Determinação da massa de um MMF para armazenamento de frio em um sistema de ar condicionado

Rodrigo de Carvalho Araújo [1] (rcarvalho.projetos@gmail.com), André Guimarães Ferreira [1, 3, 4] (andre.guimaferreira@gmail.com), Alex Henrique Coutinho Santos [2] (alexhcsantos@gmail.com), Iago Luiz Geraldo da Rocha [3](iagolz.2003@hotmail.com), Tiago Freitas Paulino [1, 3, 4] (tfpaulinoeng@gmail.com)

[1] Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, CEFET/MG, Belo Horizonte, Brasil
[2] Arany Technika Engenharia, Belo Horizonte, Brasil
[3] Departamento de Engenharia de Materiais, CEFET/MG, Belo Horizonte, Brasil
[4] Centro de Pesquisa em Energia Inteligente (CPEI), CEFET/MG, Belo Horizonte, Brasil

RESUMO: *A utilização de Materiais de Mudança de Fase (MMF) em Sistemas de Armazenamento Térmico de Energia (ATE) é uma estratégia promissora para aumentar a eficiência energética de sistemas de ar condicionado. Há poucas análises sobre o uso de MMF em ATE para armazenamento de frio em climas quentes, e determinar a massa ideal de MMF no ATE é um desafio. Este artigo investiga uma metodologia para determinar a massa em um ATE acoplado a um sistema de ar condicionado operando em climas tropicais. O armazenamento no ATE considerou três situações: parafina a 5°C e água a 5°C e a 0,1°C. A carga térmica foi estimada entre 5 e 100 TR, com o tempo de atendimento variando entre uma e oito horas. A análise mostrou que a carga térmica é proporcional à massa do ATE necessária, e a massa da água como MMF é próxima à da parafina, porém a água a 5°C requer um volume de armazenamento 82,6% maior. O volume é crucial para determinar o tamanho dos reservatórios, influenciando a eficiência e viabilidade dos sistemas.*

PALAVRAS-CHAVE: *Material de mudança de fase (MMF), Reservatório de energia térmica, sistema de ar condicionado, otimização de massa.*

Calculation of MMF mass for cold storage in an air conditioning system

ABSTRACT: The use of Phase Change Materials (PCMs) in Thermal Energy Storage (TES) systems is a promising strategy to increase the energy efficiency of air conditioning systems. There are few analyses on the use of PCMs in TES for cold storage in hot climates, and determining the optimal mass of PCM in TES is a challenge. This article investigates a methodology to determine the mass in a TES coupled to an air conditioning system operating in tropical climates. The storage in the TES considered three situations: paraffin at 5°C and water at 5°C and 0.1°C. The thermal load was estimated between 5 and 100 TR, with the service time varying between one and eight hours. The analysis showed that the thermal load is proportional to the required mass of the TES, and the mass of water as PCM is close to that of paraffin; however, water at 5°C requires 82.6% more storage volume. The volume is crucial for determining the size of the reservoirs, influencing the efficiency and feasibility of the systems.

KEYWORDS: *Phase change materials, thermal energy storage, air conditioning systems, mass optimization.*

1. INTRODUÇÃO

A crescente necessidade de soluções eficientes e sustentáveis para climatização de ambientes tem direcionado o interesse para o uso de Materiais de Mudança de Fase (MMF) em Sistemas de Armazenamento Térmico de Energia (ATE). Esses materiais possuem a capacidade de armazenar e liberar grandes quantidades de energia térmica durante suas transições de fase, proporcionando uma maneira eficaz de melhorar a eficiência energética e o desempenho de sistemas de ar condicionado *(Nazir et al., 2019).*

A implementação de ATE carregados durante a noite, quando a temperatura ambiente é mais baixa, possibilita uma operação mais eficiente do sistema de ar condicionado, ao produzir frio em horários de menor demanda energética. Essa estratégia não apenas melhora a performance do sistema ao aproveitar as temperaturas mais amenas, mas também permite desacoplar a produção de frio do consumo energético durante o horário de pico, contribuindo para a redução da sobrecarga no sistema elétrico, especialmente em períodos de temperaturas mais elevadas (López-Navarro *et al.*, 2014).

Apesar do potencial dos MMF em ATE para armazenamento de frio, especialmente em regiões de clima quente, a literatura ainda é escassa em análises detalhadas sobre a determinação da massa ideal de MMF para esses sistemas. A determinação precisa dessa massa é crucial para assegurar um desempenho otimizado e a eficiência energética do sistema (Oró *et al.*, 2012).

A crescente demanda por soluções energéticas eficientes tem impulsionado a pesquisa e o desenvolvimento de tecnologias de armazenamento de energia térmica. Uma dessas tecnologias, o armazenamento de calor latente (ACL), destaca-se pela sua alta capacidade volumétrica em comparação ao armazenamento de calor sensível (ACS). Essa característica faz com que o ACS seja uma opção mais competitiva e atraente em diversas aplicações, devido à significativa redução no volume de armazenamento necessário. Em particular, o uso de ACS é extremamente vantajoso em contextos em que o volume e o peso são críticos para a eficiência energética, como em aplicações de transporte. A implementação eficaz de ACS nesses cenários pode resultar em melhorias substanciais na eficiência global, contribuindo para um futuro mais sustentável (Selvnes *et al.*, 2021).

Muitos materiais de mudança de fase (MMF) estão sendo testados atualmente, cada um com propriedades termofísicas específicas. Na faixa de temperatura útil para ar condicionado (5 a 10°C), segundo Hasnain (1998), as principais opções disponíveis são o armazenamento de gelo, sais hidratados ou parafinas. Este último pode ser mais eficiente em termos de energia do que o armazenamento de gelo, pois a solidificação pode ser realizada com temperaturas de evaporação mais altas, trazendo benefícios no desempenho do resfriador. Além disso, quanto menor a diferença de temperatura em relação ao ambiente, menores são as perdas por transferência de calor (Torregrosa-Jaime *et al.*, 2013).

O objetivo principal deste artigo é determinar a massa adequada de MMF em um ATE acoplado a um sistema de ar condicionado, a partir de cargas térmicas pré-definidas. Na análise será avaliada a água, como MMF e como armazenador de calor sensível, e a parafina. A análise é baseada na carga térmica necessária para garantir o conforto térmico, calculada a partir de dados climáticos fornecidos pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). Foram selecionadas quatro temperaturas para a análise: o dia com a maior temperatura do ar, o dia com a menor temperatura do ar e dois dias com a maior irradiação solar. Esses dias foram escolhidos para representar as condições de maior e menor demanda de frio.

A compreensão e a resolução dos desafios associados à determinação da massa de MMF em ATE podem contribuir significativamente para o desenvolvimento e a operação eficiente de sistemas de ar condicionado, promovendo a redução do consumo energético, especialmente durante os horários de pico, e minimizando o impacto ambiental relacionado à produção de frio.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

No intuito de se calcular e comparar a quantidade de massa em quilogramas (kg), em quatro (04) temperaturas ambientes diferentes alternando a carga térmica requerida para um ambiente de escritório com as dimensões pré-definidas, será utilizado um modelo matemático das equações, alterando também o material dentro do ATE.

A simulação da quantidade de massa para um modelo matemático do sistema de refrigeração será realizada na linguagem de programação Python utilizando dados termodinâmicos da biblioteca CoolProp.

Para o desenvolvimento deste estudo, construímos gráficos cujo objetivo principal foi calcular a massa em quilogramas em função da variação da quantidade de energia armazenada em materiais de mudança de fase (MMF). Este cálculo considerou o atendimento a uma demanda de carga térmica de 5 Toneladas de Refrigeração (TR) a 100TR por períodos de tempo de 1 hora, 4 horas e 8 horas.

Os gráficos foram elaborados considerando a possibilidade de alterar os fluidos do sistema de armazenamento térmico (ATE). Os fluidos analisados foram: água a 0,1°C (considerou-se que nessa temperatura a água já estaria no seu ponto de fusão), água a 5°C (armazenando na forma de calor sensível) e parafina RT8HC, também a 5°C.

Para uma análise abrangente, o estudo incluiu quatro cenários distintos, cada um representando um dia com diferentes temperaturas médias de 20°C, 25°C, 30°C e 35°C. Isso permitiu avaliar o desempenho do ATE sob diversas condições climáticas, garantindo que os resultados fossem robustos e aplicáveis a uma ampla gama de situações. Na Tabela 1 são sumarizadas as variáveis consideradas nesse estudo.

Tabela 1 – Variáveis consideradas nesse estudo.

Materiais de Armazenamento do Frio no ATE / Temperatura de Armazenamento	Carga Térmica a ser atendida pelo ATE	Tempo a ser atendido pelo ATE	Temperatura ambiente (temperatura inicial do ATE)
- Água / 0,1°C - Água / 5°C - Parafina RT8HC / 5°C	Variando entre 5 TR e 100 TR	1h, 4h ou 8h	20°C, 25°C, 30°C e 35°C

Fonte: elaborado pelos autores.

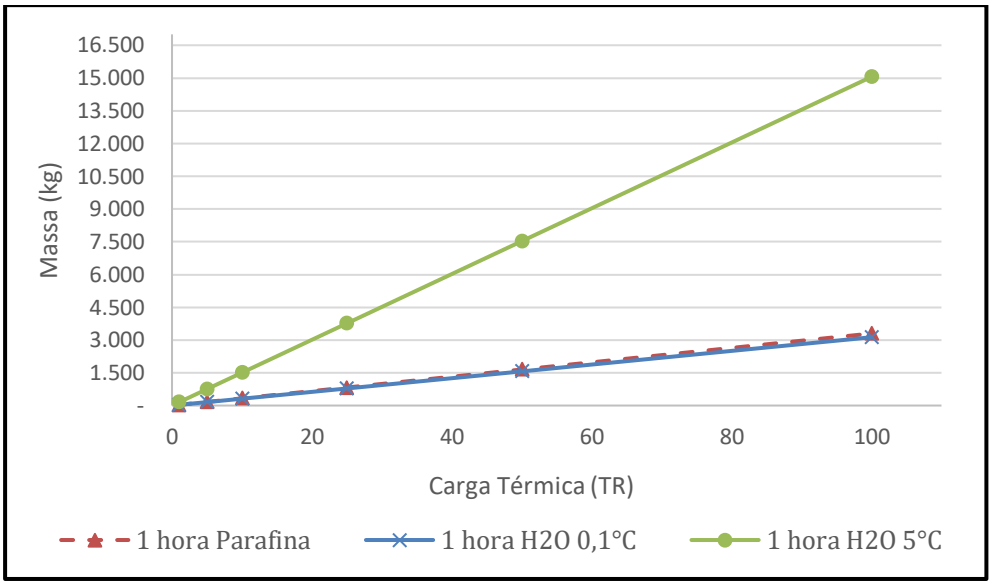
3. RESULTADOS

Nesta seção, os resultados das simulações realizadas em Python para o cálculo da massa do (ATE) em função da carga térmica do sistema são apresentados. Foram utilizados diversos gráficos para ilustrar as variáveis apresentadas na Tabela 1, facilitando a análise de suas relações. Os gráficos a seguir fornecem uma visão detalhada das simulações, destacando como a massa do ATE varia em função de diferentes cargas térmicas. A visualização dos resultados por meio de gráficos nos permite identificar padrões, tendências e comportamentos específicos, que são cruciais para a compreensão e otimização do desempenho do sistema de armazenamento de energia térmica.

As simulações apresentadas nas Figura 1, Figura 2 e Figura 3 foram realizadas de forma que a energia armazenada no ATE fosse a necessária para remoção da carga térmica simulada por um dado período. Os períodos de armazenamento foram de 1 hora (Figura 1), 4 horas (Figura 2) e 8 horas (Figura 3). Nessa simulação considerou-se o cenário de temperatura do ambiente de 20°C e que essa é a temperatura inicial do ATE. Observa-se pela análise das figuras que como era esperado quando deseja-se armazenar energia para atendimento a uma demanda maior de horas necessita-se de uma maior quantidade de massa. Verifica-se ainda em todos os cenários analisados que a massa necessária para o armazenamento na parafina a 5°C é similar àquela necessária para água quando essa está sendo utilizada como MMF, apresentado variações de 5,7%. Por sua vez, quando se considera a água e a parafina na temperatura de 5°C, a parafina requer uma quantidade de massa 82,6% menor que a água.

Nas Figuras 1, 2 e 3 pode-se observar que a água, quando comparada à parafina na mesma temperatura, 5°C, apresenta uma massa significativamente maior, de 3 a 4 vezes. À medida que a carga térmica aumenta, as massas de todos os fluidos aumentam proporcionalmente. Notavelmente, a água a 0,1°C demonstra um comportamento muito semelhante ao da parafina. Além disso, a duração do tempo também influencia diretamente na quantidade de massa, com o período de 8 horas, Figura 3, apresenta as maiores quantidades mássicas calculadas.

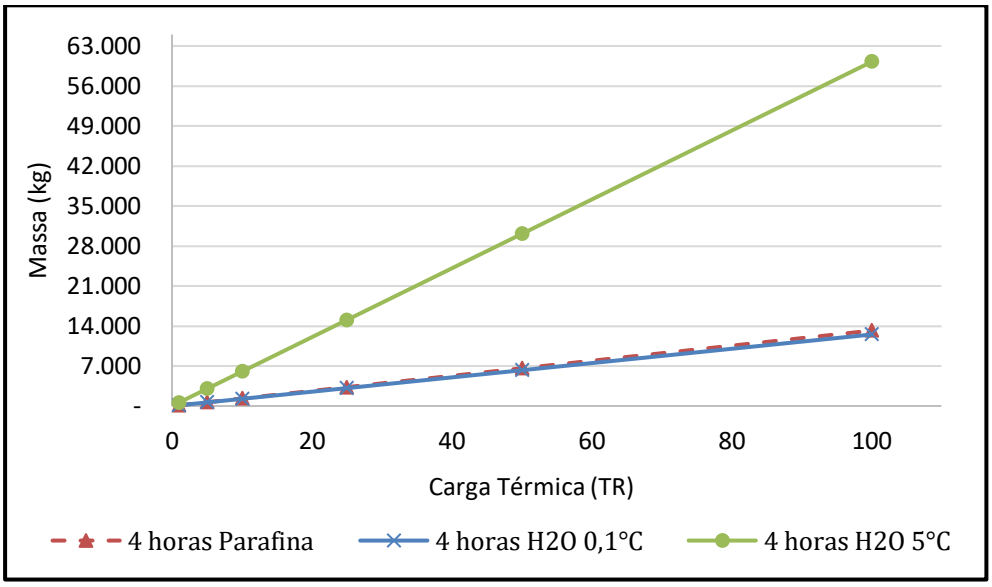
FIGURA 1. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 20°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 2, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 20°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

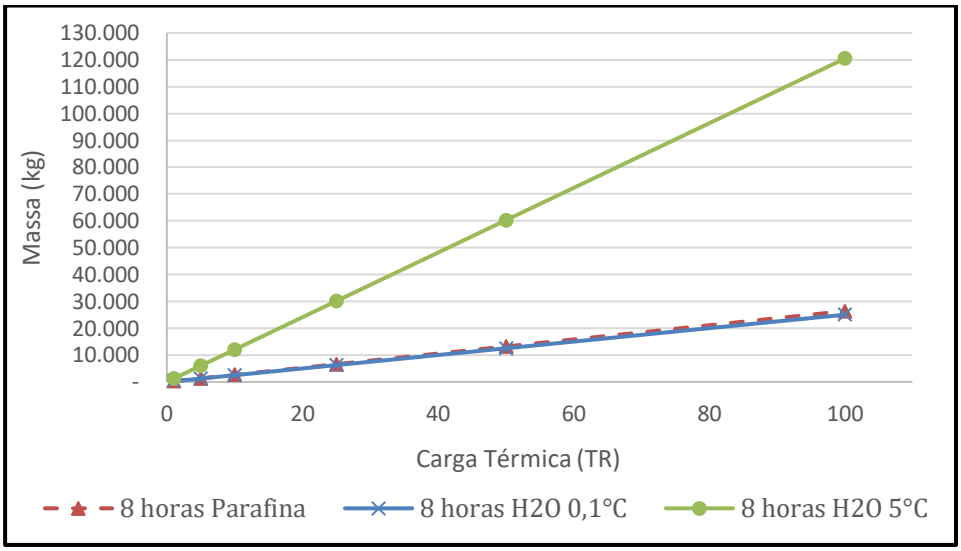
FIGURA 2. Quantidade de massa para 4 horas de utilização do ATE, temperatura inicial de 20°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 3, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 20°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

FIGURA 3. Quantidade de massa para 8 horas de utilização do ATE, temperatura inicial de 20°C.



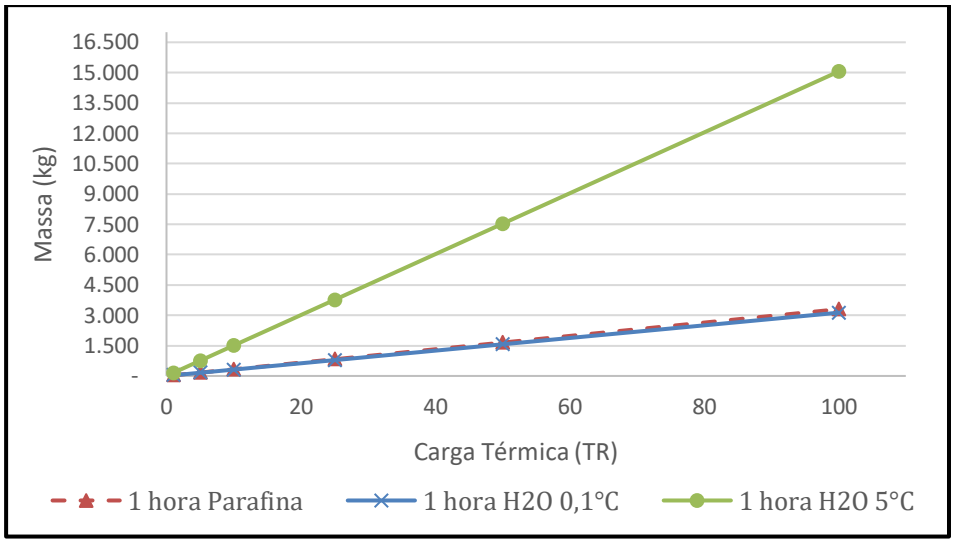
Fonte: elaborado pelos autores.

Considerando o cenário de temperatura do ambiente de 25°C, podem ser observados a seguir os gráficos variando a quantidade de horas.

Nas Figuras 4, 5 e 6 pode-se observar que o comportamento do sistema se repete em relação às Figuras 1, 2 e3. Porém a massa calculada é menor, menos de 10%, em relação aos outros.

Considerando o cenário de temperatura do ambiente de 30°C, podem ser observados a seguir os gráficos variando a quantidade de horas.

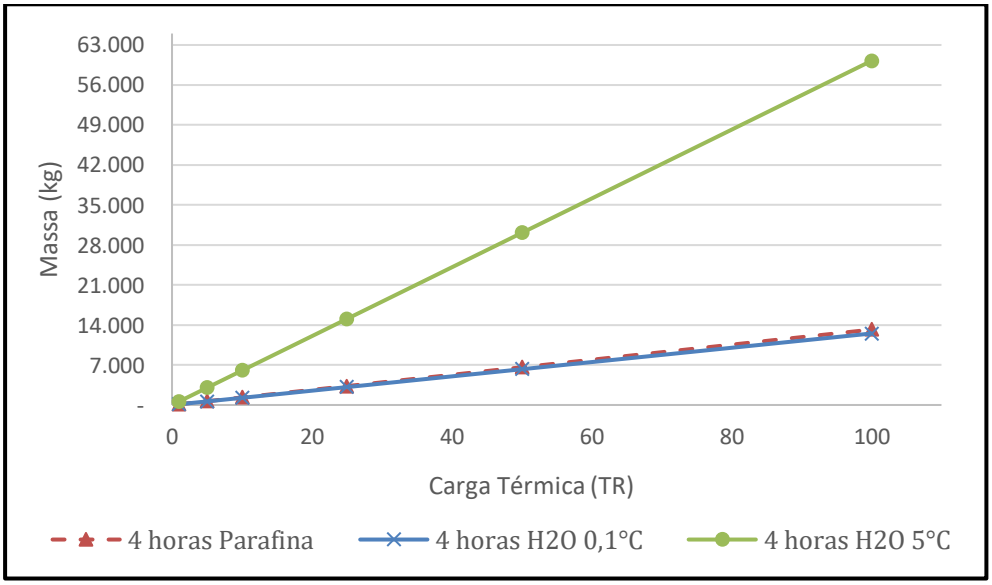
FIGURA 4. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 25°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 5, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 25°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

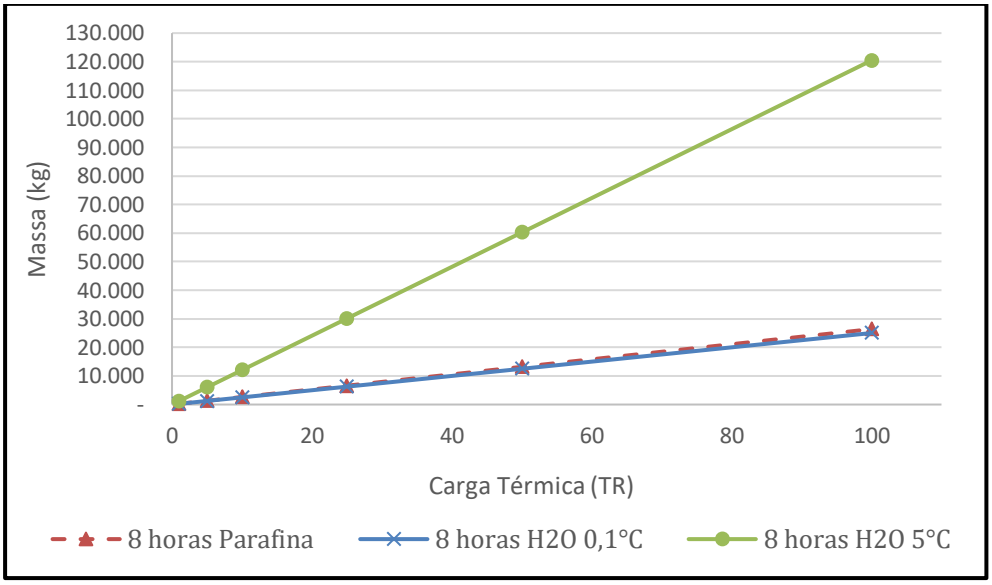
FIGURA 5. Quantidade de massa para 4 horas de utilização do ATE, temperatura inicial de 25°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 6, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 25°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

FIGURA 6. Quantidade de massa para 8 horas de utilização do ATE, temperatura inicial de 25°C.

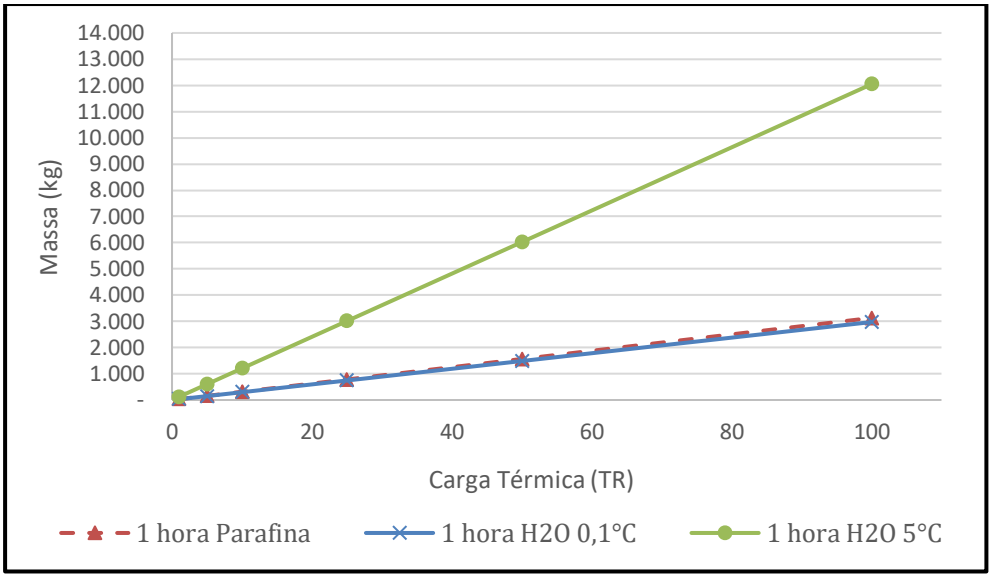


Fonte: elaborado pelos autores.

Nas Figuras 7, 8 e 9, pode ser observado que o comportamento do sistema se repete em relação as figuras anteriores. Porém a massa calculada é menor, menos de 10%, em relação aos outros.

Considerando o cenário de temperatura do ambiente de 35°C, podem ser observados a seguir os gráficos variando a quantidade de horas.

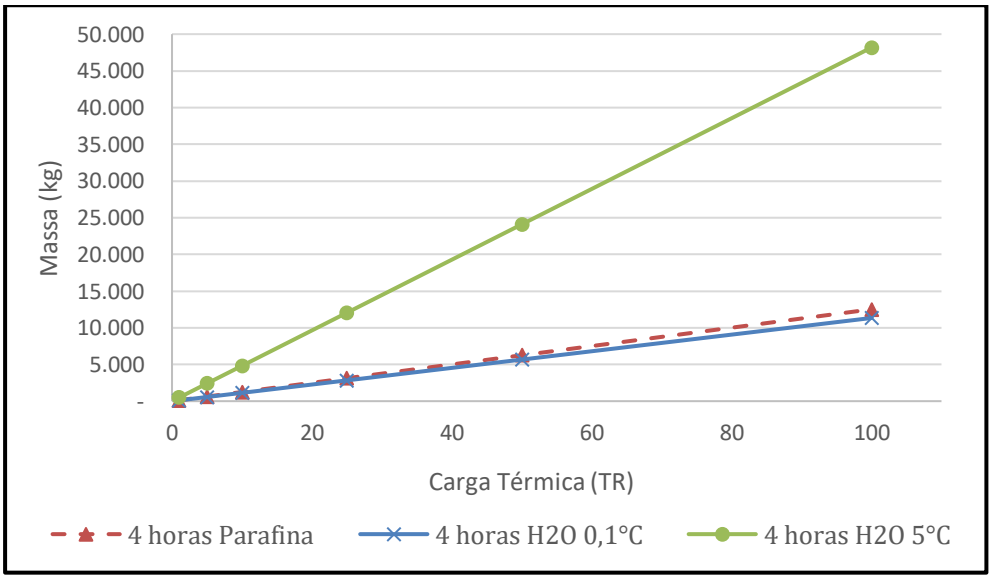
FIGURA 7. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 30°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 8, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 30°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

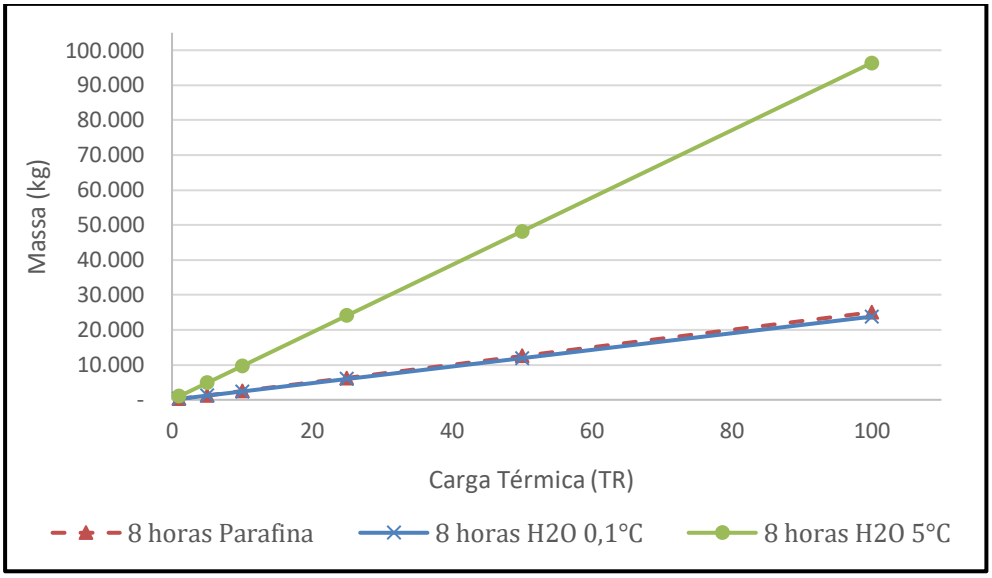
FIGURA 8. Quantidade de massa para 4 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 30°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 9, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 30°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

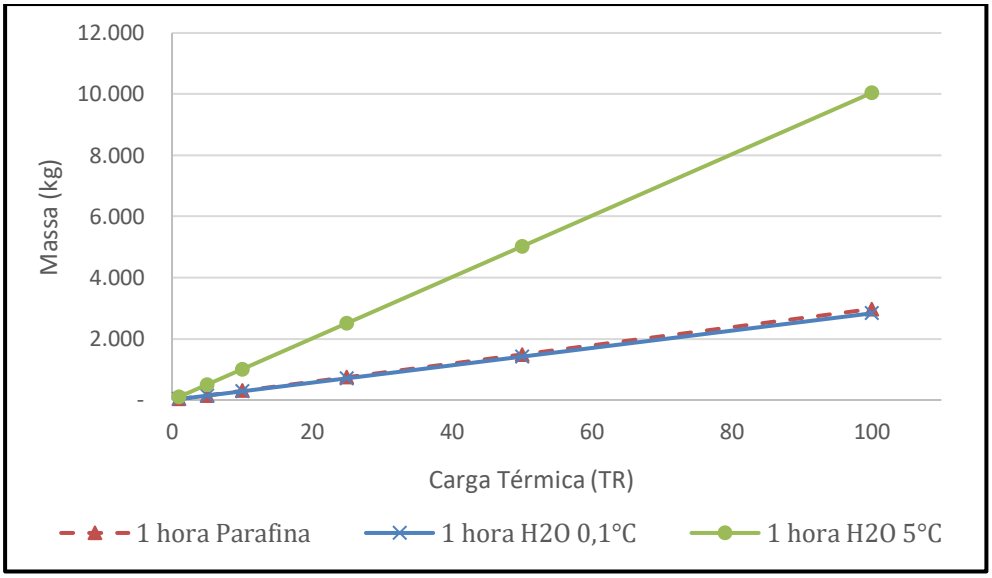
FIGURA 9. Quantidade de massa para 8 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 30°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Nas Figuras 10, 11 e 12, observa-se que o comportamento do sistema se repete em relação as figuras anteriores. Porém a massa calculada é menor, menos de 10%, em relação aos outros. Seria importante descrever no texto de que nelas a temperatura inicial do PCM é maior. Além disso, quando você relata que é necessário uma massa menor poderia incluir que essa necessidade de menor massa deve-se ao fato de maior energia armazenada na forma de sensível em virtude de uma maior diferença de temperatura

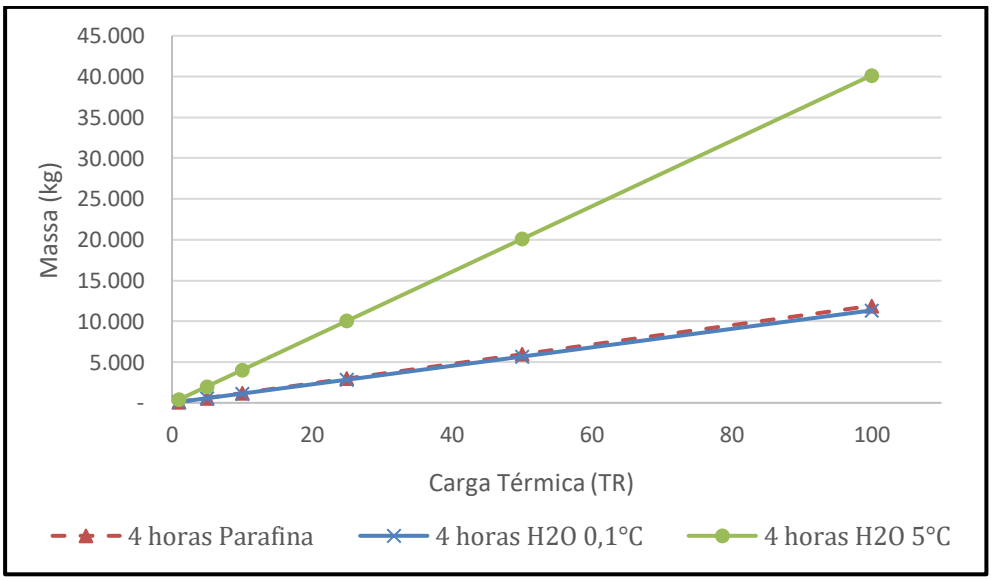
FIGURA 10. Quantidade de massa para 1 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 35°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 11, pode-se observar, que para 4 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 35°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 4 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

FIGURA 11. Quantidade de massa para 4 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 35°C.

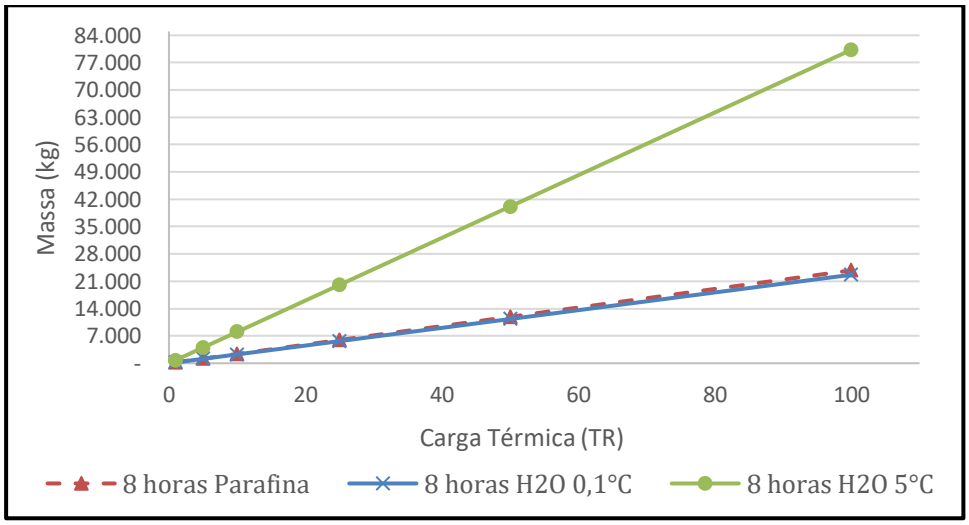


Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 12, pode-se observar, que para 8 horas do sistema de refrigeração em operação, mantendo a temperatura inicial de 35°C, é necessária uma quantidade de massa quase que 8 vezes maior que para somente 1 hora. Mantendo a semelhança da quantidade de massa para água a 0,1°C

e Parafina e verificando que para água a 5°C a quantidade é maior proporcional a carga térmica requerida.

FIGURA 12. Quantidade de massa para 8 hora de utilização do ATE, temperatura inicial de 35°C.

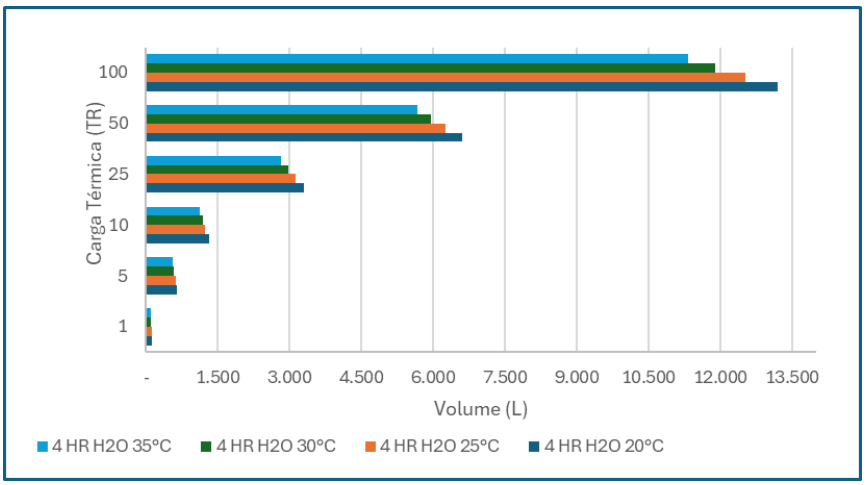


Fonte: elaborado pelos autores.

Após apresentar a quantidade de massa calculada para cada cenário, foi necessário entender como essa variação de massa se traduz em volume, mas com um foco direcionado para apenas 4 horas de utilização do ATE, como uma alternativa média entre os cenários calculados para variação do MMF considerada inicialmente.

Nas Figuras 13, 14 e 15, observa-se que o volume da água no ATE a mesma temperatura da parafina (5°C) é quase 5 vezes maior que a parafina, ainda analisando os gráficos percebe-se que quanto maior a carga térmica, maior o volume, aumentando proporcionalmente.

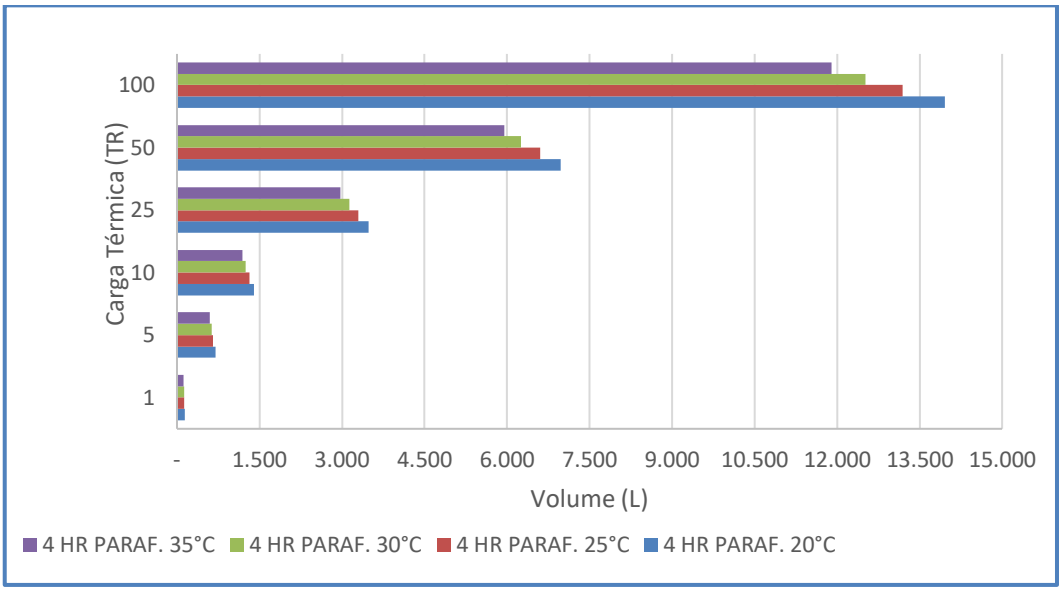
FIGURA 13. Volume do ATE para H2O à 0,1°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 14, pode-se observar que, para Parafina como MMF, é necessário um volume quase igual do que para água com temperatura de 0,1°C, é possível também afirmar que quanto menor a temperatura do dia maior é o volume requerido.

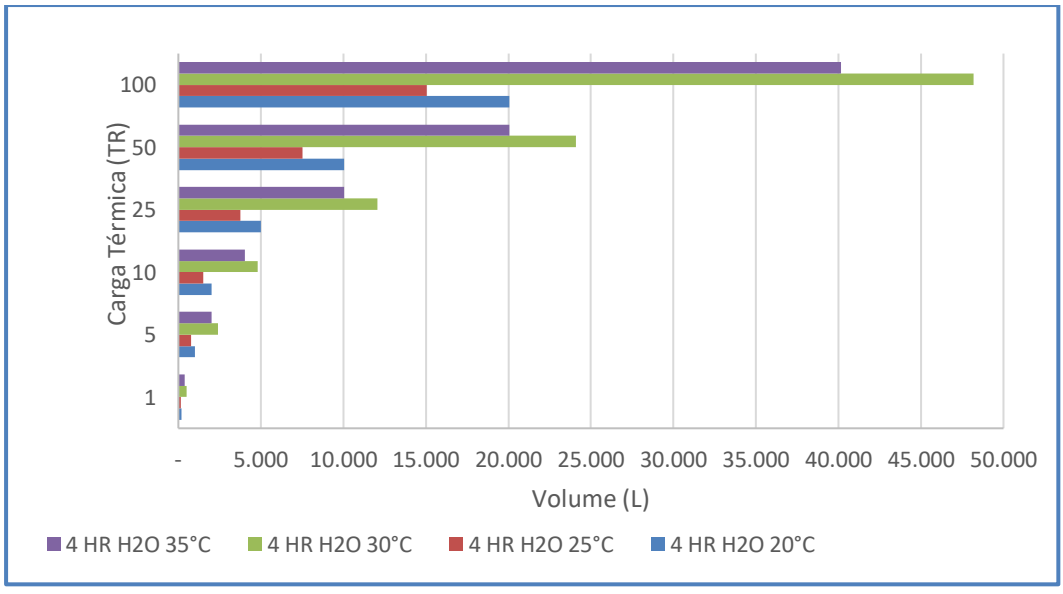
FIGURA 14. Volume do ATE para Parafina.



Fonte: elaborado pelos autores.

Na Figura 15, pode-se observar, que para água à 5,0°C os volumes são quase 3 vezes maiores que os volumes dos demais fluidos. É possível também afirmar que para água à 5,0°C o comportamento dos volumes é variado sendo o de temperatura ambiente de 30,0°C, o maior.

FIGURA 15. Volume do ATE para H2O à 5,0°C.



Fonte: elaborado pelos autores.

4. CONCLUSÕES

Os resultados das simulações fornecem uma compreensão detalhada de como a massa e o volume do ATE variam em função da carga térmica e da temperatura inicial dos materiais de mudança de fase (MMF). As análises demonstram que, para períodos mais longos de armazenamento de energia térmica, há uma necessidade proporcionalmente maior de massa. Especificamente, para períodos de 1, 4 e 8 horas, observou-se que a massa necessária para o armazenamento é, respectivamente, 4 e 8 vezes maior conforme a duração aumenta.

A parafina apresentou uma vantagem significativa em relação à água como MMF. Quando a temperatura inicial dos MMFs era de 5°C, a massa necessária de parafina foi aproximadamente 82,6% menor que a da água para armazenar a mesma quantidade de energia térmica. Adicionalmente, a água a 0,1°C apresentou um comportamento semelhante ao da parafina, com uma variação de apenas 5,7%.

Além disso, as simulações mostraram que o volume necessário para o armazenamento térmico varia significativamente entre os diferentes MMFs e condições térmicas. Em termos de volume, a água a 5°C requer volumes até 5 vezes maiores em comparação com a parafina, destacando a eficiência volumétrica deste último. Por exemplo, para um período de armazenamento de 4 horas, o volume da água a 5°C foi três vezes maior que o volume da parafina na mesma temperatura.

Em conclusão, este estudo destaca a importância de selecionar o MMF adequado e de considerar as condições térmicas específicas para a otimização do desempenho do ATE. A parafina demonstrou ser uma opção mais eficiente tanto em termos de massa quanto de volume, especialmente em temperaturas mais baixas. Esses dados numéricos fornecem insights valiosos para a implementação prática de sistemas de armazenamento de energia térmica, permitindo um balanceamento eficaz entre a capacidade de armazenamento e a eficiência espacial. A escolha do MMF e as condições de operação devem ser cuidadosamente avaliadas para maximizar a eficiência e a eficácia dos sistemas de armazenamento de energia térmica.

Acredito ser interessante em outro momento realizar uma análise mais detalhada de Capex e Opex para poder subsidiar o aceite do proprietário ou usuário do sistema ATE em comparação com os sistemas atuais.

DECLARAÇÃO DE RESPONSABILIDADE

Os autores são os únicos responsáveis por este trabalho.

REFERÊNCIAS

Hasnain, S.M., 1998. Review on sustainable thermal energy storage technologies, Part I: heat storage materials and techniques. Energy Convers. Manag. 39, 1127–1138. https://doi.org/10.1016/S0196-8904(98)00025-9

López-Navarro, A., Biosca-Taronger, J., Corberán, J.M., Peñalosa, C., Lázaro, A., Dolado, P., Payá, J., 2014. Performance characterization of a MMF storage tank. Appl. Energy 119, 151–162. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2013.12.041

Nazir, H., Batool, M., Bolivar Osorio, F.J., Isaza-Ruiz, M., Xu, X., Vignarooban, K., Phelan, P., Inamuddin, Kannan, A.M., 2019. Recent developments in phase change materials for energy storage applications: A review. Int. J. Heat Mass Transf. 129, 491–523. https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.09.126

Oró, E., De Gracia, A., Castell, A., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012. Review on phase change materials (MMFs) for cold thermal energy storage applications. Appl. Energy 99, 513–533. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2012.03.058

Selvnes, H., Allouche, Y., Manescu, R.I., Hafner, A., 2021. Review on cold thermal energy storage applied to refrigeration systems using phase change materials. Therm. Sci. Eng. Prog. 22, 100807. https://doi.org/10.1016/j.tsep.2020.100807

Torregrosa-Jaime, B., López-Navarro, A., Corberán, J.M., Esteban-Matías, J.C., Klinkner, L., Payá, J., 2013. Experimental analysis of a paraffin-based cold storage tank. Int. J. Refrig. 36, 1632–1640. https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2013.05.001