.

3.3 Simulação do resfriamento de um quarto com ciclone psicrométrico

Essa etapa se consistiu em uma análise teórica do resfriamento de um quarto de 14 m² por meio da resolução de um balanço de energia. A simulação foi feita levando em consideração que o quarto perdia calor para o ciclone e ganhava do meio ambiente externo, ambas sendo trocas de calor por convecção. Sendo assim, a Equação 3.1 pode descrever a modelagem proposta.

$$\rho V_s c_p \frac{dT}{dt} = UA_s(T_\infty - T) - hA_c(T - T_w) \quad (3.1)$$

na qual T (°C) é a temperatura do cômodo, que varia em função do tempo (t), ρ (kg/m³) e c_p (J/(kg · °C)) são a densidade e o calor específico do ar, respectivamente, U (W/(m² · °C)) é o coeficiente global de troca térmica entre o quarto e o ambiente externo, A_s (m²) é a área superficial externa do quarto, T_∞ (°C) é a temperatura do ambiente externo, h (W/(m² · °C)) é o coeficiente de película dado pela Equação 2.5, A_c (m²) é a área superficial interna do ciclone e T_w (°C) é a temperatura de bulbo úmido para uma dada condição. De acordo com PALHARES *et al.* (2020), os valores da densidade e do calor específico do ar podem ser estimados pelas Equações 3.2 e 3.3.

$$\rho = \frac{351,825}{T} \quad (3.2)$$

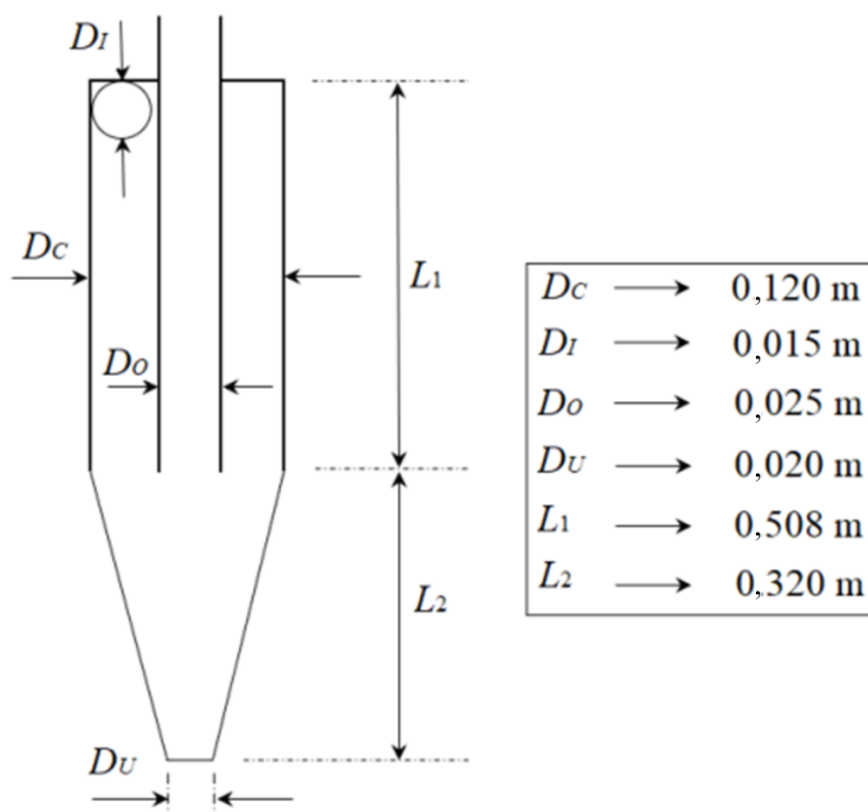
$$c_p = 1060 - 0,4416T + 1,096 \cdot 10^{-3}T^2 - 7,5 \cdot 10^{-5}T^3 + 1,79 \cdot 10^{-10}T^4 \quad (3.3)$$

O ambiente estudado foi um quarto, uma vez que é o ambiente mais propenso à necessidade de conforto térmico. Sendo assim, foi considerado um espaço de 14 m² de chão e 2,8 m de pé direito, pois segundo diversas empresas de arquitetura, um quarto de casal confortável deve ter entre 12 e 16 m². Dessa forma, o volume efetivo do espaço calculado foi de 39,2 m³. Já para o cálculo da área lateral, foram consideradas apenas as paredes laterais dos cômodos na troca térmica, uma vez que elas estão em contato direto com, ou o ambiente externo, ou outros cômodos da casa, que provavelmente estão mais quentes. Posto isso, a área de troca térmica lateral foi de 41,91 m².

Ademais, foi considerada uma construção de tijolos comerciais de 20 cm de espessura, que possuíam condutividade térmica de 0,2 W/(m · K), o que acarretava em um coeficiente global de troca térmica (U) com o ambiente de 0,7 W/(m² · K) (INCROPERA e DEWIT, 2003). Além disso, em seu trabalho, DIAS *et al.* 2021 citaram que a Equação 2.5 apresentava resultados mais precisos para vazões volumétricas de recirculação de ar de até 0,01 m³/s por ciclone, que foi justamente a vazão adotada para esse trabalho.

De acordo com DIAS *et al.* (2021), a pior e a melhor razão entre o número de ciclones e a área do quarto foram de 0,200 e 2,400; respectivamente. Dessa forma, a razão adotada foi de 0,357. Nesta razão, significa dizer que o sistema será uma bateria de cinco ciclones operando em paralelo para um cômodo de 14 m². Desse modo, cada ciclone seguiu as dimensões propostas por DIAS *et al.* (2021), que podem ser melhor contempladas na Figura 3.3.

Figura 3.3 - Dimensões do ciclone utilizado no balanço energético.



Fonte: DIAS *et al.* (2021).

Sendo assim, sabe-se que a área de troca térmica a ser utilizada na perda de calor do ambiente para as paredes do ciclone é de 0,2630 m².

3.4 Cálculo do consumo de solvente evaporativo do ciclone

Essa etapa fundamentou-se na utilização de duas equações importantes dos fenômenos de transporte. Uma delas, é a analogia de Chilton-Colburn (Equação 3.4) que, da forma como está representada, correlaciona os transportes de calor e massa. Já a outra, é a equação de fluxo convectivo de massa (Equação 3.5).

$$\frac{k_C}{h_E} = \frac{1}{\rho C_p} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{2/3} \quad (3.4)$$

$$N_A = k_C A_C (C_{AS} - C_{A\infty}) \quad (3.5)$$

Nas quais k_C (m/s) é o coeficiente convectivo de transferência de massa, ρ (kg/m³) e c_p (J/(kg · °C)) são a densidade e o calor

específico da água, respectivamente, Pr e Sc são os números adimensionais de Prandtl e Schmidt, N_A (kmol/s) é o fluxo molar de evaporação de solvente, A_c (m²) é a área externa do ciclone, C_{AS} (kmol/m³) e $C_{A\infty}$ (kmol/m³) são as concentrações de solvente na superfície do meio poroso e no ambiente respectivamente. Além disso, h_E (W/(m² · °C)) é o coeficiente convectivo de troca térmica externo do ciclone, que de acordo com INCROPERA e DEWITT (2003), pode ser considerado 10 W/(m² · K) para sistemas curvilíneos expostos à convecção controlada de gases.

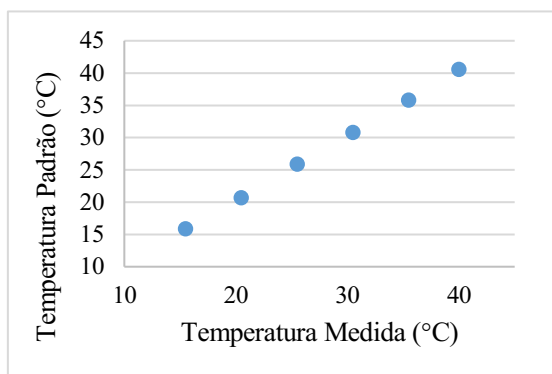
Ademais, vale ressaltar que a densidade e o calor específico (variáveis dependentes da temperatura) foram calculados a partir da temperatura de filme do sistema, que pode ser considerada igual à média aritmética entre as temperaturas de bulbo seco e úmido.

4 Resultados e Discussões

4.1 Calibração dos Termômetros

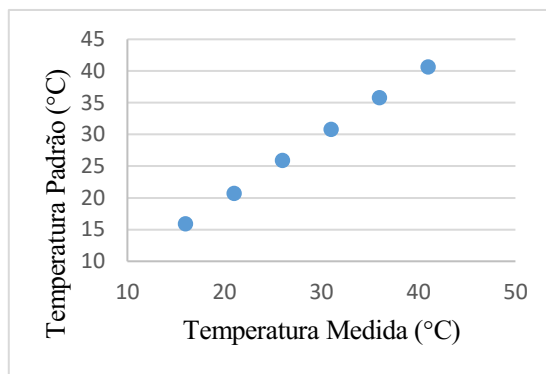
Para fins de precisão na repetitividade dos experimentos, os termômetros foram devidamente calibrados conforme o procedimento descrito na seção de metodologia. Uma equação linear de calibração foi gerada para cada um dos termômetros via regressão (Figuras de 4.1 a 4.6).

Figura 4.1 - Curva de calibração do termômetro seco.



Fonte: o autor.

Figura 4.2 - Curva de calibração do termômetro de água.



Fonte: o autor.

Figura 4.3 - Curva de calibração do termômetro de álcool.

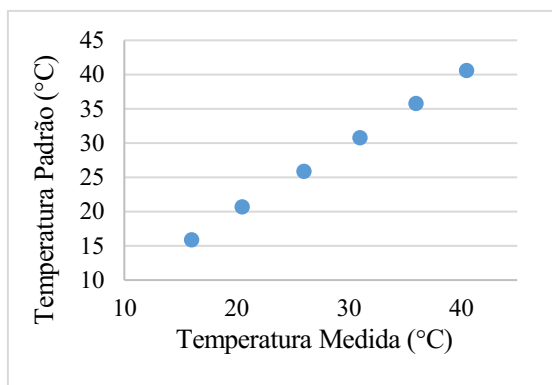


Figura 4.4 - Curva de calibração do termômetro da mistura de álcool e água.

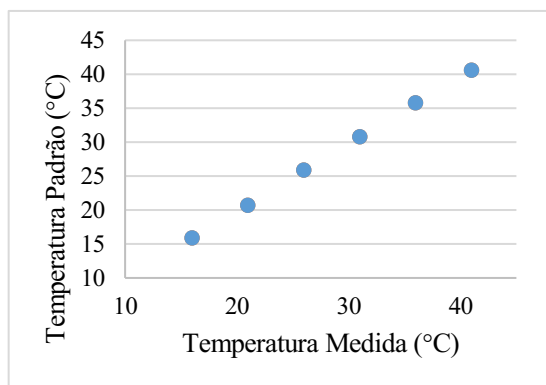
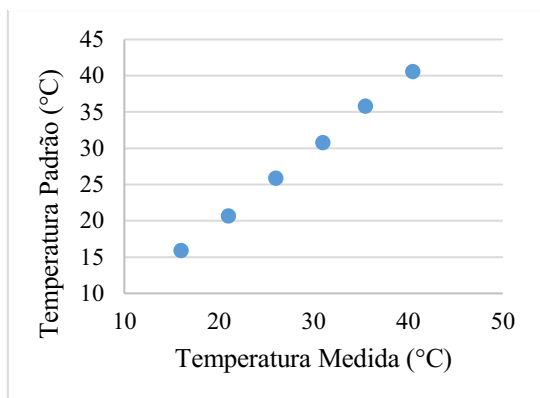
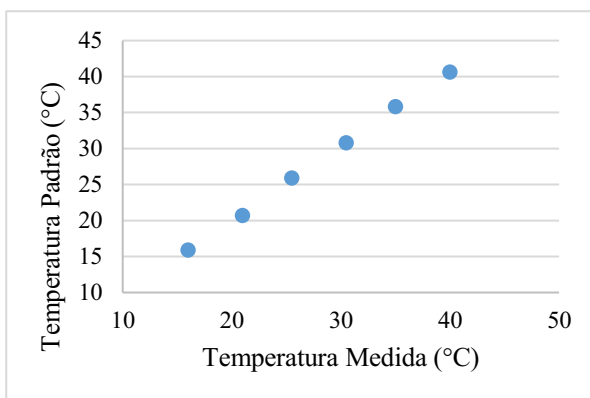


Figura 4.5 - Curva de calibração do termômetro de acetona.



Fonte: o autor.

Figura 4.6 - Curva de calibração do termômetro da mistura de acetona e água.



Fonte: o autor.

Dessa forma, o método da regressão linear foi aplicado em cada um dos gráficos acima, resultando nas equações e nos valores de coeficiente de determinação (R^2) contidos na Tabela 4.1, em que x representa a temperatura medida e y representa a temperatura corrigida (padrão).

Tabela 4.1 – Equações de calibração para cada termômetro utilizado.

Termômetro	Equação de Calibração	R^2
Bulbo Seco	$y = 1,0068 x + 0,1774$	0,9998
Bulbo umedecido com água	$y = 0,9926 x - 0,005$	0,9999
Bulbo umedecido com álcool puro	$y = 0,9978 x + 0,0122$	0,9997
Bulbo umedecido com a mistura de álcool e água	$y = 0,9926 x - 0,005$	0,9999
Bulbo umedecido com acetona pura	$y = 1,0156 x - 0,4908$	0,9997
Bulbo umedecido com a mistura entre água e acetona	$y = 1,0398 x - 0,8303$	0,9994

4.2 Determinação da temperatura de bulbo úmido

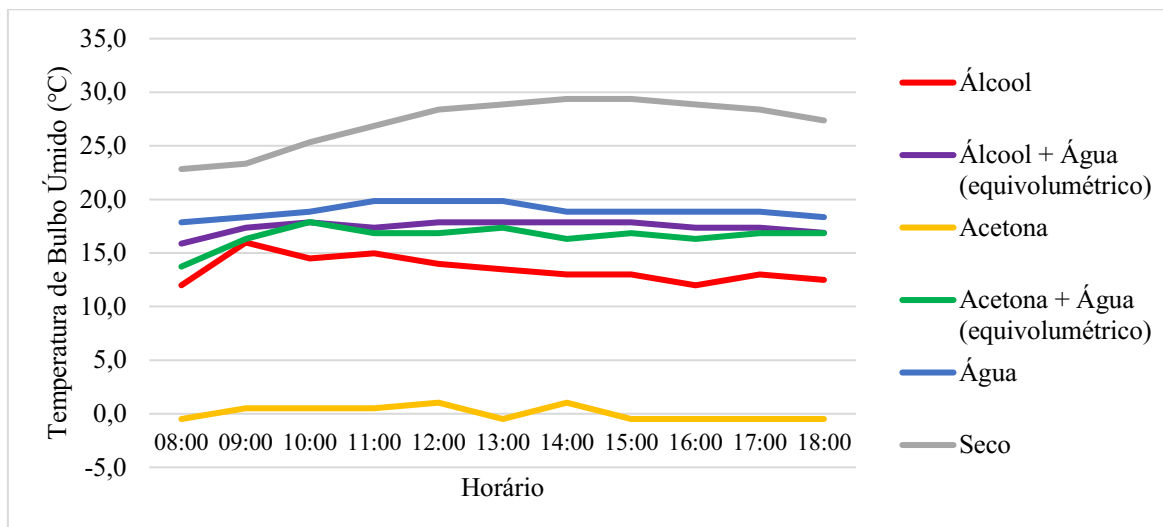
Para essa etapa, a temperatura de bulbo úmido de cada um dos fluidos foi colocada tanto em uma tabela, quanto em um gráfico para cada um dos três dias para facilitar a análise. Sendo assim, nas Tabelas de 4.2 a 4.4 e nas Figuras de 4.7 a 4.9, podem ser encontrados os resultados (já corrigidos com a calibração) para os experimentos descritos anteriormente. Nas tabelas também estão presentes os valores de umidade relativa obtidos do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tabela 4.2 – Decaimentos térmicos obtidos em 08/09/2023.

Horário	ΔT Álcool (°C)	ΔT Álcool e água (°C)	ΔT Acetona (°C)	ΔT Acetona e água (°C)	ΔT Água (°C)	Umidade Relativa (%)
08:00	10,8	7,0	23,3	9,1	5,0	-
09:00	7,4	6,0	22,8	7,0	5,0	-
10:00	10,9	7,5	24,8	7,5	6,5	-
11:00	11,9	9,5	26,3	10,0	7,0	62
12:00	14,4	10,5	27,3	11,5	8,5	57
13:00	15,4	11,0	29,4	11,5	9,0	51
14:00	16,4	11,5	28,3	13,0	10,5	45
15:00	16,4	11,5	29,9	12,5	10,5	39
16:00	16,9	11,5	29,4	12,5	10,0	33
17:00	15,4	11,0	28,9	11,5	9,5	30
18:00	14,9	10,5	27,9	10,5	9,0	26

Vale ressaltar que os três primeiros dados de umidade não estão presentes em decorrência de uma manutenção na estação do INMET do *campus* Santa Mônica no dia do experimento.

Figura 4.7 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 08/09/2023 para os diferentes fluidos e soluções.

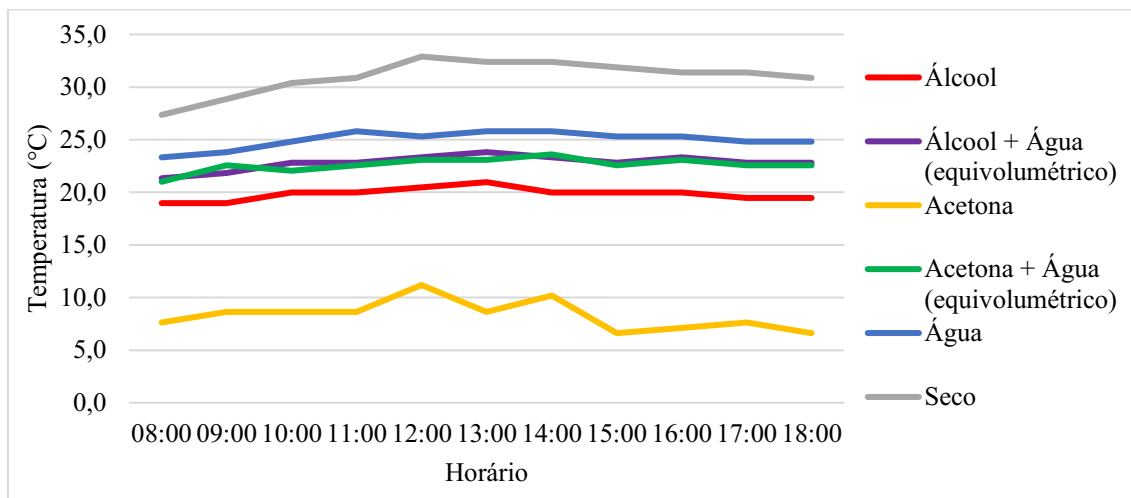


Fonte: o autor.

Tabela 4.3 - Decaimentos térmicos obtidos em 02/11/2023.

Horário	ΔT Álcool (°C)	ΔT Álcool e água (°C)	ΔT Acetona (°C)	ΔT Acetona e água (°C)	ΔT Água (°C)	Umidade Relativa (%)
08:00	8,4	6,0	19,7	6,4	4,0	79
09:00	9,9	7,0	20,2	6,3	5,1	79
10:00	10,4	7,6	21,7	8,3	5,6	74
11:00	10,9	8,1	22,2	8,3	5,1	73
12:00	12,4	9,6	21,7	9,8	7,6	64
13:00	11,4	8,6	23,7	9,3	6,6	55
14:00	12,4	9,1	22,2	8,8	6,6	44
15:00	11,9	9,1	25,3	9,3	6,6	41
16:00	11,4	8,1	24,3	8,3	6,1	40
17:00	11,9	8,6	23,8	8,8	6,6	37
18:00	11,4	8,1	24,3	8,3	6,1	37

Figura 4.8 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 02/11/2023 para os diferentes fluidos e soluções.

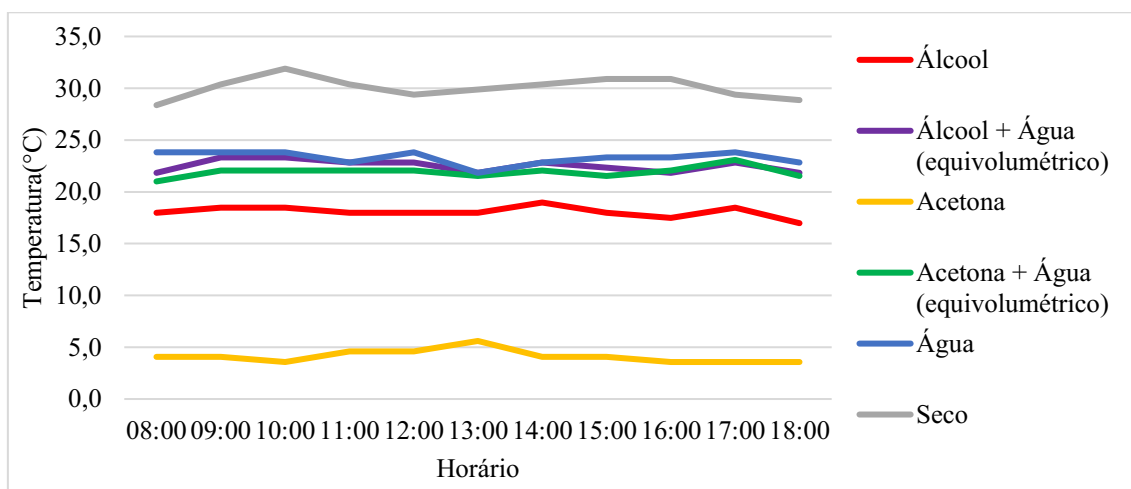


Fonte: o autor.

Tabela 4.4 - Decaimentos térmicos obtidos em 12/01/2024

Horário	ΔT Álcool (°C)	ΔT Álcool e água (°C)	ΔT Acetona (°C)	ΔT Acetona e água (°C)	ΔT Água (°C)	Umidade Relativa (%)
08:00	10,4	6,5	24,3	7,4	4,6	82
09:00	11,9	7,1	26,3	8,3	6,6	85
10:00	13,4	8,6	28,3	9,8	8,1	74
11:00	12,4	7,6	25,8	8,3	7,6	73
12:00	11,4	6,5	24,8	7,3	5,6	66
13:00	11,9	8,0	24,3	8,4	8,0	58
14:00	11,4	7,6	26,3	8,3	7,6	57
15:00	12,9	8,6	26,8	9,4	7,6	61
16:00	13,4	9,1	27,3	8,8	7,6	59
17:00	10,9	6,5	25,8	6,3	5,6	56
18:00	11,9	7,0	25,3	7,3	6,0	49

Figura 4.9 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 12/01/2024 para os diferentes fluidos e soluções.

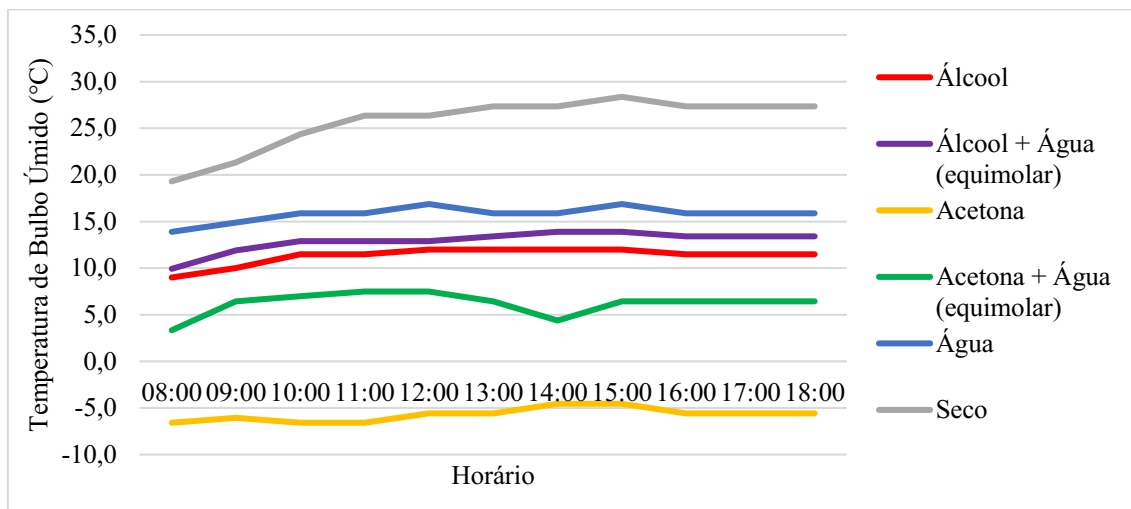


Fonte: o autor.

Tabela 4.5- Decaimentos térmicos obtidos em 27/06/2024

Horário	ΔT Álcool (°C)	ΔT Álcool e água (°C)	ΔT Acetona (°C)	ΔT Acetona e água (°C)	ΔT Água (°C)	Umidade Relativa (%)
08:00	10,3	9,4	25,9	16,0	5,4	54
09:00	11,3	9,4	27,4	14,9	6,4	45
10:00	12,9	11,4	30,9	17,4	8,5	50
11:00	14,9	13,5	32,9	18,9	10,5	57
12:00	14,4	13,5	31,9	18,9	9,5	44
13:00	15,4	14,0	32,9	20,9	11,5	34
14:00	15,4	13,5	31,9	23,0	11,5	30
15:00	16,4	14,5	32,9	21,9	11,5	28
16:00	15,9	14,0	32,9	20,9	11,5	25
17:00	15,9	14,0	32,9	20,9	11,5	24
18:00	15,9	14,0	32,9	20,9	11,5	24

Figura 4.10 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 27/06/2024 para os diferentes fluidos e soluções.

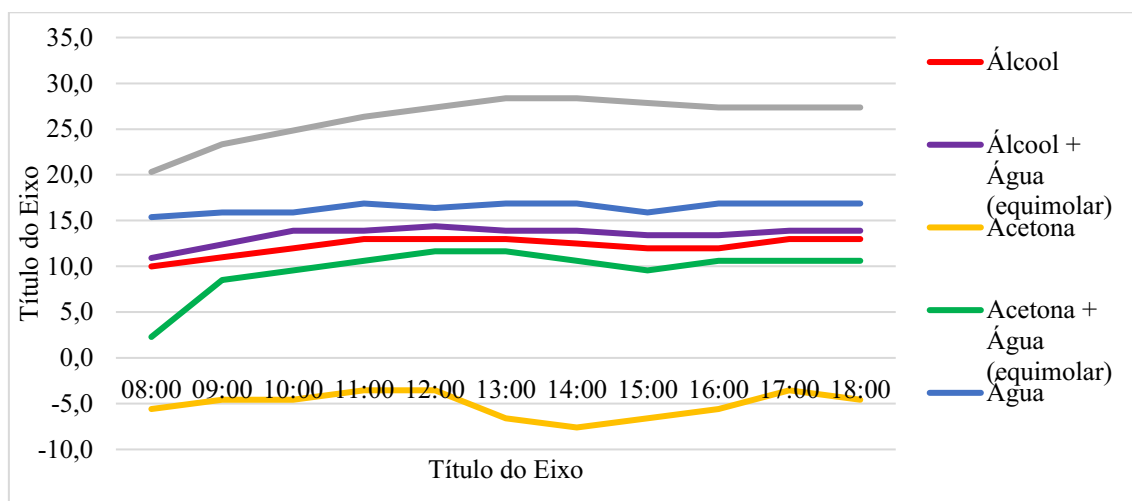


Fonte: o autor.

Tabela 4.6- Decaimentos térmicos obtidos em 28/06/2024

Horário	ΔT Álcool (°C)	ΔT Álcool e água (°C)	ΔT Acetona (°C)	ΔT Acetona e água (°C)	ΔT Água (°C)	Umidade Relativa (%)
08:00	10,3	9,4	25,9	18,0	4,9	51
09:00	12,3	10,9	27,9	14,8	7,5	55
10:00	12,9	11,0	29,4	15,3	9,0	59
11:00	13,4	12,5	29,9	15,7	9,5	48
12:00	14,4	13,0	30,9	15,7	11,0	39
13:00	15,4	14,5	35,0	16,7	11,5	33
14:00	15,9	14,5	36,0	17,8	11,5	31
15:00	15,9	14,5	34,4	18,3	12,0	29
16:00	15,4	14,0	32,9	16,8	10,5	27
17:00	14,4	13,5	30,9	16,8	10,5	26
18:00	14,4	13,5	31,9	16,8	10,5	25

Figura 4.11 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 28/06/2024 para os diferentes fluidos e soluções.

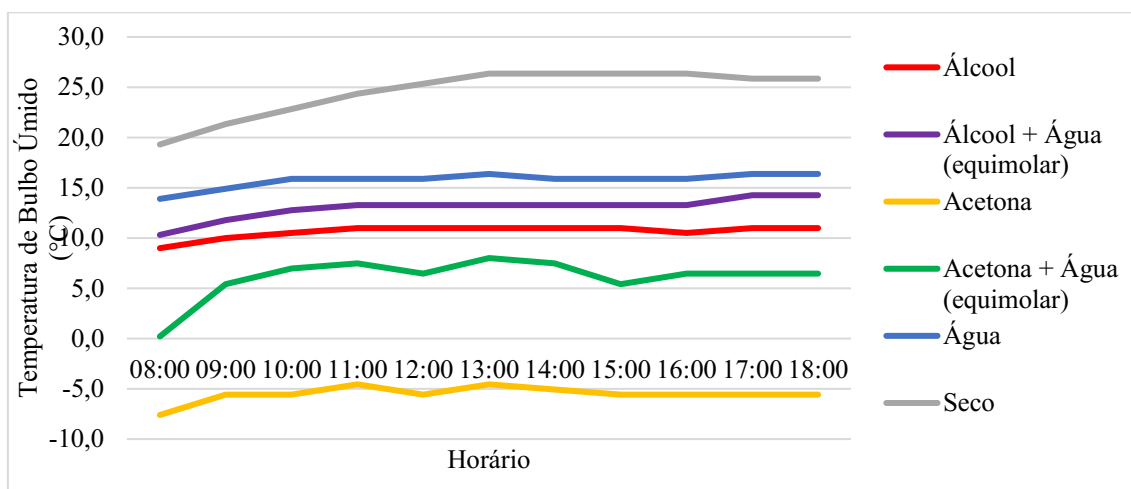


Fonte: o autor.

Tabela 4.7- Decaimentos térmicos obtidos em 17/07/2024

Horário	ΔT Álcool (°C)	ΔT Álcool e água (°C)	ΔT Acetona (°C)	ΔT Acetona e água (°C)	ΔT Água (°C)	Umidade Relativa (%)
08:00	10,3	9,0	26,9	19,1	5,4	57
09:00	11,3	9,5	26,9	15,9	6,4	62
10:00	12,3	10,1	28,4	15,9	7,0	63
11:00	13,4	11,1	28,9	16,9	8,5	52
12:00	14,4	12,1	30,9	18,9	9,5	44
13:00	15,4	13,1	30,9	18,3	10,0	38
14:00	15,4	13,1	31,4	18,9	10,5	33
15:00	15,4	13,1	31,9	20,9	10,5	31
16:00	15,9	13,1	31,9	19,9	10,5	27
17:00	14,9	11,6	31,4	19,4	9,5	26
18:00	14,9	11,6	31,4	19,4	9,5	24

Figura 4.12 - Temperaturas de bulbo úmido e seco ao longo do experimento do dia 17/07/2024 para os diferentes fluidos e soluções.



Fonte: o autor.

À primeira vista, ficou evidente que a presença de um solvente volátil acentuou consideravelmente o decaimento térmico do sistema. Percebeu-se também, que a acetona pura proporcionou o maior decaimento térmico dentre todas as soluções propostas. Entretanto, por mais que o etanol e a acetona proporcionem decaimentos térmicos diferentes, no momento que estes são misturados com água, eles passam a mostrar uma queda de temperatura expressivamente menor.

Sabe-se que a difusividade mássica da água ($2,6 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) é quase duas vezes maior do que a da acetona ($1,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) e a do álcool ($0,95 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$). Além disso, sabe-se que os calores de vaporização destas espécies são relativamente próximos. Entretanto, a queda térmica é mais acentuada nos solventes orgânicos em questão devido às suas condições de saturação, uma vez que a pressão de vapor da água é de quatro a seis vezes menor que a da acetona e de duas a três vezes menor que a do álcool.

Além disso, nota-se que o decaimento térmico do etanol e da acetona variam de uma forma relativamente fraca com a umidade relativa do ar. Provavelmente, isso ocorre por conta da razão entre a variação de concentração (umidade absoluta). Uma vez que água é uma espécie muito mais abundante no ar do que outros solventes como o etanol e a acetona, a variação de concentração no local do experimento para os dois últimos é muito maior, resultando em uma dependência muito menor da umidade do ar.

Dessa forma, pode-se dizer que puros, o Etanol e a Acetona teriam um grande potencial resfriativo quando usados em equipamentos de resfriamento psicrométricos, com um ganho médio de 5°C no decaimento para o Etanol e um ganho médio de quase de 20°C para a Acetona. Entretanto, a utilização destes solventes puros em resfriadores evaporativos indiretos pode ter implicações ambientais e econômicas que merecem uma avaliação mais criteriosa, inclusive acerca da recuperação e reaproveitamento de tais solventes.

4.3 Simulação do resfriamento de um quarto com um ciclone psicrométrico

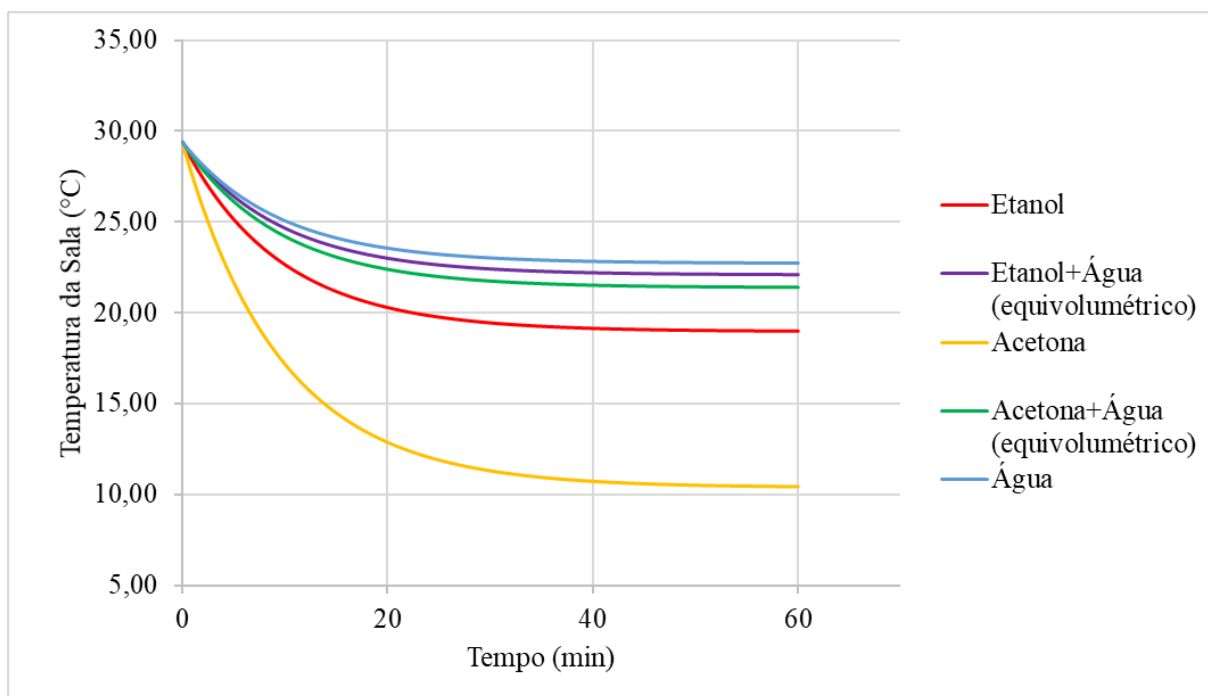
Para essa etapa, foi selecionado o horário mais quente de cada um dos dias da etapa 4.2, uma vez que o conforto térmico geralmente é desejado nos dias mais quentes. Assim sendo, o balanço de energia descrito pela Equação 3.1 foi aplicado para cada temperatura de bulbo úmido registrada no horário escolhido. Posto isso, foi feita uma comparação que mostra o comportamento da temperatura do quarto durante o período de uma hora mediante a bateria de ciclones em operação.

Na Tabela 4.8, apresenta-se o horário escolhido de cada um dos dias, bem como as temperaturas de bulbo úmido e seco respectivas a este horário. Além disso, nas Figuras de 4.13 a 4.18 mostra-se o comportamento térmico no interior do quarto em função das condições operacionais escolhidas. Ademais, vale ressaltar, que as soluções hidroacetônica e hidroetanólica foram preparadas com proporção equivolométrica nos três primeiros dias e equimolar nos três últimos.

Tabela 4.8 – Condições operacionais selecionadas para as simulações.

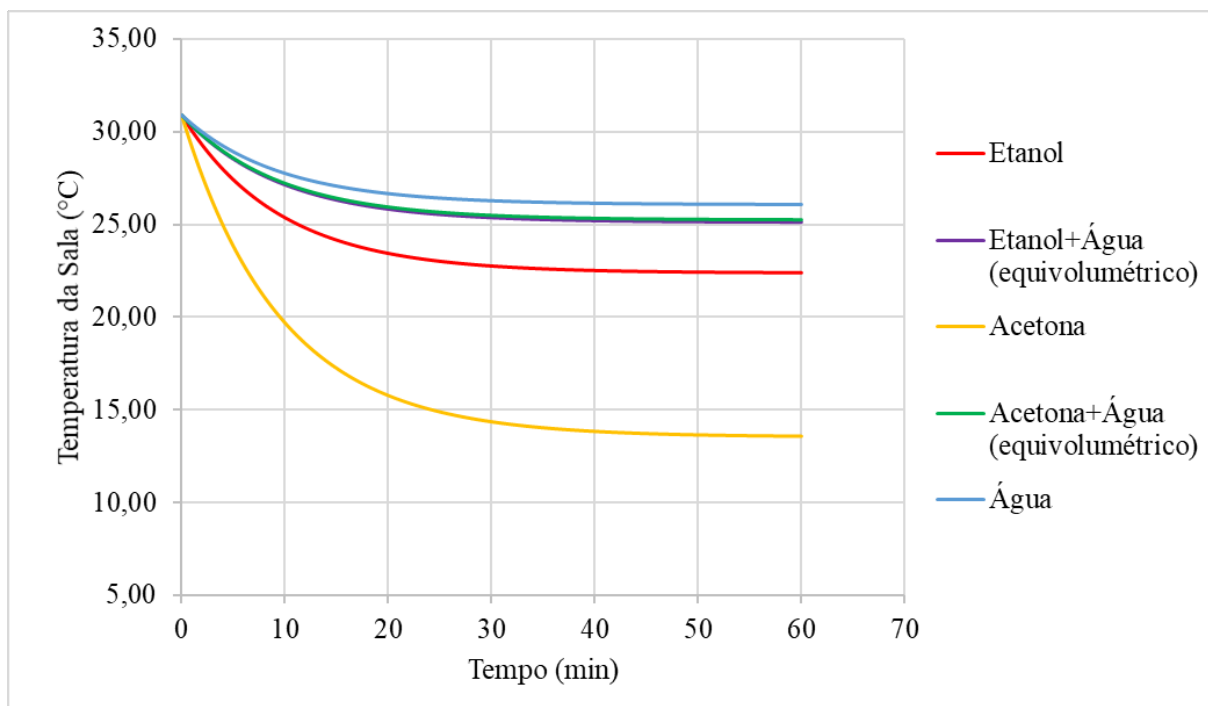
Dia	Horário	Tw Álcool (°C)	Tw Alcool e água (°C)	Tw Acetona (°C)	Tw Acetona e água (°C)	Tw Água (°C)	T (°C)
08/09/2023	15:00	13,0	17,9	-0,5	16,8	18,9	29,4
02/11/2023	12:00	20,5	23,3	11,2	23,1	25,3	32,9
12/01/2024	16:00	17,5	21,8	3,6	22	23,3	30,9
27/06/2024	15:00	12,0	13,9	-4,6	6,4	16,9	28,4
28/06/2024	14:00	12,5	13,9	-7,6	10,6	16,9	28,4
17/07/2024	15:00	11,0	13,3	-5,6	5,4	15,9	26,4

Figura 4.13 – Simulação referente à **condição mais quente** do dia 08/09/2023



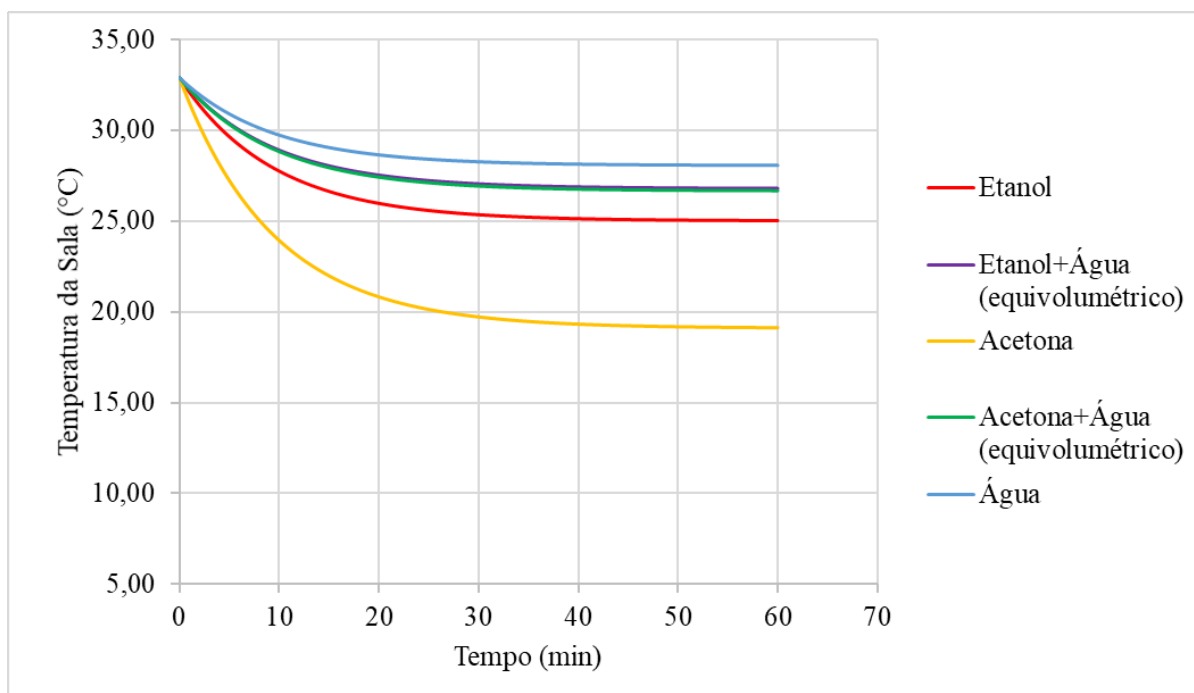
Fonte: o autor.

Figura 4.14 - Simulação referente à **condição mais quente** do dia 02/11/2023



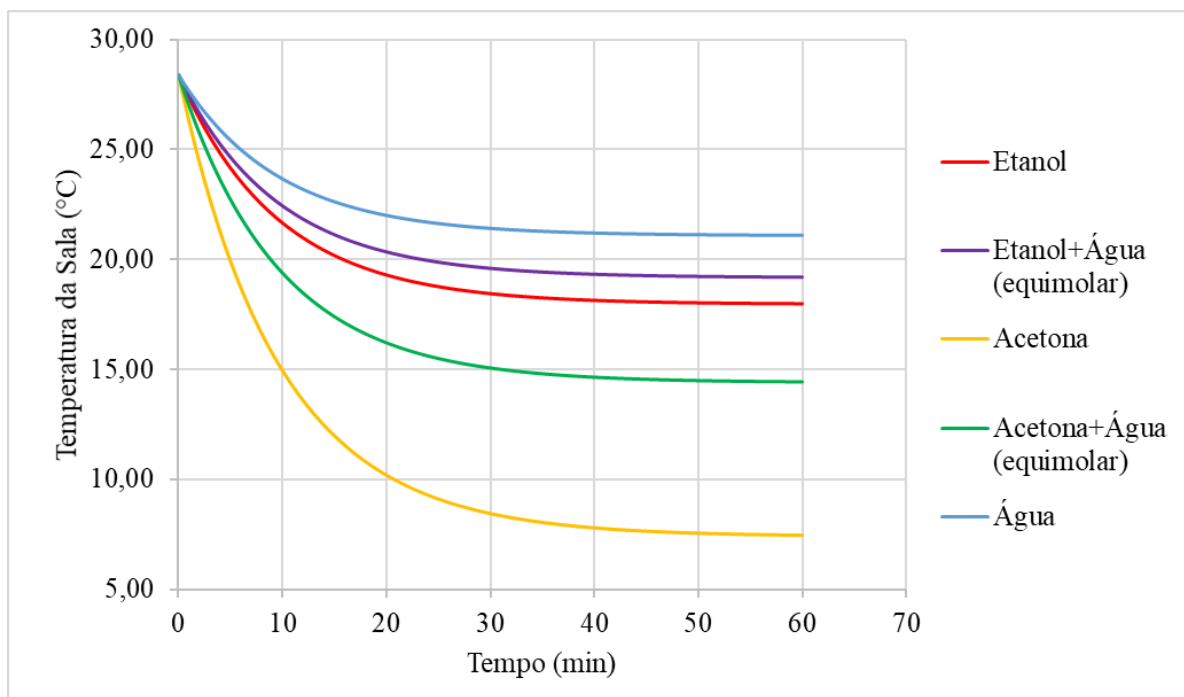
Fonte: o autor.

Figura 4.15 – Simulação referente à **condição mais quente** do dia 12/01/2024



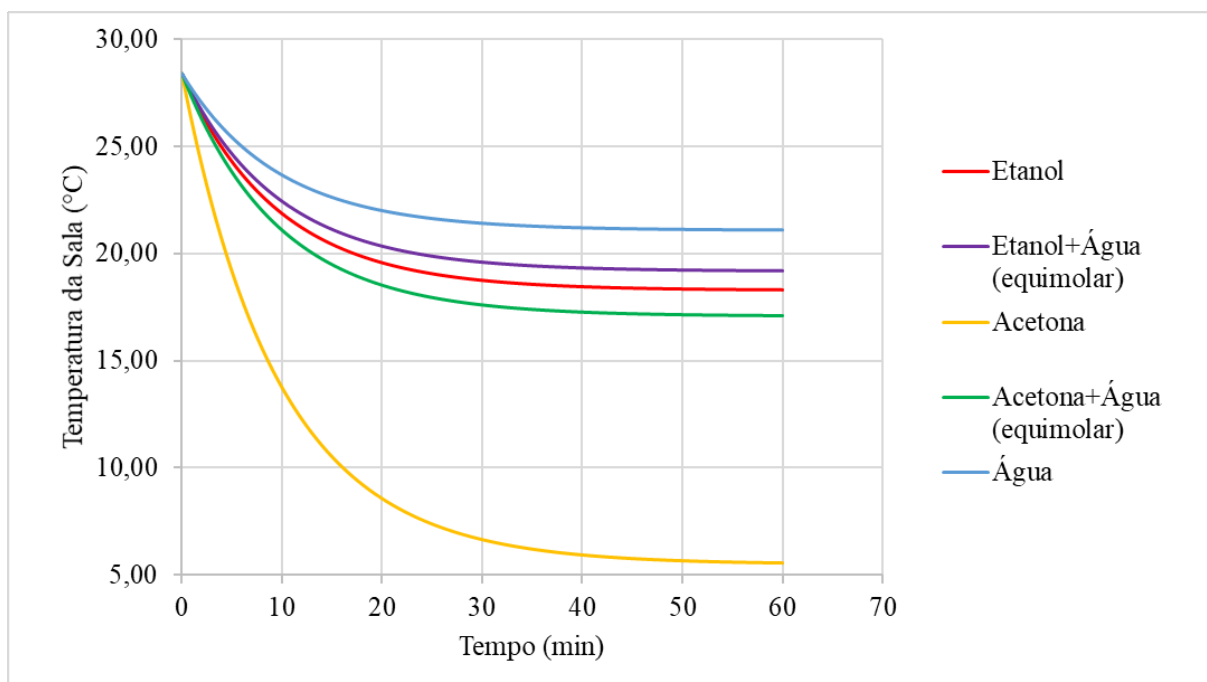
Fonte: o autor.

Figura 4.16 – Simulação referente à **condição mais quente** do dia 27/06/2024



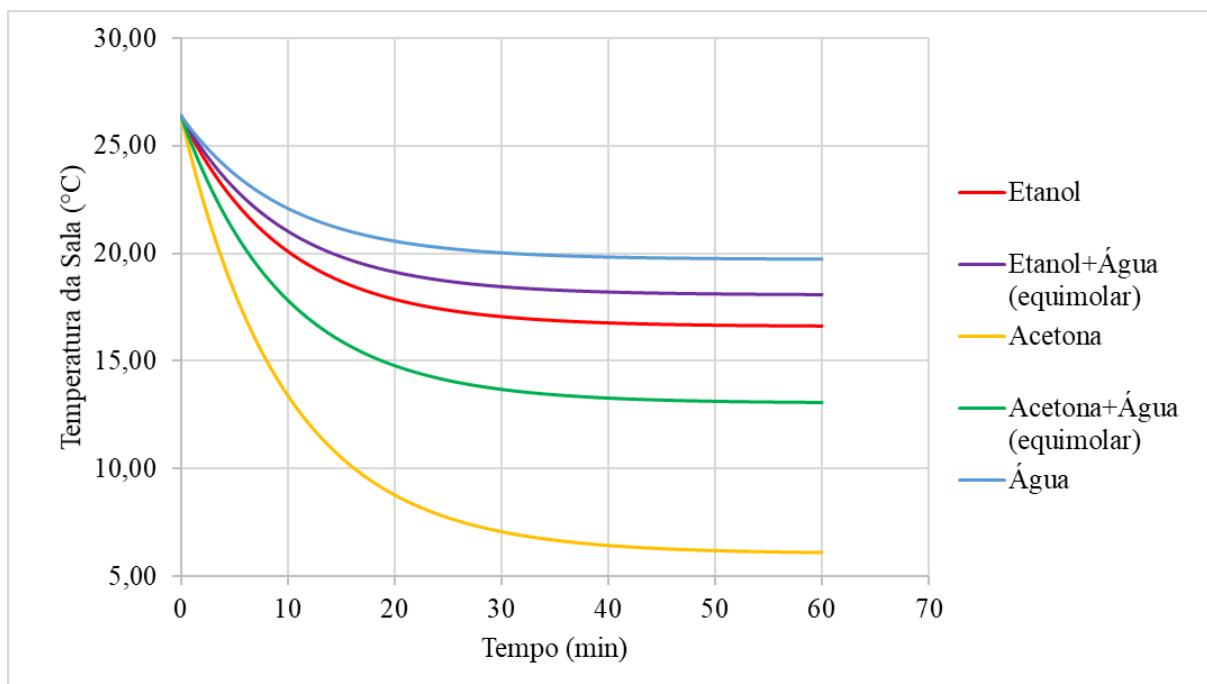
Fonte: o autor.

Figura 4.17 – Simulação referente à **condição mais quente** do dia 28/06/2024



Fonte: o autor.

Figura 4.18 – Simulação referente à **condição mais quente** do dia 17/07/2024



Fonte: o autor.

Percebe-se primeiramente que, o etanol e a acetona diluídos em proporção equivolumétrica não conseguiram obter um decaimento térmico expressivamente maior do que o da água. Entretanto, as soluções em proporções equimolares geram resultados

bem interessantes, principalmente no que diz respeito à acetona. Reduzir a temperatura de um quarto médio para valores abaixo de 15°C é um desafio até mesmo para os mais sofisticados aparelhos de ar-condicionado. Além disso, no caso da acetona pura, conseguir uma temperatura próxima de 5°C em um ambiente relativamente grande torna o equipamento tão eficiente quanto refrigeradores de câmaras de bebidas de supermercados. Ademais, considerando espaços menores, é possível que a evaporação de acetona consiga funcionar até mesmo em geladeiras e freezers.

Entretanto, ainda se faz necessária uma análise de viabilidade, tanto econômica quanto ambiental, uma vez que etanol e acetona são solventes tóxicos e a sua evaporação de forma deliberada na atmosfera acarretaria em maiores problemas para o meio ambiente. Ademais, a viabilidade de tal utilização está fortemente atrelada ao consumo de solvente, que será abordado no próximo tópico.

4.4 Cálculo do consumo do solvente evaporativo do ciclone

A partir das Equações 3.4 e 3.5 descritas anteriormente, o consumo de solvente foi calculado para cada uma das soluções estudadas. Os resultados de consumo de solvente por ciclone podem ser contemplados na Tabela 4.9.

Tabela 4.9 - Consumos de solvente **por ciclone** para cada solução e condição

Dia	Consumo de etanol (kg/h)	Consumo de solução hidroetanólica (kg/h)	Consumo de acetona (kg/h)	Consumo de solução hidroacetônica (kg/h)	Consumo de água (kg/h)
08/09/2023	0,5137	0,1071	1,5517	0,1795	0,0939
09/11/2023	0,7955	0,1598	2,6708	0,2887	0,1727
12/01/2024	0,6700	0,1392	1,8887	0,2245	0,1454
27/06/2024	0,4836	0,3328	1,2656	0,6753	0,0741
28/06/2024	0,4985	0,3399	1,0851	0,5847	0,0741
17/07/2024	0,4550	0,3127	1,2029	0,6404	0,0649

A partir da análise dos resultados da Tabela 4.9, percebe-se que soluções mais voláteis acarretam em consumos de 0,1 a 9 vezes maiores para soluções e de uma vez que a alta volatilidade intensifica a evaporação. Sendo assim, tal consumo elevado praticamente inviabiliza os sistemas ciclônicos psicrométricos quando um número muito grande de ciclones é aplicado em lugares nos quais necessitam operar por diversas horas, salvo se houver a recuperação e reaproveitamento dos solventes orgânicos.

Embora o sistema proposto represente um avanço significativo no modo como o conforto térmico pode ser atingido em termos de eficiência, ele ainda representa um custo operacional extremamente alto. Considerando todas as variáveis da simulação, aplicadas a uma bateria ciclones operando com solução hidroacetônica resfriando o quarto proposto e operando durante uma noite de 8 horas. Seriam consumidos 7,12 kg de solução hidroacetônica, o que seria inviável em termos financeiros.

5 Conclusão

De acordo com as principais observações constatadas na execução deste trabalho, conclui-se que, ao realizar uma análise de presença do solvente no decaimento térmico de sistemas psicrométricos pelo método de temperatura de bulbo úmido, a troca de fluido altera de forma consideravelmente brusca a queda térmica. Além disso, percebe-se que ao misturar fluidos voláteis com a água em 50% de volume, o decaimento térmico sofre alterações relativamente ínfimas (entre 1 e 3°C), o que ocorre provavelmente pelo fato da água ter padrões menos sensíveis na Equação 2.1. Deste modo, a proporção equivolumétrica não representa bem as frações molares, acarretando em uma quantidade muito maior de água.

No entanto, em proporção equimolares, a queda térmica aparenta resultar em temperaturas de bulbo úmido na média aritmética entre as temperaturas referentes à água e ao solvente em questão, provavelmente porque os termos que compõem os parâmetros da Equação 2.1 utilizam referenciais molares.

Além disso, conclui-se também, que a presença de solventes voláteis no sistema ciclônico-psicrométrico de DIAS *et al.* (2020) potencializa de forma intensa a queda térmica e a capacidade de se atingir o conforto térmico de ambientes domésticos. Entretanto, com um custo operacional indesejavelmente elevado.

Ademais, como fruto do estudo apresentado, foi possível publicar um artigo nos anais do 41º Congresso Brasileiro de Sistemas Particulados, que aconteceu entre os dias 20 e 23 de outubro de 2024, na cidade de São Cristóvão – SE. Em que o trabalho foi mostrado aos participantes através da modalidade de apresentação oral. Assim sendo, uma réplica do trabalho pode ser melhor contemplada no Apêndice 1.

6 Sugestões para Trabalhos Futuros

Como visto no decorrer deste trabalho, o sistema estudado merece atenção ambiental e econômica, uma vez que os solventes orgânicos são ambientalmente nocivos e o seu consumo elevado pode encarecer o processo. Apesar disso, o sistema pode ser viável, se existir alguma maneira de recuperar os solventes evaporados, o que removeria o custo relacionado ao consumo destes, mas possivelmente aumentaria levemente o custo operacional.

Dessa forma as sugestões para trabalhos futuros são:

- propor um sistema que seja capaz de recuperar o solvente utilizado com a finalidade de reduzir os custos operacionais;
- estudar o decaimento térmico na mesma situação com fluidos e soluções diferentes das utilizadas nesse trabalho.

Referências Bibliográficas

- AL-ZUBAYDI, A.Y.T., HONG, G., 2019. **Experimental study of a novel water-spraying configuration in indirect evaporative cooling**. Appl. Therm. Eng. 151, 283–293.
- CALLAHAN, C. W.; ELANSARI, A. M.; FENTON, D. L. Psychrometrics. In: **Postharvest Technology of Perishable Horticultural Commodities**. Woodhead Publishing, 2019. p. 271-310.
- CAMIOTO, F. D. C., MARIANO, E. B., SANTANA, N. B., YAMASHITA, B. D., & REBELATTO, D. A. D. N. **Renewable and sustainable energy efficiency**: An analysis of Latin American countries. Environmental Progress & Sustainable Energy, v. 37, n. 6, p. 2116-2123, 2018.
- CARRIJO, B. R.; BACCARO, C. A. D. **Análise Sobre a Erosão Hídrica Na Área Urbana De Uberlândia (MG)**. Caminhos De Geografia, v. 1, n. 2, p. 70–83, 2000.
- CENGEL, Y.; GHAIAR, A. **Transferência de Calor e Massa**: uma abordagem prática, 4ta edição. MC Grau Hill, 2012.
- CORTINOVIS, G. F.; SONG, T. W. Funcionamento de uma torre de resfriamento de água. **Revista de Graduação da Engenharia Química, Sao Paulo-SP**, 2006.
- DA COSTA, C., SILVA E. S., NUNES I., BUENO J. F., LEIDENS N. E ANIBELE T. P. "montagem de uma célula de arnold para determinação da difusividade mássica de líquidos em ar estagnado.", 2016.
- DIAS, D. R. **Avaliação numérico-experimental do resfriamento de ambientes por um sistema ciclônico-psicrométrico**. 2020.
- DIAS, D. R., ULLMANN, G., SILVA, D. O., & VIEIRA, L. G. M. Thermal performance of a psychrometric cooling system using cyclone fluid dynamics. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 203, p. 333-345, 2024.
- RIBEIRO DIAS, D., ULLMANN, G., DE OLIVEIRA SILVA, D., & MARTINS VIEIRA, L. G. **Combining psychrometrics and fluid dynamics in a cyclone: A sustainable indirect evaporative cooling design**. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 2021, 40.4: e13624.

FRADE, J.; SEVERO, F. Climatização geral. **Instituto Superior de Engenharia de Lisboa-Área Departamental de Engenharia Mecânica**, 2006.

FUNK, Paul A.; HUGHS, S. Ed; HOLT, Greg A. EnginEERING and ginning. **Entrance Velocity Optimisation for Modified dust Cyclones**, 2000.

GAWALI, S. S.; BHAMBERE, M. B. Effect of design and the operating parameters on the performance of cyclone separator-a review. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research**, v. 4, n. 1, p. 244-248, 2015.

HOFFMANN, A. C.; STEIN, L. E. Cyclone Separation Efficiency. **Gas Cyclones and Swirl Tubes: Principles, Design and Operation**, p. 89-109, 2008.

INCROPERA, F., DEWITT, D. **Transferência de Calor e Massa**. LTC, 5ª Edição, Rio de Janeiro, 2003.

LAPPLE, C.E. e SHEPHERD, C.B., **Calculation of Particle Trajectories**, IEC, vol. 32, nº 5, 605-617 (1940).

MASSARANI, Giulio. **Fluidodinâmica em sistemas particulados**. Editora e-papers, 1997.

MCCABE, Warren Lee; SMITH, Julian Cleveland; HARRIOT, Peter. **Unit operations of chemical engineering**. New York: McGraw-hill, 1993.

PALHARES, D. D. F.; ARAÚJO, B. S. A.; FARIA, E. V.; VIEIRA, L. G. M. **Numerical-experimental evaluation of FRESNEL lens heating dynamics**. Heat and Mass Transfer, v. 56, p. 3147–3166, DOI: 10.1007/s00231-020-02924-8, 2020.

QIU, G. Q.; RIFFAT, S. B. **Novel design and modelling of an evaporative cooling system for buildings**. International Journal of Energy Research, v. 30, n. 12, p. 985–999, 2006.

RODRIGUES, D. S. **Análise psicrométrica em sistemas de condicionamento de ar**. Universidade Federal do Rio de Janeiro. 2018.

SMITH, J. M.; VAN NESS, H. C.; ABBOTT, M. M. **Introdução à Termodinâmica da Engenharia Química**, 7ª ed. 2007.

YANG L.H., CHEN C.Y., HSU W.Y., FUKUI K., FUKASAWA T., HUANG A.N., KUO H.P. **Effect of the operation temperature on the hydrodynamics and**

performances of a cyclone separator. Advanced Powder Technology, v. 33, n. 11, p. 103791, 2022.

Apêndice 1 – Artigo publicado no ENEMP 2024 a partir do estudo realizado

EFEITO DO SOLVENTE NO RESFRIAMENTO PSICROMÉTRICO DE AMBIENTES POR CICLONES

CUNHA, Rodrigo Carrilho*; MALAGONI, Ricardo Amâncio; VIEIRA, Luiz Gustavo Martins

Faculdade de Engenharia Química, Universidade Federal de Uberlândia (UFU)

*Autor de correspondência. E-mail: rodrigo.cunha@ufu.br

Resumo: Devido ao movimento espiralado do fluido no interior de ciclones, tais equipamentos centrífugos podem funcionar com bons trocadores de calor devido aos altos coeficientes convectivos em seu interior. Por sua vez, grande parte do território brasileiro tem longos períodos quentes e umidades relativas abaixo de 30%, sendo um cenário ideal para trocas térmicas evaporativas. Neste sentido, compatibilizando essas duas realidades, este trabalho teve como objetivo usar processos evaporativos indiretos para prover o resfriamento de ambientes, a partir do uso de diferentes solventes líquidos sob um meio poroso delgado instalado nas paredes externas de um ciclone metálico de paredes finas com área lateral de 0,2630 m². Em um dia quente (30°C) com umidade relativa de 25%, foi possível constatar experimentalmente temperaturas de bulbo úmido de -3°C a 18°C, conforme o solvente empregado. Balanços de energia realizados em uma sala padrão mostraram decaimentos térmicos satisfatórios entre 4,2°C e 11,4°C ao longo de 20 min de operação, a partir da recirculação de ar entre uma sala e um ciclone na vazão volumétrica de 10 L/s. Dentre os fluidos empregados, a acetona apresentou o melhor desempenho térmico (11,4°C), ao passo que água requereu o menor consumo para a umidificação do meio poroso (155 g/h).

Palavras-chave: resfriamento, ciclone, psicrometria.

EFFECT OF SOLVENT ON THE PSYCHROMETRIC COOLING OF ENVIRONMENTS BY CYCLONES.

Abstract: Due to the spiral movement of fluids inside cyclone separators, those centrifugal devices can work as good heat exchangers due to the high convective coefficients in its insides. In turn, a huge part of the Brazilian territory has long hot periods and relative humidity is lower than 30%, making it the ideal scenario for evaporative thermal exchanges. In this sense, compatibilizing these two realities, this work aimed to use indirect evaporative processes to provide the cooling of environments using different liquid solvents under a thin porous media installed on the external walls of a thin-walled metallic cyclone with lateral area of 0.2630 m². On a hot day (30°C) with relative humidity of 25%, it was possible to experimentally observe wet bulb temperatures of -3°C to 18°C, depending on the solvent used. Energy balances calculated in a standard room showed satisfactory thermal decays between 4.2°C and 11.4°C over 20 min of operation from air recirculation between a room and a cyclone at a volumetric flow rate of 10 L/s. Among the fluids used, acetone presented the best thermal performance (11.4°C), while water required the lowest consumption for humidifying the porous media (155 g/h).

Keywords: cooling; cyclone separator; psychrometrics.

1 Introdução

A engenharia sempre buscou formas alternativas de melhorar o resfriamento de ambientes, a fim de garantir um melhor conforto térmico de seus usuários. Sabe-se que o resfriamento de ambientes domésticos, comerciais e industriais apresenta atualmente como desvantagens o custo com energia elétrica e a utilização de fluidos refrigerantes tóxicos e poluentes. Em vista desse problema, têm-se buscado maneiras menos dispendiosas e poluentes de se alcançar o conforto térmico em ambientes, tal como acontece com os problemas evaporativos motivados por transferência de massa.

Neste aspecto, a psicrometria é um fenômeno físico que proporciona o decaimento térmico de determinada estrutura devido à transferência de massa de um solvente para uma corrente de gás insaturado. Ao se evaporar de forma natural, devido aos gradientes de concentração estabelecidos, o solvente retira calor de suas vizinhanças, gerando uma queda térmica no sistema.

Entretanto, a psicrometria depende de diversos fatores, sendo o principal deles, o grau de saturação no qual o ar se encontra. Dessa forma, quanto mais seco e quente o dia estiver, maior é o decaimento térmico observado porque mais efetivas são as transferências de massa entre as fases. Neste aspecto, o clima do Brasil é consideravelmente favorável à funcionalidade de sistemas psicrométricos, uma vez que o país possui um clima predominantemente quente e seco no semiárido nordestino durante o ano todo e no centro-sul durante os períodos de estiagem (abril a outubro).

Os sistemas evaporativos indiretos podem representar uma alternativa interessante para o conforto térmico de ambientes situados em áreas remotas ou não servidas de energia elétrica.

Um exemplo desse tipo de sistema, foi o sistema ciclônico-psicrométrico proposto por Dias *et al.* (2021). O sistema de resfriamento desses autores consistiu em um ciclone que, apesar de ser concebido para separar partículas sólidas de meios gasosos, foi utilizado para aproveitar os bons coeficientes convectivos de transferência de calor em seu interior devido ao

intenso movimento espiralado do gás em seu interior. O ciclone era dotado de paredes metálicas extremamente finas, revestidas externamente por um tecido de algodão constantemente umedecido com água. Uma representação esquemática do ciclone psicrométrico de Dias *et al.* (2021) pode ser visto na Figura 1.

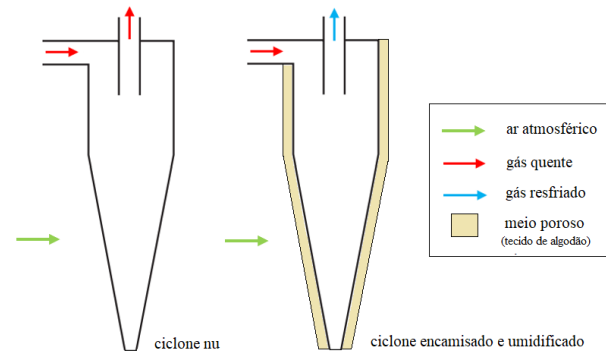


Figura 1 – Representação esquemática do sistema de resfriamento psicrométrico em ciclone proposto por Dias *et al.* (2021).

As paredes umedecidas da parte externa do ciclone eram expostas ao meio ambiente seco e quente, provocando naturalmente a evaporação da água e, subsequente, o resfriamento da carcaça do separador que, por ser extremamente fina e boa condutora de calor, resfriava satisfatoriamente o ar que por ele circulava em seu interior (Dias *et al.*, 2024).

Isto posto, esse trabalho propôs um estudo teórico-experimental sobre a influência do solvente no decaimento térmico de um sistema de resfriamento por evaporação indireta em ciclones, a partir de outros fluidos aplicados ao meio poroso (tecido de algodão), tais como acetona, etanol e misturas equimolares hidroetanólica e hidroacetônica.

2 Metodologia

A fim de se verificar o efeito de diferentes solventes no resfriamento psicrométrico de ambientes com ciclone, a metodologia adotada neste trabalho é apresentada nas subseções a seguir.

2.1 Determinação das temperaturas de bulbo úmido (T_{BU}) dos solventes

Para a determinação das temperaturas de bulbo úmido (T_{BU}), testes experimentais foram conduzidos em uma tarde de um dia quente (T_{BS}

= 30°C) e seco ($H = 25\%$) no *campus* Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia (UFU), no período de 14h00min às 16h00min, com 5 diferentes solventes, sendo três puros [água (H_2O), etanol (C_2H_5OH) e acetona (C_3H_6O)] e dois na forma de soluções hidroetanólica (H_2O/C_2H_5OH) e hidroacetônica (H_2O/C_3H_6O), preparadas de maneira equimolar.

Em ambiente aberto, cada termômetro (escala: -10 a 100°C, precisão: $\pm 1,0^\circ\text{C}$), cujo respectivo bulbo estava encapsulado por uma cobertura delgada de algodão, foi constantemente umedecido com o solvente de interesse e exposto à ventilação contante, provida por um ventilador portátil de 45 W. Após estabilização dos termômetros, a temperatura era aferida e anotada. O procedimento descrito anteriormente foi feito em triplicata às 14h00min, 15h00min e 16h00min de 27 de junho de 2024.

2.2 Balanço de energia efetuado para simular o resfriamento evaporativo indireto por meio de um ciclone acoplado em uma sala

A partir do conhecimento das temperaturas de bulbo úmido para cada um dos 5 tipos de solvente, um balanço de energia foi resolvido numericamente pelo método de Euler para uma sala acoplada a um ciclone externo (encapado com tecido de algodão, umedecido com o solvente de interesse e exposto ao meio ambiente), cuja representação esquemática está na Figura 2.

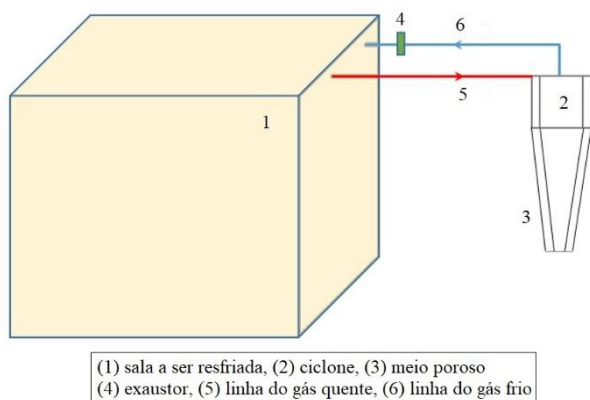


Figura 2 – Representação esquemática da sala a ser resfriada por intermédio de um resfriamento indireto com um ciclone

A dinâmica de resfriamento do interior da sala foi simulada por meio de um balanço de

energia (Equação 1) que considerou as contribuições do calor fornecido pelo meio ambiente à sala e do calor retirado da sala pelo ciclone psicrométrico.

$$\rho V_s c_p \frac{dT}{dt} = UA_s(T_\infty - T) - hA_c(T - T_{BU}) \quad (1)$$

A densidade e o calor específico do ar foram estimados em cada passo de tempo por meio das Equações 2 e 3 (Palhares *et al.*, 2020).

$$\rho = \frac{351,825}{T} \quad (2)$$

$$c_p = 1060 - 0,04416T + 1,096 \cdot 10^{-3} T^2 - 7,5 \cdot 10^{-5} T^3 + 1,79 \cdot 10^{-10} T^4 \quad (3)$$

O coeficiente convectivo de troca térmica (h) entre o fluido e as paredes internas do ciclone foi estimado pela Equação (4) levantada experimentalmente por Dias *et al.* (2021) e válida para vazões volumétricas de ar de até 15 L/s. No presente trabalho, foi adotada para todos os balanços de energia uma vazão volumétrica de ar (Q) circulante no ciclone constante e igual a 10 L/s, originando um coeficiente convectivo de transferência de calor (h) equivalente a 39 W/m²K.

$$h = 2825Q^{0,93} \quad (4)$$

Dias *et al.* (2021) ao estudarem resfriamento de ambientes com resfriamento indireto em ciclones, utilizaram razões de 1:5 a 4:1 para vincular o número de ciclones com a área da sala a ser resfriada. Portanto, no presente trabalho, optou-se em utilizar a razão mais desfavorável de Dias *et al.* (2021), ou seja, 1 ciclone para cada 5 m² de sala (1:5). Nesse cenário, em todos os balanços de energia, foi considerada uma sala de 5 m² (A_c) com pé-direito de 2,5 m, o que implica um volume útil (V_s) de 12,5 m³ e uma área lateral (A_s) de 22,36 m². Em relação às paredes laterais, foram considerados tijolos comerciais de 20 cm de espessura com condutividade térmica equivalente a 0,2 W/(mK) que proporciona um coeficiente global de troca térmica (U) de 0,7 W/(m²K), conforme demonstram Incropera e DeWitt (2003).

As temperaturas de bulbo úmido (T_{BU}) para cada solvente foram levantadas experimentalmente para um dia quente e seco

no *campus* Santa Mônica da UFU, conforme já descrito na subseção 2.1.

Nos balanços de energia, foi considerado um ciclone de alumínio de paredes finas (0,33 mm) de diâmetro de 12 cm e área lateral de 0,2630 m², cujos valores das demais dimensões geométricas podem ser visualizadas na Figura 3.

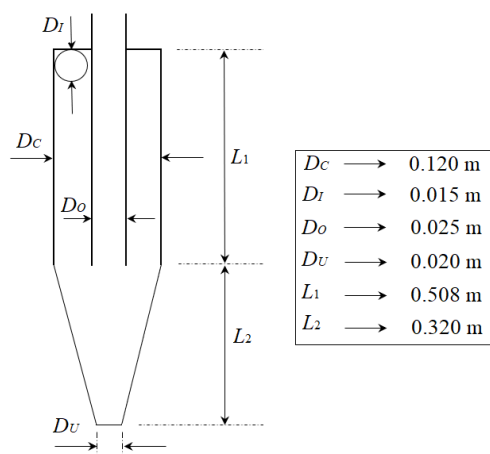


Figura 3 – Representação esquemática do ciclone acoplado à sala para as simulações numéricas da dinâmica de resfriamento.

Na solução dos balanços de energia, a cada passo de tempo (0,5 s), foi considerada uma temperatura uniforme no interior da sala devido à mistura efetiva do ar causada por sua recirculação entre a sala e o ciclone resfriador.

2.3 Consumo de solvente para prover o resfriamento indireto no ciclone

A taxa molar de evaporação do solvente (N_A) para prover o resfriamento foi estimada a partir do conhecimento do coeficiente convectivo de transferência de calor externo ao ciclone (h_E), de propriedades físicas dos fluidos envolvidos (difusividades mássica, térmica e de quantidade de movimento, densidade e calor específico) e de propriedades termodinâmicas dos solventes (pressão de vapor). Para o coeficiente convectivo de transferência de calor externo ao ciclone foi adotado o valor de 10 W/m²K que é típico de sistemas térmicos curvilíneos submetidos à convecção moderada com gases (Incropera e DeWitt, 2003). De posse das informações mencionadas anteriormente, os coeficientes convectivos de transferência de massa (k_C) foram estimados pela Analogia de Chilton-Colburn (Equação 5)

e a taxa molar de evaporação do fluido foi avaliada pela Equação de Fluxo (Equação 6).

$$\frac{k_C}{h_E} = \frac{1}{\rho c_p} \left(\frac{Pr}{Sc} \right)^{\frac{2}{3}} \quad (5)$$

$$N_A = k_C A_C (C_{AS} - C_{A\infty}) \quad (6)$$

Todas as propriedades físicas e termodinâmicas foram estimadas com base na temperatura de filme (média aritmética entre T_{BU} e T_{BS}).

3 Resultados e Discussão

As temperaturas de bulbo úmido (T_{BU}) para cada um dos solventes utilizados podem ser visualizadas na Figura 4.

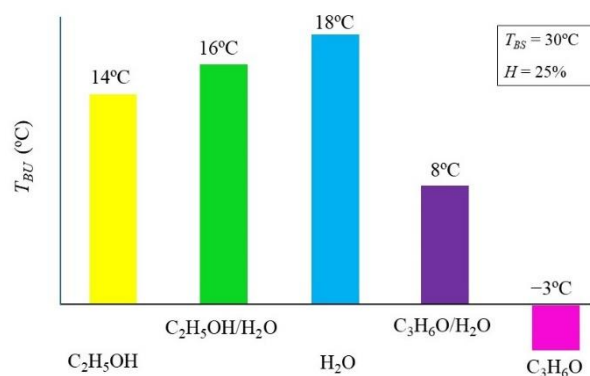


Figura 4 – Temperaturas de bulbo úmido experimentais (T_{BU}) para os ensaios de psicrometria em um dia seco e quente em Uberlândia/MG.

De acordo com a Figura 4, em se tratando dos solventes puros, constatou-se que a acetona foi o solvente que proporcionou a menor temperatura de bulbo úmido ($-3^\circ C$), seguida pelo etanol ($14^\circ C$) e água ($18^\circ C$). Tais resultados evidenciaram o potencial de todos os solventes puros para as trocas térmicas evaporativas indiretas em localidades quentes e secas, especialmente para os solventes orgânicos que, devido às maiores pressões de vapor, proporcionaram os maiores gradientes de concentração para a transferência de massa entre o tecido poroso e o meio ambiente externo.

A pressão de vapor do solvente foi a questão decisiva para originar as menores temperaturas de bulbo úmido, pois mesmo a água possuindo a maior difusividade mássica em ar (D_{AB}) e o maior coeficiente convectivo de

transferência de massa (k_c) dentre os solventes analisados, tais propriedades físicas não foram capazes de fazer com que o solvente inorgânico sobrepusesse aos patamares térmicos observados para os solventes orgânicos. A título de exemplo, nas condições operacionais utilizadas nesse trabalho, apesar da difusividade mássica da água ($2,60 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$) ter sido mais que o dobro da difusividade mássica da acetona ($1,22 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$), a pressão de vapor da acetona (17900 Pa) foi praticamente o sêxtuplo da pressão de vapor da água (2948 Pa) e o triplo da pressão de vapor do etanol (6615 Pa). Além disso, os coeficientes convectivos de transferência de massa para a acetona ($7,00 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) e etanol ($7,35 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$) apresentaram entre si a mesma magnitude, porém, ambos foram praticamente 38% menores quando comparados ao coeficiente convectivo de transferência de massa com o uso da água ($11,6 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$).

No mesmo sentido dos solventes puros, os solventes formados por soluções equimolares hidroetanólica e hidroacetônica também apresentaram bons patamares térmicos para as temperaturas de bulbo úmido (16°C e 8°C , respectivamente), cujos valores observados foram praticamente a média aritmética entre as temperaturas de bulbo úmido dos solventes puros.

A adição de água aos demais fluidos, sob a forma de soluções equimolares hidroetanólica e hidroacetônica, comprometeu parcialmente o desempenho dos fluidos orgânicos puros, sem, contudo, deixar de ser uma alternativa interessante e viável porque mantiveram as temperaturas de bulbo úmido ainda em patamares interessantes, bem como sinalizaram a possibilidade de diminuir os custos em relação à diluição do solvente orgânico para eventuais processos evaporativos indiretos.

Superada a fase de determinação experimental das temperaturas de bulbo úmido, os balanços de energia foram resolvidos para cada um dos solventes aplicados ao meio poroso que envolvia externamente o ciclone de alumínio. As dinâmicas de resfriamento obtidas para o interior da sala podem ser visualizadas na Figura 5.

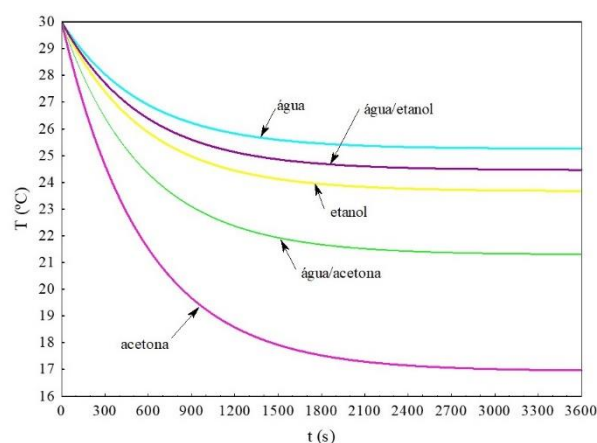


Figura 5 – Dinâmica de resfriamento da sala em função dos solventes aplicados ao meio poroso externo ao ciclone durante o período de 1 h.

De acordo com a Figura 5, foi possível observar que, nos primeiros 30 min de resfriamento, o decaimento térmico foi bastante pronunciado, pois o gradiente térmico entre as paredes internas do ciclone e o fluido da sala estava nas condições mais favoráveis, enquanto o gradiente térmico entre o interior da sala e o meio ambiente estava na condição mais desfavorável. A partir dos 30 min de resfriamento, estas contribuições se invertem, impactando diretamente no decaimento térmico, tornando-o cada vez mais lento e assintótico.

O decaimento térmico mais pronunciado no interior da sala foi verificado para acetona e o menos pronunciado foi verificado para a água. Tais resultados se coadunam perfeitamente com as temperaturas de bulbo úmido de cada solvente, haja vista que o ciclone era o dispositivo responsável pela retirada de calor do sistema.

A utilização da solução hidroacetônica, etanol e solução hidroetanólica também se mostraram, nesta ordem, aptas ao resfriamento da sala, com decaimentos térmicos sempre intermediários à acetona e água. A título de exemplo, a Figura 6 apresenta a variação térmica no interior da sala após 20 min de operação do sistema aqui proposto.

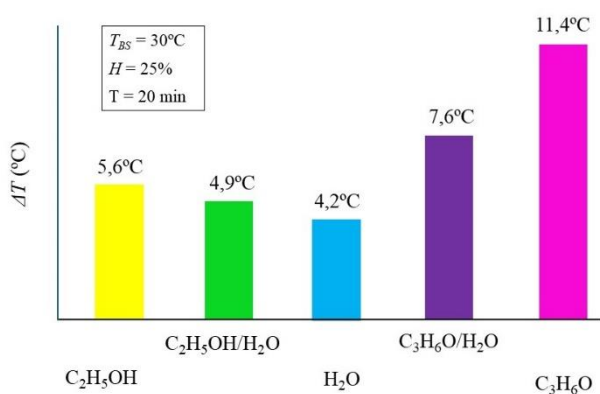


Figura 6 – Decaimento térmico no interior da sala em função do solvente utilizado no meio poroso externo ao ciclone após 20 min de resfriamento.

De acordo com a Figura 6, em se tratando dos solventes puros, para o mesmo tempo de operação, a acetona apresentou um decaimento térmico cerca de 2,7 vezes maior que o da água e de 2,0 vezes maior que o do etanol. Neste marco temporal, é interessante observar que a adição de etanol à água aumentou sutilmente o decaimento térmico na sala em 16,7% (de 4,2°C para 4,9°C), ao passo que a adição de acetona à água aumentou satisfatoriamente o decaimento térmico do sistema em aproximadamente 81% (de 4,2°C para 7,6°C). Especificamente, no caso da acetona, a adição desse solvente à água em outras razões molares pode indicar a manutenção dos decaimentos térmicos, inclusive acima daqueles proporcionados pela solução equimolar hidroetanólica.

Enquanto o decaimento térmico de 81% da solução hidroacetônica foi obtido na razão equimolar (1/1 → 18g H_2O /58g C_3H_6O), mantendo-se uma média ponderada dos decaimentos térmicos pelas respectivas frações molares, acredita-se que razões molares na ordem de 3/1 (18g H_2O /18g C_3H_6O) poderiam ainda manter decaimentos térmicos em patamares superiores a 40% em relação à utilização de água pura.

Vale registrar que, nesta fase do trabalho, não houve qualquer preocupação em relação à forma de como os solventes orgânicos poderiam ou seriam recuperados. Sabe-se que a recuperação dos solventes orgânicos é uma questão técnica importantíssima, pois tem impacto econômico e ambiental sobre a escolha e utilização da tecnologia proposta.

Em existindo a recuperação do solvente no ato de implementação da tecnologia aqui

proposta, certamente os solventes seriam elencados segundo a seguinte ordem decrescente de desempenho: acetona, solução hidroacetônica, etanol, solução hidroetanólica e água.

Em não havendo a possibilidade de recuperação dos solventes orgânicos ou não sendo do interesse de possíveis usuários, certamente o próprio uso da água já seria por si só vantajoso, haja vista um decaimento térmico na sala de 4,2°C em 20 min de resfriamento.

Em termos de consumo, a água, apesar de proporcionar os menores decaimentos térmicos, ainda seria um dos solventes mais interessantes para o resfriamento evaporativo indireto com ciclones devido à sua disponibilidade, custo e atoxicidade. Na Figura 7, são apresentados os consumos horários dos solventes para prover os resfriamentos propostos e já registrados na Figura 5.

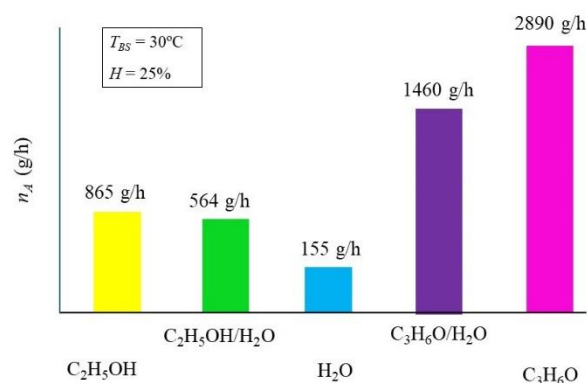


Figura 7 – Consumo horário de solvente para prover o resfriamento evaporativo indireto da sala por um ciclone.

Salvo se houver a recuperação dos solventes orgânicos, o consumo de acetona pura pode se mostrar inviável ao processo de resfriamento evaporativo indireto por ser cerca de 18 vezes maior que o consumo de água pura requerido. Porém, em havendo recuperação da acetona evaporada ou existindo proporções menores de acetona na água, o processo de resfriamento pode ser vantajoso, haja vista que os decaimentos térmicos com soluções hidroacetônicas foram mais significativos, o que promoveria menores tempos para se atingir o mesmo conforto térmico provido pela utilização da água pura ou permitiria o acoplamento de salas maiores ao mesmo ciclone para se manter os mesmos patamares térmicos observados para a água pura.

4 Conclusão

A utilização de ciclones para resfriamento de ambientes por evaporação indireta pode ser uma alternativa interessante em localidades secas e quentes, haja vista as baixas temperaturas de bulbo úmido proporcionadas e os satisfatórios coeficientes convectivos de transferência de calor observados no interior trocador de calor centrífugo.

A cidade de Uberlândia, localizada no Triângulo Mineiro, tem clima seco e quente entre os meses de abril e outubro, demonstrando que, em um dia quente (30°C) com umidade relativa de 25% foi possível obter experimentalmente temperaturas de bulbo úmido de -3°C, 8°C, 14°C, 16°C e 18°C respectivamente para a acetona, solução equimolar hidroacetônica, etanol, solução equimolar hidroetanólica e água.

Os balanços de energia mostraram que um ciclone de área lateral de 0,2630 m² acoplado a uma sala de 12,5 m³, foi capaz de promover, em 20 min de operação, decaimentos térmicos de 11,4°C, 7,6°C, 5,6°C, 4,9°C e 4,2°C para acetona, solução equimolar hidroacetônica, etanol, solução equimolar hidroetanólica e água, respectivamente.

Apesar do maior desempenho térmico ter sido observado para a acetona, o presente estudo mostrou que há necessidade de uma análise técnico-econômica no que tange aos custos com este solvente e a possibilidade de sua recuperação no processo. Dentre os solventes analisados, a água apresentou a menor capacidade de resfriamento por evaporação indireta no ciclone, pois em comparação com a acetona, o fluido orgânico proporcionou o triplo de decaimento térmico no interior da sala. Porém, em se tratando de disponibilidade, custo e questões ambientais, a água parece ser o solvente mais adequado para a tecnologia proposta neste trabalho, haja vista que a acetona demandaria uma massa cerca de 18 vezes maior que a requerida pelo solvente inorgânico.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao CNPq, à FAPEMIG e à CAPES pelos recursos financeiros disponibilizados para a realização e conclusão deste trabalho.

Nomenclatura

A_C	área lateral do ciclone	[m ²]
A_S	área da sala a ser resfriada	[m ²]
C_{AS}	concentração molar de saturação	[mol/m ³]
$C_{A\infty}$	concentração molar do ambiente	[mol/m ³]
c_p	calor específico do ar	[J/kgK]
D_{AB}	difusividade mássica	[m ² /s]
D_C	diâmetro do cilindro do ciclone	[m]
D_I	diâmetro de entrada do ciclone	[m]
D_O	diâmetro de <i>overflow</i> do ciclone	[m]
D_U	diâmetro de <i>underflow</i> do ciclone	[m]
h	coeficiente convectivo de transferência de calor no interior do ciclone	[W/m ² K]
h_E	coeficiente convectivo de transferência de calor no exterior do ciclone	[W/m ² K]
H	umidade relativa	[-]
L_1	altura do cilindro do ciclone	[m]
L_2	altura do cone do ciclone	[m]
k_C	coeficiente convectivo de transferência de massa	[m/s]
N_A	taxa molar de A que se evapora	[mol/h]
n_A	taxa mássica de A que se evapora	[g/h]
Pr	número de Prandtl	[-]
Q	vazão volumétrica do ciclone	[m ³ /s]
Sc	número de Schmidt	[-]
t	tempo	[s]
T	temperatura no interior da sala	[°C]
T_{BS}	temperatura de bulbo seco	[°C]
T_{BU}	temperatura de bulbo úmido	[°C]
U	coeficiente global de troca térmica entre a sala e o meio ambiente	[W/m ² K]
V_S	volume da sala	[m ³]
ρ	densidade do ar	[kg/m ³]

Referências

- DIAS, D. R.; ULLMANN, G.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M. Combining psychrometrics and fluid dynamics in a cyclone: a sustainable indirect evaporative cooling design. **Environmental Progress & Sustainable Energy**, e13624, 2021.
- DIAS, D. R.; ULLMANN, G.; SILVA, D. O.; VIEIRA, L. G. M. Thermal performance of a psychrometric cooling system using cyclone fluid dynamics. **Chemical Engineering Research and Design**, v. 203, p. 333–345, DOI: 10.1016/j.cherd.2024.01.058, 2024.
- INCROPERA, Frank, DEWITT, David. Transferência de Calor e Massa. LTC, 5ª Edição, Rio de Janeiro, 2003.
- PALHARES, D. D. F.; ARAÚJO, B. S. A.; FARIA, E. V.; VIEIRA, L. G. M. Numerical-experimental evaluation of FRESNEL lens heating dynamics. **Heat and Mass Transfer**, v. 56, p. 3147–3166, DOI: 10.1007/s00231-020-02924-8, 2020.