

**12º CONGRESSO INTERNACIONAL DE
AR CONDICIONADO, REFRIGERAÇÃO, AQUECIMENTO E VENTILAÇÃO**

MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE PARA ARMAZENAMENTO DE ENERGIA APLICADOS ÀS SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO: ESTADO DA ARTE

Ítalo Franco Guilherme – italoengmec95@gmail.com

Enio Pedone Bandarra Filho – bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Faculdade de Engenharia Mecânica, www.ufu.br

R1 - Sistemas, Equipamentos e Componentes

Resumo. *O presente trabalho tem por objetivo analisar os estudos realizados a respeito da aplicação de materiais de mudança de fase (PCM) para armazenamento de energia em sistemas de refrigeração e ar condicionado. A revisão aborda as principais perdas de energia em sistemas de refrigeração que atuam de modo intermitente. Além das principais características dos materiais de mudança de fase, como espessura, temperatura de mudança de fase e composição, dando ênfase aos aspectos necessários para a utilização em sistemas de refrigeração e ar condicionado. Por fim, são apresentados os estudos que obtiveram redução nas flutuações de temperatura no trabalho, no número de ciclos e no consumo de energia pelo compressor, além da análise do desempenho dos sistemas que operaram com auxílio de materiais de mudança de fase. Logo, a aplicação dos PCMs em sistemas que atuam de maneira intermitente pode ser uma excelente alternativa para que os compressores atuem por menos tempo e para que sejam projetados equipamentos energeticamente mais eficientes e que sejam ambientalmente amigáveis.*

Palavras-chave: *Material de mudança de fase, PCM, Perdas, Consumo.*

1. INTRODUÇÃO

Devido à rápida industrialização e progresso no padrão de vida, o consumo de eletricidade aumenta cada vez mais, sendo os sistemas de refrigeração por compressão de vapor responsáveis por uma vasta parcela desse consumo, aproximadamente 30 % do consumo de energia mundial (Buzelin et al., 2005). O aprimoramento da eficiência desses sistemas desempenha um papel crucial na redução da taxa de consumo de eletricidade, que dependem principalmente da eficiência do compressor, assim como seus ciclos de funcionamento, carga térmica, temperatura ambiente e fluido refrigerante usado. Desta forma, alguns fatores podem auxiliar na melhoria do desempenho e economia de energia, como a utilização de compressores mais eficientes, otimização dos sistemas de controle (termopares, pressostatos), aprimoramento do isolamento térmico do equipamento ou incremento do processo de transferência de calor no condensador ou evaporador (Bista et al., 2018).

Com relação a este último fator, uma boa opção para reduzir o consumo de energia elétrica está no armazenamento de energia térmica. Ela pode ser realizada com o armazenamento de calor sensível (SHS - Sensible Heat Storage), que precisa de materiais com alto calor específico, através do armazenamento de calor latente (LHS - Latent Heat Storage) por mudança de fase de um material de um estado para outro (armazenamento e liberação de calor), e por armazenamento de calor químico via absorção de calor durante a reação e liberação de calor na reação reversa (Bakhshipour et al., 2017).

O armazenamento de calor latente é uma das maneiras mais eficientes de armazenar energia térmica. Diferente do SHS o método de LHS fornece uma densidade de armazenamento muito maior, com uma diferença de temperatura menor entre o armazenamento e a liberação de calor (Farid et al., 2004). Material de mudança de fase (PCM – Phase Change Material) é uma substância com elevado calor de fusão que, derretendo e solidificando a uma certa temperatura, é capaz de armazenar e liberar grandes quantidades de energia térmica. Assim, os PCMs são classificados como unidades de armazenamento de calor latente (Khan and Afroz, 2015).

Desta forma, a aplicação de material de mudança de fase em refrigeradores é uma das opções para melhorar seu desempenho. A energia térmica associada ao PCM é próxima de um fenômeno natural e pode ser chamada de energia verde. Devido à alta densidade de armazenamento de energia do PCM e ao processo isotérmico do armazenamento de energia, a entalpia de fusão do PCM pode ser empregada em diferentes aplicações térmicas. Além disso, o armazenamento de energia térmica através do calor latente desses materiais é capaz de fornecer alta densidade de armazenamento de energia por unidade de massa em processos quase isotérmicos (Oró et al., 2012a). Logo, em um sistema de armazenamento de energia térmica o PCM absorve ou libera grandes quantidades de energia a uma certa temperatura durante o período de transição de mudança de fase (processo de carga e descarga), com um alto calor de fusão em torno de sua faixa de temperatura de mudança de fase (Cabeza et al., 2002), assim como está representado na Fig. 1.

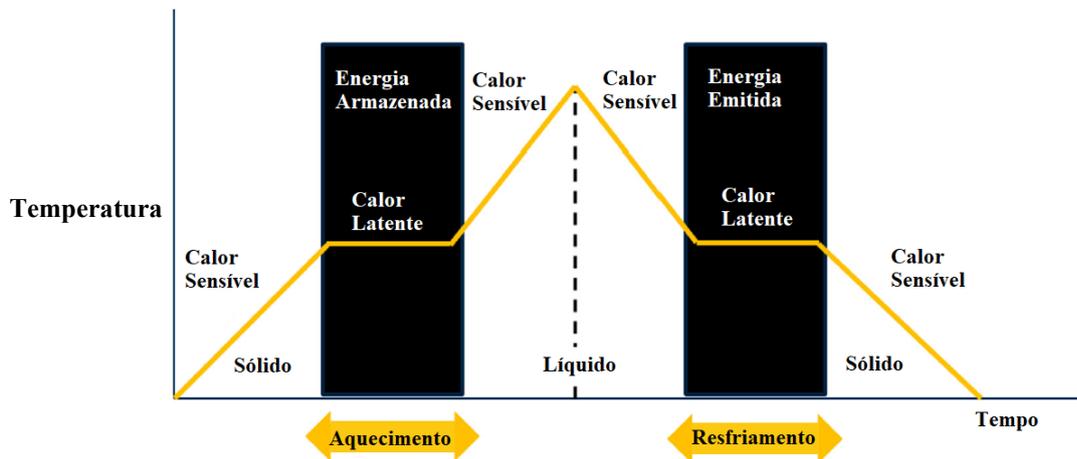


Figura 1. Diagrama esquemático da transição das mudanças de fase de um PCM (Du et al., 2018).

Atualmente, o uso do PCM é visto como uma das promissoras técnicas de energia sustentável de armazenamento de energia térmica. Essa energia térmica pode ser usada em diversos tipos de sistemas de refrigeração. De maneira que, a redução da flutuação de temperatura e a melhoria do desempenho do sistema são os principais objetivos do uso de PCMs em sistemas de refrigeração (Bista et al., 2018). Os PCMs podem ser aplicados em várias configurações de um equipamento de refrigeração no intuito de incrementar o COP do sistema, seja aumentando a temperatura de evaporação, diminuindo a temperatura de condensação ou reduzindo a operação intermitente do compressor (Korth et al., 2020).

2. PERDAS DE ENERGIA EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO INTERMITENTES

Ao analisar os sistemas de refrigeração que atuam de maneira intermitente, ou seja, hora opera com compressor acionado, hora atua apenas como um material isolante, como por exemplo os refrigeradores domésticos convencionais. Uma das principais desvantagens desse tipo de equipamento está nas perdas de energia térmica, que consequentemente geram maiores consumos de energia e pior eficiência ao sistema.

Quatro tipos de perdas foram observadas por Björk and Palm (2006) durante a análise experimental de um ciclo liga e desliga de um sistema de refrigeração intermitente convencional. (1) O fluido refrigerante líquido retirado do evaporador durante a inicialização, (2) o vapor de fluido refrigerante bombeado através do tubo capilar na partida, (3) trocadores de calor com carga inadequada durante todo o período ligado, causando elevações de temperatura e (4) fluxo de vapor entrando no evaporador através do tubo capilar durante o período no qual compressor está desligado. As principais perdas relacionadas ao número de ciclos “liga/desliga” em um sistema de refrigeração intermitente devem-se aos deslocamentos do fluido refrigerante devido as partidas e paradas do compressor, sendo cerca de 5 a 30 % de perdas de eficiência relacionadas a esse fenômeno (Azzouz et al., 2008).

Khan e Afroz (2015) também observaram algumas perdas de energia devido ao deslocamento do fluido refrigerante após os processos de “liga/desliga” do compressor. Além disso, notaram que durante o ciclo ligado, a carga térmica dos trocadores de calor é relativamente maior do que em um sistema normal constantemente controlado. Assim, devido ao aumento da diferença de temperatura entre o compartimento e o fluido refrigerante a eficiência térmica é reduzida. De maneira que essas perdas podem significar entre 5 e 37 % de diminuição na eficiência desses sistemas de refrigeração (Coulter and Bullard, 1997; Jakobsen, 1995; Janssen et al., 1992).

Anteriormente à partida do compressor, a maior parte do fluido refrigerante fica acumulada no evaporador e no compressor. No início do funcionamento, o evaporador está em uma temperatura positiva, aproximadamente na temperatura do gabinete (no caso dos refrigeradores). O fluxo de massa retirado do evaporador é alto e o vapor de fluido refrigerante entra no tubo capilar resultando em uma drenagem do evaporador e acúmulo de fluido no condensador. Quando finalmente começa a entrar fluido refrigerante líquido no capilar, o fluxo de massa na entrada do evaporador aumenta e o evaporador começa a encher de líquido. Esse período que o equipamento leva, com cargas não ótimas nos trocadores de calor, até ter um funcionamento padrão de um sistema de compressão de vapor acarreta em perdas na eficiência e na capacidade de refrigeração (Azzouz et al., 2008).

Uma alternativa para reduzir essas perdas está no armazenamento de energia térmica na forma de calor latente, através de materiais de mudança de fase, sendo o mais tradicional deles a água, por exemplo em aplicações de banco de gelo. Maderić et al. (2019) realizaram um estudo experimental focado em medidas de consumo de energia e eficiência energética em um sistema de controle de refrigeradores de bebidas com armazenamento de calor latente (banco de gelo). Os resultados mostram que a substituição de um termostato por um relé de banco de gelo como dispositivo de controle pode fornecer dois benefícios principais: redução de até 15 % no consumo de energia e diminuição significativa das partidas do sistema de refrigeração, o que pode prolongar a vida útil do compressor. Uma análise do modo intermitente de operação do agitador (misturador) integrado ao armazenamento de calor latente foi investigada, resultando em uma

redução de até 55 % do consumo de energia no modo de espera e 17 % de redução durante a operação do sistema de refrigeração. Foi analisado que o gelo da água, como mau condutor de calor, ao formar uma camada em torno do tubo do evaporador aumenta continuamente a resistência ao calor e causa uma instabilidade em todo o sistema de refrigeração. Ademais, de maneira desvantajosa o aumento da espessura do gelo causa redução do fluxo de calor absorvente do evaporador.

Assim como nos demais PCMs, após o início da operação do resfriador, a água no banho é resfriada e o banco de gelo é formado em torno do tubo do evaporador após atingir a temperatura de congelamento. Este período até a primeira parada do sistema de refrigeração é chamado de "Pull Down Time" (PDT), sendo que parâmetros importantes do sistema de refrigeração como pressão e temperatura de evaporação e condensação, fluxo de massa do compressor e do dispositivo de expansão são alterados durante a PDT (Maderic et al., 2019).

Oyedepo et al. (2016) definiram o PDT como sendo a duração necessária para alterar a temperatura do ar da câmara do evaporador, da temperatura ambiente para a temperatura final desejada. E analisaram que o aumento desse tempo implica em uma capacidade de refrigeração inadequada. Além disso, esse conceito pode ser ampliado para outros sistemas de refrigeração que atuam de modo intermitente, com o compressor trabalhando em ciclos de "liga/desliga". De modo que o PDT seria o tempo requisitado para que a temperatura do líquido, no instante em que o equipamento é ligado, atinja a temperatura desejada, na qual coincide com a parada do compressor.

Logo, este período será considerado em algumas análises de sistemas de refrigeração com PCM. Visto que em condições favoráveis de funcionamento o material deve solidificar durante o PDT para que com o compressor desligado o PCM tenha armazenado energia o bastante para que sua inércia térmica permita o máximo de estabilidade ao sistema.

3. CARACTERÍSTICAS DOS MATERIAIS DE MUDANÇA DE FASE

As principais características dos materiais de mudança de fase que influenciam na sua eficiência e aplicação são a espessura, a temperatura de mudança de fase e a composição do material. De modo que, para sistemas de refrigeração e ar condicionado é necessário a utilização de materiais específicos que mudem de fase na temperatura adequada, garantindo o armazenamento de calor latente.

3.1 Espessura do material de mudança de fase

Ao operar com PCM em sistemas de refrigeração intermitentes, o aumento da espessura do material resulta na diminuição da razão de tempo "liga/desliga" do compressor devido à extensão do tempo de desligamento do compressor. Isso porque, à medida que a espessura do PCM aumenta, a capacidade de armazenar energia aumenta significativamente e relativamente mais calor é absorvido. Logo, uma quantidade maior de calor é liberada quando o PCM se solidifica, aumentando a autonomia do sistema (Cerri et al., 2003). No entanto, deve haver um limite para a espessura do PCM, já que em casos de materiais espessos em excesso nem todo o material passará pelo processo de mudança de fase (Azzouz et al., 2009). Além disso, a espessura do PCM deve ser considerada com base na carga térmica, uma vez que, a aplicação de um PCM mais espesso implica em custos mais elevados e requer inicialmente um trabalho maior do compressor para solidificar o PCM (Joybari et al., 2015a).

3.2 Temperatura de mudança de fase

A temperatura de mudança de fase (PCT – Phase Change Temperature) do material desempenha um papel importante, pois o ponto de fusão do PCM selecionado deve estar na faixa da temperatura do termostato. No caso de PCMs com alto PCT, a tendência é que o compressor fique mais tempo desligado, gerando menor consumo de energia e incrementando o COP do sistema. No entanto, dependendo da aplicação, o aumento da temperatura no interior do compartimento pode resultar na deterioração da qualidade dos alimentos (Cerri et al., 2003).

Portanto, os PCMs devem ser selecionados com base em sua temperatura de fusão. Por exemplo, materiais que fundem abaixo de 15 °C são propícios para armazenar calor em aplicações de RAC, enquanto materiais que fundem acima de 90 °C são usados para refrigeração por absorção. Dois típicos materiais usados em aplicações de PCM são as ceras de parafina e os sais hidratados. A cera de parafina é barata e possui densidade moderada de armazenamento de energia térmica, no entanto, sua baixa condutividade térmica exige grande área de superfície. Os sais hidratados têm maior densidade de armazenamento de energia e maior condutividade térmica, mas como desvantagem sofrem super resfriamento e segregação de fases, fazendo-se necessário o uso de alguns agentes de nucleação e espessamento (Farid et al., 2004).

Além disso, o encapsulamento do material, o armazenamento do PCM em contato direto e a aplicação de nanoestruturas no intuito de modificar as propriedades termo físicas do material são técnicas utilizadas na aplicação dos PCMs e que influenciam diretamente na temperatura de mudança de fase (Korth et al., 2020). Por exemplo, a taxa de solidificação do PCM pode ser reduzida significativamente com a adição de uma combinação de nanopartículas de metal no intuito de aprimorar a transferência de calor (Mahdi e Nsofor, 2017). Ademais, Estruturas de alumínio embutidas podem fornecer um aumento na condução de calor através do volume de armazenamento (Lazzarin et al., 2018). Assim como a implementação de estruturas de grafite ou pó de grafite ao PCM em variadas concentrações pode alterar as propriedades de armazenamento (Zhang and Fang, 2006; Guo et al., 2015; AlMaadeed et al., 2015).

De modo geral, quando a temperatura da mudança de fase é maior, o COP também cresce devido à um menor consumo de energia explicado pela redução da taxa de compressão. Porém, quando a temperatura de solidificação se torna muito alta, é atingida uma temperatura excessiva do ar durante a fusão, o que é desvantajoso. Havendo, assim, uma temperatura de mudança de fase ideal para cada sistema (Azzouz et al., 2008).

No intuito de aprimorar o desempenho de um freezer comercial, Oró et al. (2012) utilizaram como PCM um material já comercializado, nomeado “Climsel C-18” ($\text{NaNO}_3/\text{H}_2\text{O}$), com uma temperatura de fusão de $-18\text{ }^\circ\text{C}$. Nos testes com funcionamento padrão ficou evidente a importância de selecionar um PCM que tenha uma temperatura de mudança de fase próxima à temperatura de armazenamento do freezer em relação às aberturas das portas, visto que operando com uma temperatura de armazenamento de $-19\text{ }^\circ\text{C}$, o benefício da utilização do PCM foi evidente, enquanto quando a temperatura de armazenamento foi movida para $-22\text{ }^\circ\text{C}$, o PCM não apresentou melhora significativa devido à diferença entre a temperatura de armazenamento e o PCT.

3.3 PCMs para aplicação de resfriamento

Direcionando a análise dos materiais de mudança de fase utilizados no armazenamento de energia térmica apenas para aplicações de resfriamento, existe uma variedade de sistemas que podem operar com o auxílio desses materiais, como no armazenamento de alimentos (Saito, 2002). Além de sistemas de armazenamento de gelo, transporte de materiais sensíveis à temperatura e condicionadores de ar (Oró et al., 2012a).

As propriedades mais importantes nessas aplicações de PCMs são o calor latente e a condutividade térmica (Farid et al., 2004). Em alguns casos de proteção ou isolamento térmico, valores reduzidos de condutividade podem ser requeridos, no entanto nos sistemas de armazenamento esses valores baixos podem ser grandes empecilhos, pois apesar de haver energia suficiente armazenada, o material não possui a capacidade necessária para dispor dessa energia com rapidez (Regin et al., 2008). Sendo assim, nas aplicações de PCMs em sistemas de resfriamento é importante que a condutividade térmica dos materiais seja capaz de conduzir a energia armazenada com rapidez, sem comprometer o funcionamento normal do equipamento. Desta forma, visto que uma das grandes deficiências dos sistemas de armazenamento de energia térmica através de PCM é a baixa condutividade térmica, a aplicação de aletas na superfície da estrutura (placa metálica, tubo, etc.) foi estudada no intuito de incrementar a troca de calor (Tiari et al., 2016; Zhang and Faghri, 1996; Zarajabad and Ahmadi, 2018). Assim como a adição de nanopartículas ao material de mudança de fase em conjunto ou separado do método das aletas também foi estudada (Mahdi and Nsofor, 2017b).

Ademais, outras propriedades termofísicas também devem ser consideradas na escolha do material, eles devem ter uma temperatura de fusão dentro da faixa de operação, calor específico alto para fornecer significativo armazenamento de calor sensível, pequena alteração de volume na mudança de fase, baixa pressão de vapor na temperatura operacional, elevada densidade, taxa de cristalização suficiente para a aplicação, além de derreter e congelar congruentemente dentro do sub resfriamento mínimo. Muitos PCMs, como os hidratos de sal, não solidificam imediatamente após o resfriamento abaixo da temperatura de fusão, mas iniciam a cristalização após uma temperatura bem abaixo da temperatura de fusão. Este que é o efeito chamado de sub resfriamento. Se a nucleação não ocorrer, o calor latente não pode ser liberado e o material armazena apenas o calor sensível. Desta forma, a cristalização e a aglomeração de materiais são um dos principais empecilhos encontrados na aplicação dos PCMs. Logo, as propriedades químicas também devem ser analisadas, sendo um material quimicamente estável que possua um ciclo reverso completo de solidificação/fusão, não degradando com o passar dos ciclos, que não apresente corrosividade para os materiais de construção ou encapsulamento, e ainda não seja inflamável ou explosivo e nem tóxico.

Por fim, os fatores econômicos também devem ser examinados, como a facilidade de reciclagem e tratamento do material, a abundância e disponibilidade, assim como o custo (Oró et al., 2012a; Vadhera et al., 2018). Com relação ao custo, a aplicação de um tanque de armazenamento a frio de PCM foi considerada mais dispendiosa do que as opções tradicionais de armazenamento, no entanto, os potenciais de armazenamento de energia térmica em condições de resfriamento com PCM são mais expressivos quanto a economia de energia, mitigação de CO_2 e redução de gastos de operação (Oró et al., 2014).

Os PCMs são divididos em orgânicos e inorgânicos. Os materiais orgânicos são classificados como parafina e não parafina (ácidos graxos, eutéticos e misturas) e tendem a cristalizar com pouco ou nenhum sub resfriamento, além de serem, na maioria dos casos, não corrosivos e muito estáveis. Já os inorgânicos são classificados como compostos e eutéticos, sendo um material eutético uma composição de dois ou mais componentes, que derrete e congela formando congruentemente uma mistura dos cristais dos componentes durante a cristalização, de maneira que mudam de fase, geralmente, em temperaturas constantes. Os principais materiais inorgânicos são sais, hidratos de sal, soluções aquosas e água. De modo geral, as soluções salinas eutéticas possuem melhores propriedades termo físicas, como entalpia de mudança de fase, além de serem mais baratas. No entanto, a incorporação de sais à mistura pode deixá-la quimicamente instável e corrosiva. Por outro lado, a maioria dos PCMs orgânicos são não corrosivos e quimicamente estáveis, porém possuem menor condutividade térmica, menor calor latente, maior variação de volume entre a fase sólida e líquida e são relativamente caros (Oró et al., 2012a). A seguir, a Tabela 1 apresenta exemplos e PCMs inorgânicos e orgânicos com suas principais propriedades e características.

Tabela 1. Principais classes e características dos PCMs (Cabeza et al., 2011).

| Classificação | Inorgânico | Orgânico |
|-----------------------------|---|---|
| Classes | Hidrato cristalino, sal, metal ou liga fundida | Hidrocarboneto alifático, sais de ácidos ou de ésteres, álcoois, hidrocarboneto ou cetona aromática, lactama, polímeros |
| Vantagens | Densidade de armazenamento de energia e condutividade térmica mais elevadas, não inflamável, barato | Estabilidade física e química, bom comportamento térmico, zona de transição ajustável |
| Desvantagens | Sub resfriamento, segregação de fase, corrosivo | Baixa condutividade térmica e densidade, alta volatilidade, inflamabilidade, variação de volume |
| Técnicas de aperfeiçoamento | Misturar com agentes nucleantes e espessantes, camada fina posicionada horizontalmente, agitação mecânica | Aditivos de alta condutividade térmica, aditivos incombustíveis |

A maior parte dos PCMs com temperatura de fusão abaixo de 0 °C são uma solução salina eutética de água e acima de 0 °C são materiais orgânicos. Desta maneira, alguns materiais com PCTs próximas de 0 °C encontrados na literatura são as soluções eutéticas de água com sais, como as misturas de água com aproximadamente 6,5 wt.% K₂SO₄ ou 4,0 wt.% Na₂SO₄, que resultaram em temperaturas de fusão de -1,55 °C e -1,2°C, respectivamente (Oró et al., 2012a). Além de água pura ou compostos de água com poliacrilamida (Cabeza et al., 2002), (Cabeza et al., 2011) e misturas orgânicas eutéticas de tetradecano com PCTs entre 1,5–5,6 °C (Kenisarin, 2010). Já com relação aos materiais comercializados para armazenamento de frio, alguns exemplos são as soluções salinas nomeadas de “AN 03” e “SLT 3” que possuem temperatura de fusão em -3 °C e a “TH 4” em -4 °C, enquanto as parafinas denominadas “RT 3” e “RT 4” mudam de fase a 4 °C (Regin et al., 2008).

Outro fator importante na aplicação de materiais de mudança de fase no armazenamento de energia térmica em situações de resfriamento é o encapsulamento do PCM. Assim, no projeto desse material de contenção (seja um tanque ou uma cabine) é essencial considerar os requisitos de força, flexibilidade, resistência à corrosão e estabilidade térmica, além de isolar o PCM das interações com o meio externo que possam ser prejudiciais a sua estabilidade e fornecer área superficial suficiente para transferência de calor (Regin et al., 2008).

4. EFEITOS DO PCM EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO E AR CONDICIONADO

Os materiais de mudança de fase (PCMs) são aplicados e estudados como alternativas de armazenamento de energia desde cerca de 40 anos atrás. O uso tradicional do PCM no sistema de refrigeração é como um tanque de armazenamento a frio. Durante os períodos fora do pico, o sistema de refrigeração produz energia excedente que será armazenada no PCM. A energia de resfriamento armazenada será liberada durante os períodos de pico para ajudar o sistema de refrigeração a atender ao pico de carga, ou em situações em que o compressor encontrasse desligado. Assim, sistemas com PCM possibilitam a obtenção de “chillers” menores com menores custo de operação e maior eficiência (Wang et al., 2007).

Desta maneira, a seguir, serão analisados os efeitos da aplicação desses materiais em diversos sistemas de refrigeração. Como a redução das flutuações de temperatura ao longo da operação do equipamento, a diminuição no trabalho e no número de ciclos realizados pelo compressor, o menor consumo de energia, a maior capacidade frigorífica e, consequentemente, incrementos nos valores de COP.

4.1. Redução das flutuações de temperatura

O modo constante de ligar e desligar o compressor causa flutuação de temperatura, o que leva à deterioração da qualidade dos alimentos dentro do gabinete do evaporador (Afroz, 2014). Sendo o principal intuito do uso de materiais de mudança de fase (PCMs) em sistemas de refrigeração a redução da flutuação de temperatura e o aprimoramento do desempenho. Desta forma, diferentes abordagens foram usadas para melhorar o desempenho térmico desses sistemas pela integração do PCM, sendo que vários estudos se concentraram na aplicação de PCM no evaporador para o armazenamento de frio (Joybari et al., 2015b). Devido à alta inércia térmica do PCM, a temperatura e a pressão do fluido refrigerante permanecem mais estáveis, provendo ao fluido refrigerante uma taxa de fluxo de massa mais alta (Joybari et al., 2015a). Logo, a aplicação do PCM no evaporador minimiza a flutuação da temperatura do compartimento e fornece condições estáveis mesmo em situações de carga térmica variável (Bista et al., 2018). Como exemplo, resultados experimentais mostram que as flutuações de temperatura no compartimento de alimentos frescos de refrigeradores domésticos durante o ciclo de resfriamento podem diminuir de 4 °C para 0,5 °C com a aplicação de PCM tanto no evaporador quanto no condensador (Sonnenrein et al., 2015a).

4.2. Trabalho do compressor

Nos refrigeradores domésticos, assim como em resfriadores de líquido, o compressor funciona no modo intermitente. Quando o compressor funciona, o refrigerante no evaporador começa a absorver o calor presente no gabinete (ou no líquido a ser resfriado). No entanto, no período em que o compressor se encontra desligado a temperatura dentro do gabinete do evaporador aumenta devido ao calor liberado pelos alimentos, além das condições ambientais externas. De forma que, o compressor precisa trabalhar para liberar o calor externamente através do condensador, como em um ciclo de compressão de vapor convencional. Com a adição do PCM em contato com o evaporador no gabinete de um refrigerador, ou no tanque de um resfriador de líquido, esse aumento de temperatura pode ser aliviado permitindo menor tempo de trabalho do compressor (Riffat and Ma, 2004). O período de trabalho do compressor deve ser prolongado por mais tempo no intuito de carregar o armazenamento de energia no sistema de refrigeração com PCM. No entanto, o tempo de execução geral reduz devido ao maior tempo de desligamento do compressor. Assim, há um decréscimo no consumo geral de eletricidade, além de ser atenuado o impacto destrutivo da partida e parada frequente do compressor, refletindo, até mesmo, na qualidade dos alimentos, visto que haverá menor variação de temperatura (Bista et al., 2018).

4.3. Número de ciclos “liga/desliga” do compressor

Enquanto os estudos a respeito da aplicação de PCM em sistemas de refrigeração ainda estavam no início, algumas pesquisas já indicavam a utilização desses materiais como uma opção para a redução do número de ciclos “liga/desliga” do compressor (Wang et al., 2007; Tulapurkar et al., 2010). A diminuição do número de ciclos do compressor diminui a flutuação de temperatura no interior do gabinete, ou tanque de armazenamento, e mantém uma temperatura quase estável, resultando em melhor qualidade dos alimentos (Veerakumar e Sreekumar, 2016; Gin et al., 2010).

Através de uma avaliação experimental a respeito dos efeitos do PCM em um refrigerador doméstico, Khan e Afroz (2015) observaram redução de 3 a 5 vezes no número de ciclos “liga/desliga” do compressor, o que de acordo com os autores representa uma redução nas perdas do sistema devido aos ciclos entre 9 e 11 %, além de aumentar a vida útil do compressor em comparação com um sistema de refrigeração convencional. Ademais, o compressor ficou ligado de 5 a 30 % menos tempo comparado ao sistema sem PCM. Na montagem do sistema de refrigeração com PCM, os cinco lados da cabine do evaporador possuíram camadas do material e a serpentina do evaporador foi imersa no PCM. Por fim, foi provado que houve menos flutuações de temperatura dentro da cabine de resfriamento quando o sistema operou com PCM. Quando as bobinas são imersas no PCM, a taxa de transferência de calor é maior devido à natureza mais rápida dos processos de convecção e condução nos PCMs, em comparação com a convecção natural do ar (Joybari et al., 2015a).

O calor é absorvido pelo PCM enquanto o material altera da fase sólida para a líquida, fenômeno chamado de entalpia de fusão. Desta forma, a temperatura no compartimento permanece constante enquanto o PCM derrete. Portanto, até que o PCM mude de fase completamente durante o processo de fusão, a temperatura no gabinete é mantida. Esse período gasto faz com que o ciclo de desligamento do compressor se prolongue, reduzindo o gasto de energia (Khan, 2016).

Ezan et al. (2017) realizaram um estudo numérico a respeito do uso de PCM em um resfriador de bebidas vertical. Foi utilizado água como PCM sendo que sua espessura foi variada entre 2 e 10 mm. Observaram que o PCM começa a congelar próximo à parede lateral, visto que é na superfície do evaporador perto da borda traseira que o fluxo de ar se separa, atingindo as temperaturas mais baixas da cabine de resfriamento. Os autores concluíram, através da análise analítica o PCM aprimora o desempenho do sistema, prolongando a duração do desligamento do compressor, além de preservar a temperatura do ar dentro do espaço refrigerado na faixa desejada, limitando os incrementos repentinos de temperatura durante o tempo de inatividade do compressor.

Em uma análise teórica e experimental de desempenho de um refrigerador doméstico com capacidade de 45 litros, foi realizado a aplicação de etileno glicol como PCM, aplicado em um evaporador desenvolvido para o sistema com material de mudança de fase, além da substituição do fluido refrigerante, passando do HFC R-134a para o hidrocarboneto R-290, com redução de até 40 % de carga no mesmo sistema de refrigeração com as mesmas condições de operação. O consumo de energia do compressor reduziu em 3 % com o R-290 a 28 °C na condensação, além disso, o COP dos sistemas de refrigeração com ambos os fluidos foi semelhante, sendo que o torque inicial do compressor reduziu com o R-290, o que é benéfico à vida útil do compressor. Com relação ao efeito do PCM, sem a adição de carga térmica e sem que o compressor ligasse, o material de mudança de fase manteve a temperatura da cabine abaixo de 10 °C por 8 horas e abaixo de 15 °C por 14 horas. Ademais, o PCM forneceu temperatura uniforme para a cabine durante todo o ciclo e o tempo médio de funcionamento do compressor por ciclo foi reduzido na faixa de 17–20 % em comparação com o sistema sem o auxílio do PCM (Niyaj and Sapali, 2017).

Analisado a influência que o PCM pode ter no funcionamento do compressor, alterando o número de ciclos e a duração dos mesmos. O PCM deve ser quimicamente e termicamente estável durante um grande número de ciclos de congelamento e de derretimento para ser aplicável ao armazenamento de energia térmica em sistemas de refrigeração intermitentes (Bista et al., 2018).

4.4. Consumo de energia

Como resultado da alteração no número de ciclos operados pelo compressor durante a operação do sistema de refrigeração o PCM tem influência direta no consumo de energia. Desta maneira, Cheng et al. (2011) observaram 12 % de redução no consumo de energia em uma operação de 24 horas de um refrigerador doméstico ao aplicarem um PCM no

condensador. O mesmo valor de decremento no consumo energético foi calculado pelos mesmos autores ao realizarem uma análise numérica, na qual também foi atingido 19 % de incremento no COP do sistema com PCM (Cheng e Yuan, 2013). Outra publicação também apresentou aprimoramento na eficiência energética de um refrigerador doméstico ao ser realizado uma análise numérica com PCM no condensador, os resultados indicaram que o novo refrigerador poderia economizar de 20 a 26 % de energia comparado ao refrigerador convencional (Yuan e Cheng, 2014).

No intuito de minimizar o consumo de energia de um refrigerador doméstico, (Visek et al., 2014) aplicaram diversas técnicas, dentre elas, a utilização do PCM em contato direto com o evaporador proporcionou 5,6 % de economia de energia no aparelho. (Yusufoglu et al., 2015) testaram, em dois modelos diferentes de refrigeradores domésticos, quatro PCMs diferentes. Dentre eles analisaram a atuação da água pura, com PCT de 0 °C, e de outras três misturas com PCTs de -2,5, -3,6 e -4,4 °C. De modo que, no modelo em que o condensador foi desenvolvido com menor área superficial, apenas os dois materiais com menores temperaturas de mudança de fase possibilitaram redução no consumo de energia, sendo o máximo decremento de 5 % para o menor PCT. Desta forma, o material que possibilitou a maior economia de energia foi aplicado no sistema projetado com área superficial 20 % maior no condensador, o que resultou em 9,4 % menos consumo de energia comparado ao mesmo refrigerador sem material de mudança de fase.

Sonnenrein et al. (2015b) estudaram refrigeradores domésticos que integram PCMs em condensadores de arame sobre tubo, e os resultados indicaram que a aplicação do PCM reduz a temperatura do condensador, o que resulta em uma redução significativa do consumo de energia. No caso do estudo realizado pelos autores, os compostos de copolímeros que compuseram o PCM possibilitaram cerca de 10 % de economia de energia ao sistema.

O efeito de economia de energia dos PCMs integrados no evaporador foi investigado por Yusufoglu et al. (2015), ao testar três materiais distintos com pontos de fusão de -2,5 °C, 3,6 °C e 4,4 °C, respectivamente, em dois tipos de refrigeradores convencionais. Os melhores resultados de redução no consumo de energia com relação ao sistema sem PCM foram 8,8 % e 9,4 %. Além disso, os autores observaram que ao aumentar a área de transferência de calor do evaporador em 20 % se elevaria o desempenho dos refrigeradores.

No estudo experimental realizado por Alzuwaid et al. (2015) em um armário de exibição para alimentos refrigerados, equipado com trocadores de calor com PCMs instalados no espaço disponível do duto traseiro principal logo após as serpentinas do evaporador. O PCM utilizado foi composto por água deionizada, 1,2 % de iodeto de prata, 0,9 % de guar (espessante natural) e 0,15 % de tetraborato de sódio, no intuito de aproveitar o alto calor latente da água, porém reduzindo sua temperatura de fusão para aproximadamente -2 °C. Os resultados do teste indicaram que a resposta do gabinete com PCM foi positiva, minimizando o consumo de energia, as temperaturas do produto e do ar interior do gabinete e aumentando o período de degelo. Além disso, verificou-se que, com o PCM, o sistema economizou cerca de 5 % de energia nas condições climáticas ambientes de 25 °C e 60 % de umidade relativa. Portanto, o uso de PCM em refrigeradores foi considerado uma medida viável para aumentar a eficiência e reduzir o consumo de energia desses sistemas de refrigeração (Bista et al., 2018).

Zarajabad e Ahmadi (2018) obtiveram redução de aproximadamente 17,4 % no consumo diário de energia através do compressor de um refrigerador doméstico ao empregarem água como PCM em um sistema de armazenamento de energia térmica em condição de resfriamento composto por aletas para incrementar a troca de calor. De forma que, a melhor construção do sistema aletado foi com três aletas, conseguindo manter a cabine interna do refrigerador entre a faixa de temperatura padrão estabelecida (0,9-6,4 °C) durante 68 minutos com o compressor desligado, sendo que o mesmo sistema sem aleta foi capaz de assegurar a temperatura na mesma faixa durante apenas 30 minutos.

O PCM também desempenha papel importante no caso de queda de energia, em que o sistema de refrigeração como compressão de vapor não funcionará, pois o material através de sua inércia térmica é capaz de manter as temperaturas internas dos alimentos e dos compartimentos por muito mais tempo (Gin and Farid, 2010). No estudo experimental já citado, realizado por Oró et al. (2012) também foram feitos testes de queda de energia, nos quais foi observado que com o uso do PCM os produtos congelados permaneceram por muito mais tempo em níveis aceitáveis, sendo que a temperatura do freezer foi de 4 a 6 °C inferior comparado ao sistema original, se mantendo entre -12 e -14 °C durante mais de 3 horas sem energia.

4.5. Desempenho

Assim como benefícios na redução do consumo de energia, foram publicados incrementos no COP e capacidade de refrigeração dos sistemas de refrigeração com a aplicação de PCM. Em uma análise numérica a respeito da aplicação de PCM em um sistema de compressão de vapor com regulagem liga/desliga, no caso um refrigerador doméstico, foram alcançados incrementos de 74 % e 87 % no COP e na capacidade frigorífica, respectivamente. Além disso, o armazenamento térmico do PCM possibilitou, analiticamente, 10 horas ou mais de operação contínua do sistema sem alimentação elétrica (Azzouz et al., 2005).

O efeito da adição de uma camada de material de mudança de fase (PCM) na face externa em um evaporador de um refrigerador doméstico também foi estudado de forma analítica por Azzouz et al. (2008). Os resultados da simulação do sistema com PCM mostraram que a adição de inércia térmica melhorou a transferência de calor global do evaporador e permitiu uma temperatura de evaporação mais alta aumentando a eficiência energética do sistema. O modelo matemático com a adição do PCM previu aumento de 5 a 15 % no COP, variando com a temperatura externa, número vezes em que a porta do refrigerador foi aberta e temperatura de mudança de fase do material. Além disso, uma diminuição significativa no número de partidas e paradas do compressor e, conseqüentemente, das flutuações de temperatura dentro da célula refrigerada foi observado, sendo que os períodos nos quais o compressor esteve ligado e desligado duraram cerca de 3 e

7 vezes mais, respectivamente, comparados ao sistema original. Os mesmos autores confirmaram esses resultados com testes experimentais utilizando como PCM água e uma mistura eutética com temperatura de fusão de $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$, localizados na parte traseira do evaporador. As vantagens que a água apresenta são um elevado calor latente, uma boa estabilidade e propriedades termo físicas facilmente conhecidas. Por outro lado, a vantagem da solução aquosa eutética sobre a água é sua capacidade de manter uma temperatura mais baixa no compartimento refrigerador durante o processo de fusão. O armazenamento de capacidade frigorífica foi maior com a água do que com a mistura eutética, porém a solução eutética foi capaz de manter com mais precisão o ar na célula refrigerada nos valores de temperatura adequados recomendados para o refrigerador. De maneira geral, o sistema com PCM apresentou aumento aproximado de $3\text{ }^{\circ}\text{C}$ na temperatura de evaporação, como já esperado pela análise matemática, acarretando um maior fluxo de massa extraído do evaporador, fixada a taxa volumétrica do compressor. Ademais, houve incremento na capacidade de refrigeração devido ao fato da densidade do vapor de fluido refrigerante que entra no compressor ser maior nos testes com PCM. Logo, o COP do refrigerador atingiu resultados de 10 % a 30 % superiores. (Azzouz et al., 2009).

Outro estudo experimental que se preocupou em avaliar e comparar os COPs dos sistemas de refrigeração sem e com PCM foi realizado por Rahman et al. (2013) a partir de testes efetuados no evaporador de um refrigerador doméstico. Assim, ao utilizarem água como PCM foi possível atingir incrementos de 54 a 78 % no COP do sistema. Além disso, a partir de uma análise numérica foi observado melhor qualidade dos alimentos devido a ciclos mais baixos de histerese no funcionamento intermitente do refrigerador. Um novo design do trocador de calor PCM também foi proposto por Elarem et al. (2017) em um refrigerador doméstico. Os resultados experimentais indicaram que o consumo de energia foi reduzido em 12 % e o COP aumentado em 8 % em comparação ao refrigerador sem PCM.

Ao simularem a utilização de PCMs no armazenamento de energia térmica no condensador, no evaporador e em ambos simultaneamente para um refrigerador doméstico, Cheng et al. (2017) obtiveram 12, 16 e 32 % de redução no consumo de energia, respectivamente, para os sistemas equipados com PCM no condensador, no evaporador e em ambos mutuamente, assim como incrementos no COP de 19 % para o sistema de armazenamento de energia somente no condensador, 25 % quando o PCM foi aplicado apenas no evaporador e 39 % quando em ambos os trocadores de calor foi adicionado PCMs. O material utilizado no evaporador foi o undecano com PCT de $-26\text{ }^{\circ}\text{C}$, enquanto no condensador foi aplicado uma parafina com temperatura de fusão de $50\text{ }^{\circ}\text{C}$. Em uma análise numérica do ciclo de refrigeração de um refrigerador doméstico, no qual foi considerado o efeito de um PCM com temperatura de mudança de fase em $27,5\text{ }^{\circ}\text{C}$, entre o condensador e a válvula de expansão, foi observado uma melhoria no procedimento de convecção que resultou em um aumento de quase 10 % no COP do sistema simulado. Isso porque a aplicação do PCM permitiu reduzir o sub resfriamento e fazer com que o fluido refrigerante entrasse no evaporador com menor título e pudesse aprimorar a capacidade de refrigeração com esse aumento do calor latente. Além disso, foi inferido que o aumento da vazão mássica de fluido refrigerante aumenta a temperatura de saída do mesmo devido a uma maior taxa de transferência de calor do refrigerante para o PCM (Bakhshipour et al., 2017).

Uma das publicações mais recentes a respeito do desenvolvimento de um sistema de refrigeração com aplicação de PCM, Yan et al. (2019) analisaram de maneira teórica a influência do material de mudança de fase no incremento do sub resfriamento do fluido refrigerante líquido. Os resultados apresentaram melhora tanto no COP (3,3–10,5 %) quanto na capacidade de refrigeração volumétrica (5,5–25,4 %) do sistema com PCM no condensador comparado ao ciclo teórico convencional de compressão de vapor. Isso devido ao maior sub resfriamento e ao menor tempo em que o compressor precisou atuar através da simulação numérica realizada.

Em um dos últimos estudos encontrados a respeito da aplicação de PCM em um sistema de RAC, Korth et al. (2020) analisou experimentalmente a adição de pó de grafite a um PCM composto por parafina aplicado em um sistema de ar condicionado, no intuito de sub resfriar o fluido refrigerante na saída do condensador, resultando em incremento na capacidade de refrigeração ou redução no consumo de energia do compressor. A temperatura de mudança de fase de do material adicionado ao condensador foi de $18\text{ }^{\circ}\text{C}$, de forma que foi observado acréscimo de 18 % na capacidade de refrigeração para a condição de $35\text{ }^{\circ}\text{C}$ de temperatura de condensação. Além disso, a análise do coeficiente universal de transferência de calor do PCM possibilitou inferir que a adição de um quinto, em massa, de pó de grafite resultou em uma condutividade térmica 10 vezes superior comparado ao PCM puro.

Para finalizar a revisão bibliográfica a respeito dos PCMs, a Tabela 2 sintetiza, a partir dos dados encontrados na literatura, os resultados comparativos nos sistemas de refrigeração atuando com e sem PCM. São apresentados como parâmetros de comparação os valores do COP, capacidade de refrigeração, redução do consumo de energia, redução do tempo de funcionamento do compressor, assim como os componentes do sistema nos quais foram aplicados os PCMs, se foi realizado um estudo experimental ou analítico e o tipo do PCM utilizado, ou seja, a composição do material.

A partir do conjunto de dados apresentados, pode-se observar que a aplicação dos materiais de mudança de fase em sistemas de refrigeração e ar condicionado ocasionam, no geral, em um incremento de 10 a 20 % no COP do equipamento. No entanto, foi registrado experimentalmente aumento de 78 % no COP de um refrigerador doméstico ao se aplicar água como PCM no evaporador do equipamento (Rahman et al., 2013). Esse aumento no COP ocorre devido a um aumento na capacidade de refrigeração, porém, principalmente por causa da redução no consumo de energia, realizada através da diminuição do tempo de funcionamento do compressor ao se aplicar o PCM, assim como foi obtido analiticamente por Tulapurkar et al. (2010) ao simular um evaporador carregado com material eutético de mudança de fase. O autor relatou 18 % de incremento no COP a partir de uma redução de 10 % no consumo de energia relacionado a um tempo de operação do compressor 8 % inferior à quando a simulação foi realizada sem considerar a aplicação do PCM. Yusufoglu et al. (2015) obtiveram resultados semelhantes em um estudo experimental, obtendo aumento de 17 % no COP a partir de uma redução de cerca de 10 % no consumo de energia, devido ao decréscimo de 5 % no tempo de operação do compressor.

Tabela 2. Desempenho dos sistemas de refrigeração com aplicação de PCM encontrados na literatura.

| Autor | Componente | COP (%) | Cap. _{resf} (%) | Red. cons. energia (%) | Red. tempo de func. do comp. (%) | Tipo do PCM |
|------------------------------|---|----------|--------------------------|------------------------|----------------------------------|-------------|
| (Cerri et al., 2003) | Evaporador (analítico) | 3–18 | - | - | - | E |
| (Azzouz et al., 2005) | Evaporador (analítico) | 74 | 87 | - | - | E |
| (Wang et al., 2007) | Evaporador (analítico) | 6–8 | - | - | - | E |
| (Azzouz et al., 2008) | Evaporador (analítico) | 5–15 | - | - | 25 | A e E |
| (Azzouz et al., 2009) | Evaporador (experimental) | 10–30 | - | - | - | E |
| (Gin and Farid, 2010) | Evaporador (experimental) | - | - | 7–8 | - | E |
| (Tulapurkar et al., 2010) | Evaporador (analítico) | 18 | 2 | 10 | 8 | E |
| (Cheng et al., 2011) | Condensador (experimental) | - | - | 12 | - | P |
| (Cheng and Yuan, 2013) | Condensador (analítico) | 19 | - | 12 | - | E |
| (Rahman et al., 2013) | Evaporador (experimental) | 54–78 | - | - | - | A |
| (Yuan and Cheng, 2014) | Condensador (analítico) | - | - | 20–26 | - | E |
| (Visek et al., 2014) | Evaporador (experimental) | - | 5,9 | 5,6 | - | A |
| (Khan and Afroz, 2015) | Evaporador (experimental) | - | - | - | 5–30 | A e E |
| (Sonnenrein et al., 2015a) | Evaporador e condensador (experimental) | - | - | 17 | 9 | P |
| (Yusufoglu et al., 2015) | Evaporador (experimental) | 17 | - | 9,4 | 5 | E |
| (Alzuwaid et al., 2015) | Evaporador (experimental) | - | - | 5 | 5 | E |
| (Alzuwaid et al., 2016) | Evaporador (analítico) | - | - | 6 | - | E |
| (Elarem et al., 2017) | Evaporador (experimental) | 8 | - | 12 | - | E |
| (Cheng et al., 2017) | Evaporador e condensador (analítico) | 39 | - | 32 | - | P |
| (Zarajabad and Ahmadi, 2018) | Evaporador (experimental) | - | - | 17,4 | - | A |
| (Yan et al., 2019) | Condensador (analítico) | 3,3–10,5 | 5,5–25,4 | - | 5–20 | A |
| (Korth et al., 2020) | Condensador (experimental) | - | 18 | - | - | P + G |

Legenda: A: água; Cap.: capacidade; Comp.: compressor; Cons.: consumo; E: mistura eutética; Func.: funcionamento; G: grafite; P: parafina; Red.: redução.

Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos resultados encontrados na literatura.

5. CONCLUSÕES

O aprimoramento da eficiência dos sistemas de refrigeração e ar condicionado tem influência significativa na redução da taxa de consumo elétrico. Desse modo, foram analisadas as principais perdas de energia térmica existentes nesses sistemas. As principais perdas relacionadas ao número de ciclos “liga/desliga” em um sistema de refrigeração intermitente são devido aos deslocamentos do fluido refrigerante devido as partidas e paradas do compressor. Desta forma, foi analisado a utilização de PCMs no intuito de reduzir a quantidade de ciclos e melhorar a eficiência desses equipamentos.

A partir da revisão da aplicação de materiais de mudança de fase em sistemas de refrigeração e ar condicionado, provou-se a eficiência desses materiais na redução do consumo de energia dos equipamentos, assim como no aumento do COP e da capacidade de refrigeração. A maior parte dos estudos analisaram a aplicação do PCM no evaporador, resultando no incremento da transferência de calor global do evaporador e garantindo maior temperatura de evaporação comparado aos sistemas sem a adição de PCM. O que resultou, na maioria dos casos, uma eficiência energética mais elevada. No entanto, também há casos em que o PCM pode ser aplicado no condensador, reduzindo o sub resfriamento e permitindo que o fluido refrigerante entre no evaporador mais próximo da condição de líquido saturado, o que garante o aumento do calor latente no processo de evaporação.

Assim, a aplicação dos PCMs em sistemas que atuam de maneira intermitente, como em refrigeradores domésticos, pode ser uma ótima alternativa para fazer com que os compressores atuem por menos tempo e para que sejam projetados equipamentos mais eficientes energeticamente e que sejam mais ambientalmente amigáveis. Além disso, a utilização de PCMs em sistemas que conservam produtos congelados permite que eles permaneçam em níveis aceitáveis para consumo por mais tempo comparado aos sistemas sem esses materiais.

Agradecimentos.

Os autores agradecem a CAPES, CNPq e FAPEMIG pelo suporte.

6. REFERÊNCIAS

- Afroz, H.M.M., 2014. Diminution of temperature fluctuation inside the cabin of a household 3, 43–52.
- AlMaadeed, M.A., Labidi, S., Krupa, I., Karkri, M., 2015. Effect of expanded graphite on the phase change materials of high density polyethylene/wax blends. *Thermochim. Acta* 600, 35–44.
- Alzuwaid, F., Ge, Y.T., Tassou, S.A., Raeisi, A., Gowreesunker, L., 2015. The novel use of phase change materials in a refrigerated display cabinet: An experimental investigation. *Appl. Therm. Eng.* 75, 770–778.
- Alzuwaid, F.A., Ge, Y.T., Tassou, S.A., Sun, J., 2016. The novel use of phase change materials in an open type refrigerated display cabinet: A theoretical investigation. *Appl. Energy* 180, 76–85.
- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2009. Enhancing the performance of household refrigerators with latent heat storage: An experimental investigation. *Int. J. Refrig.* 32, 1634–1644.
- Azzouz, K., Leducq, D., Gobin, D., 2008. Performance enhancement of a household refrigerator by addition of latent heat storage. *Int. J. Refrig.* 31, 892–901.
- Azzouz, K., Leducq, D., Guilpart, J., Gobin, D., 2005. Improving the energy efficiency of a vapor compression system using a phase change material.
- Bakshpour, S., Valipour, M.S., Pahamli, Y., 2017. Parametric analysis of domestic refrigerators using PCM heat exchanger. *Int. J. Refrig.* 83, 1–13.
- Bista, S., Hosseini, S.E., Owens, E., Phillips, G., 2018. Performance improvement and energy consumption reduction in refrigeration systems using phase change material (PCM). *Appl. Therm. Eng.* 142, 723–735.
- Björk, E., Palm, B., 2006. Refrigerant mass charge distribution in a domestic refrigerator, Part I: Transient conditions. *Appl. Therm. Eng.* 26, 829–837.
- Buzelin, L.O.S., Amico, S.C., Vargas, J.V.C., Parise, J.A.R., 2005. Experimental development of an intelligent refrigeration system. *Int. J. Refrig.* 28, 165–175. <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2004.08.013>
- Cabeza, L.F., Castell, A., Barreneche, C., De Gracia, A., Fernández, A.I., 2011. Materials used as PCM in thermal energy storage in buildings: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 15, 1675–1695.
- Cabeza, L.F., Mehling, H., Hieber, S., Ziegler, F., 2002. Heat transfer enhancement in water when used as PCM in thermal energy storage. *Appl. Therm. Eng.* 22, 1141–1151.
- Cerri, G., Palmieri, A., Monticelli, E., Pezzoli, D., 2003. Identification of domestic refrigerator models including cool storage, in: *International Congress of Refrigeration*. Washington, DC.
- Cheng, W. long, Ding, M., Yuan, X. dong, Han, B.C., 2017. Analysis of energy saving performance for household refrigerator with thermal storage of condenser and evaporator. *Energy Convers. Manag.* 132, 180–188.
- Cheng, W.L., Mei, B.J., Liu, Y.N., Huang, Y.H., Yuan, X.D., 2011. A novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (Phase Change Material) heat storage condensers: An experimental investigation. *Energy* 36, 5797–5804.
- Cheng, W.L., Yuan, X.D., 2013. Numerical analysis of a novel household refrigerator with shape-stabilized PCM (phase change material) heat storage condensers. *Energy* 59, 265–276.
- Coulter, W.H., Bullard, C.W., 1997. Experimental analysis of cycling losses in domestic refrigerator-freezers. *ASHRAE Trans.* 103, 587–596.
- Du, K., Calautit, J., Wang, Z., Wu, Y., Liu, H., 2018. A review of the applications of phase change materials in cooling, heating and power generation in different temperature ranges. *Appl. Energy* 220, 242–273.
- Elarem, R., Mellouli, S., Abhilash, E., Jemni, A., 2017. Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat exchanger. *Appl. Therm. Eng.* 125, 1320–1333.
- Ezan, M.A., Ozcan Doganay, E., Yavuz, F.E., Tavman, I.H., 2017. A numerical study on the usage of phase change material (PCM) to prolong compressor off period in a beverage cooler. *Energy Convers. Manag.* 142, 95–106.
- Farid, M.M., Khudhair, A.M., Razack, S.A.K., Al-Hallaj, S., 2004. A review on phase change energy storage: Materials and applications. *Energy Convers. Manag.* 45, 1597–1615.

- Gin, B., Farid, M.M., 2010. The use of PCM panels to improve storage condition of frozen food. *J. Food Eng.* 100, 372–376.
- Gin, B., Farid, M.M., Bansal, P.K., 2010. Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels. *Energy Convers. Manag.* 51, 2698–2706.
- Guo, C.X., Ma, X.L., Yang, L., 2015. PCM/ graphite foam composite for thermal energy storage device. *IOP Conf. Ser. Mater. Sci. Eng.* 87.
- Jakobsen, A., 1995. *Energy Optimisation of Refrigeration Systems. The Domestic Refrigerator - a Case Study.*
- Janssen, M.J.P., Wit, J.A. De, Kuijpers, L.J.M., 1992. Cycling losses in domestic appliances: an experimental and theoretical analysis.
- Joybari, M.M., Haghghat, F., Moffat, J., Sra, P., 2015a. Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems: The state-of-the-art review. *Energy Build.* 106, 111–124.
- Joybari, M.M., Haghghat, F., Moffat, J., Sra, P., 2015b. Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems: The state-of-the-art review, *Energy and Buildings.* Elsevier B.V.
- Kenisarin, M.M., 2010. High-temperature phase change materials for thermal energy storage. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 14, 955–970.
- Khan, I.H., Afroz, H.M.M., 2015. Effect of phase change material on compressor on-off cycling of a household refrigerator. *Sci. Technol. Built Environ.* 21, 462–468.
- Khan, M.I.H., 2016. Conventional Refrigeration Systems Using Phase Change Material: A Review. *Int. J. Air-Conditioning Refrig.* 24, 1–16.
- Korth, T., Loistl, F., Storch, A., Schex, R., Krönauer, A., Schweigler, C., 2020. Capacity enhancement of air conditioning systems by direct integration of a latent heat storage unit. *Appl. Therm. Eng.* 167, 114727.
- Lazzarin, R.M., Mancin, S., Noro, M., Righetti, G., 2018. Hybrid PCM-aluminium foams' thermal storages: An experimental study. *Int. J. Low-Carbon Technol.* 13, 286–291.
- Mađerić, D., Pavković, B., Lenić, K., 2019. An experimental research on energy efficiency of a beverage cooler with the latent heat storage. *Appl. Therm. Eng.* 148, 270–277.
- Mahdi, J.M., Nsofor, E.C., 2017a. Solidification enhancement in a triplex-tube latent heat energy storage system using nanoparticles-metal foam combination. *Energy* 126, 501–512.
- Mahdi, J.M., Nsofor, E.C., 2017b. Melting enhancement in triplex-tube latent thermal energy storage system using nanoparticles-fins combination. *Int. J. Heat Mass Transf.* 109, 417–427.
- Niyaj, D.S., Sapali, S.N., 2017. Performance Evaluation of a Domestic Refrigerator with a Thermal Storage Arrangement Using Propane as a Refrigerant. *Energy Procedia* 109, 34–39.
- Oró, E., de Gracia, A., Castell, A., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012a. Review on phase change materials (PCMs) for cold thermal energy storage applications. *Appl. Energy* 99, 513–533.
- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Cabeza, L.F., 2012b. Improving thermal performance of freezers using phase change materials. *Int. J. Refrig.* 35, 984–991.
- Oró, E., Miró, L., Farid, M.M., Martin, V., Cabeza, L.F., 2014. Energy management and CO₂ mitigation using phase change materials (PCM) for thermal energy storage (TES) in cold storage and transport. *Int. J. Refrig.* 42, 26–35.
- Oyedepo, S., Fagbenle, R., Babarinde, T., Odunfa, K., Oyegbile, A., Leramo, R., Babalola, P., Kilanko, O., Adekeye, T., 2016. Effect of Capillary Tube Length and Refrigerant Charge on the Performance of Domestic Refrigerator with R12 and R600a. *Int. J. Adv. Thermofluid Res.* 2, 2–14.
- Rahman, R., Hossain, M.A., Das, S., Hasan, A., 2013. Performance Improvement of a Domestic Refrigerator Using Phase change Material (PCM). *IOSR J. Mech. Civ. Eng.* 10, 08–16.
- Regin, A.F., Solanki, S.C., Saini, J.S., 2008. Heat transfer characteristics of thermal energy storage system using PCM capsules: A review. *Renew. Sustain. Energy Rev.* 12, 2438–2458.
- Riffat, S.B., Ma, X., 2004. Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: A review. *Int. J. Energy Res.* 28, 753–768.
- Saito, A., 2002. Recent advances in research on cold thermal energy storage. *Int. J. Refrig.* 25, 177–189.
- Sonnenrein, G., Baumhögger, E., Elsner, A., Fieback, K., Morbach, A., Paul, A., Vrabec, J., 2015a. Copolymer-bound phase change materials for household refrigerating appliances: experimental investigation of power consumption, temperature distribution and demand side management potential. *Int. J. Refrig.* 60, 166–173.
- Sonnenrein, G., Elsner, A., Baumhögger, E., Morbach, A., Fieback, K., Vrabec, J., 2015b. Reducing the power consumption of household refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire-and-tube condensers. *Int. J. Refrig.* 51, 154–160.
- Tiari, S., Qiu, S., Mahdavi, M., 2016. Discharging process of a finned heat pipe-assisted thermal energy storage system with high temperature phase change material. *Energy Convers. Manag.* 118, 426–437.
- Tulapurkar, C., Subramaniam, P.R., Thagamani, G., Thiyagaranjin, R., 2010. Phase change materials For domestic refrigerators to improve food quality and prolong compressor off time. *Int. Refrig. Air Cond. Conf. Paper* 1044.
- Vadhera, J., Sura, A., Nandan, G., Dwivedi, G., 2018. Study of Phase Change materials and its domestic application. *Mater. Today Proc.* 5, 3411–3417.
- Veerakumar, C., Sreekumar, A., 2016. Phase change material based cold thermal energy storage: Materials, techniques and applications - A review. *Int. J. Refrig.* 67, 271–289.
- Visek, M., Joppolo, C.M., Molinaroli, L., Olivani, A., 2014. Advanced sequential dual evaporator domestic refrigerator/freezer: System energy optimization. *Int. J. Refrig.* 43, 71–79.

- Wang, F., Maidment, G., Missenden, J., Tozer, R., 2007. The novel use of phase change materials in refrigeration plant. Part 3: PCM for control and energy savings. *Appl. Therm. Eng.* 27, 2911–2918.
- Yan, G., Liu, Y., Qian, S., Yu, J., 2019. Theoretical study on a vapor compression refrigeration system with cold storage for freezer applications. *Appl. Therm. Eng.* 160, 114091.
- Yuan, X.D., Cheng, W.L., 2014. Multi-objective optimization of household refrigerator with novel heat-storage condensers by Genetic algorithm. *Energy Convers. Manag.* 84, 550–561.
- Yusufoglu, Y., Apaydin, T., Yilmaz, S., Paksoy, H.O., 2015. Improving performance of household refrigerators by incorporating phase change materials. *Int. J. Refrig.* 57, 173–185.
- Zarajabad, O.G., Ahmadi, R., 2018. Employment of finned PCM container in a household refrigerator as a cold thermal energy storage system. *Therm. Sci. Eng. Prog.* 7, 115–124.
- Zhang, Y., Faghri, A., 1996. Heat transfer enhancement in latent heat thermal energy storage system by using the internally finned tube. *Int. J. Heat Mass Transf.* 39, 3165–3173.
- Zhang, Z., Fang, X., 2006. Study on paraffin/expanded graphite composite phase change thermal energy storage material. *Energy Convers. Manag.* 47, 303–310.

APPLICATION OF PHASE CHANGE MATERIALS IN REFRIGERATION AND AIR CONDITIONING SYSTEMS: STATE OF THE ART

Abstract. *The present work is an analysis of the studies directed to the application of phase change materials in refrigeration and air conditioning systems. The review deals about the main losses in refrigeration systems that operate intermittently. In addition to the main characteristics of phase change materials, such as thickness, phase change temperature and composition, emphasizing the aspects necessary for use in refrigeration and air conditioning systems. Finally, there are presented the studies that obtained a reduction in temperature fluctuations, at work, in the number of cycles and in energy consumption by the compressor, in addition to the analysis of the performance of systems that operated with the aid of phase change materials. Therefore, the application of PCMs in systems that operate intermittently can be a great alternative to make the compressors work for less time and to design more energy efficient equipment that is more environmentally friendly.*

Keywords: *Phase change material, PCM, Losses, Consumption*