

**NANOLUBRIFICANTES DE GRAFENO/POE: UMA ANÁLISE DE ESTABILIDADE E PROPRIEDADES
TERMOFÍSICAS PARA APLICAÇÃO EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO**

Izaaque Aniceto Macedo – izaaque@ufu.br

David Fernando Marcucci Pico – dmarcucci@ufu.br

Enio Pedone Bandarra Filho – bandarra@ufu.br

Universidade Federal de Uberlândia, Laboratório de energia, sistemas térmicos e nanotecnologia

3.1 – F1 Princípios – Termodinâmica, Mecânica dos Fluidos e Transferência de Calor

Resumo. *Os sistemas de refrigeração têm grande importância na sociedade, tendo um aumento significativo com passar dos anos, isto por causa dos eventos climáticos, adequação a normas internacionais e impacto direto no consumo de energia elétrica. Na busca de novas tecnologias para otimização dos sistemas de refrigeração são realizadas pesquisas com aplicação de nanolubrificantes em compressores. As pesquisas apresentam a estabilidade como um fator fundamental para a aplicação, devido ao elevado potencial de influenciar as melhorias nas propriedades termofísicas e assim como nas propriedades tribológicas. Os nanolubrificantes podem gerar no sistema de refrigeração incrementos no coeficiente de desempenho, capacidade de refrigeração, e decrementos na potência consumida, na pressão de sucção, entre outros. Esse trabalho foi desenvolvido para analisar, de forma experimental, a estabilidade, viscosidade e massa específica em três tipos de nanolubrificantes com nanopartículas de grafeno funcionalizadas de formas diferentes e sendo utilizado como fluido base o óleo poliéster (POE). Os nanolubrificantes foram classificados como Tipo 1, Tipo 2 e Tipo 3 aplicando concentrações em massa de 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1%. A estabilidade foi avaliada durante 20 dias com um espectrofotômetro e mostrou que eram estáveis para o Tipo 1 os nanolubrificantes de 0,005 wt.% e 0,01%wt.%, para o Tipo 2 o nanolubrificante de 0,005%wt., para o Tipo 3 todas as concentrações apresentaram boa estabilidade. Quando analisado a viscosidade e massa específica não se observou uma mudança significativa das propriedades indicando que podem ser aplicados em sistemas de refrigeração para avaliar os impactos nos parâmetros de desempenho.*

Palavras-chave: *Refrigeração, Nanolubrificantes, Estabilidade, Viscosidade, Massa específica*

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de refrigeração demonstram uma alta importância no cotidiano, pois, ao se observar as plantas energéticas de diversos países, o consumo (residências ou indústrias) apresenta uma tendência de crescimento. No estudo realizado por Icaza e. c.(2022) foi observado um aumento percentual do consumo de energia elétrica de países da América do Sul de 15% em 10 anos (2009-2019). No Brasil, segundo o último levantamento realizado do PPH 2019 da Eletrobrás, os compressores em sistemas de refrigeração, como refrigerador, freezer e ar-condicionado, apresentaram um consumo percentual de aproximadamente 37,5% em 2019. Isso representa um consumo energético anual de 180.834,75 GWh, e conforme os dados disponibilizados pelo EPE 2019 do Ministério de Minas e Energia, representa economicamente um valor de aproximadamente 92,5 bilhões de reais. Para os anos de 2020 a 2023 ocorreu um aumento médio no consumo residencial de energia de 2,6%, que poderá representar economicamente um valor de aproximadamente 2,4 bilhões de reais a cada ano. Deste modo, a busca de novas tecnologias e processos que tragam uma redução no consumo energético poderá trazer benefícios econômicos e reduzir os impactos ambientais. Como alternativa promissora tem-se realizado diversos estudos na aplicação de nanolubrificantes em compressores de sistemas de refrigeração. Esse tipo de nanofluido pode ser descrito como uma dispersão coloidal de partículas em escala nanométrica em um fluido convencional e geralmente proporciona uma condutividade térmica superior quando comparado ao fluido base (Choi e Eastman, 1995).

A adição de nanopartículas de escala nanométrica em óleos lubrificantes convencionais, como poliol éster (POE), Óleo Mineral (OM), Polialquilenol Glicol (PAG), entre outros, tem como principal objetivo aprimorar as propriedades reológicas, tribológicas e termofísicas desses óleos, permitindo o aumento do desempenho térmico e da vida útil dos sistemas de refrigeração (Zhu, Xia, e Shi, 2010). Por esse motivo se torna uma alternativa promissora para aplicação em sistemas de refrigeração. Conforme está apresentado na Fig. 1, tem-se um aumento no desenvolvimento de pesquisas nesta área pelos resultados promissores dos nanolubrificantes, principalmente em sistemas de refrigeração.

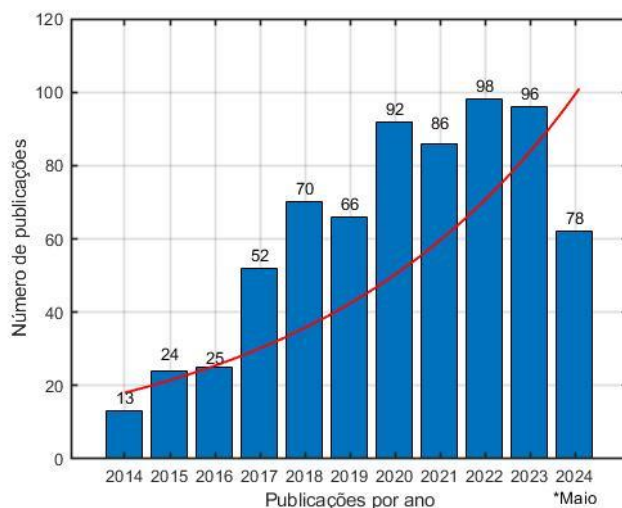


Figura 1. Número de trabalhos publicados encontrados na busca no Science Direct com o termo “nanolubricant”.

Na literatura, diversos trabalhos têm sido desenvolvidos em compressores de sistemas de refrigeração por compressão a vapor com nanolubrificantes com o intuito de melhorar energeticamente e serem mais eficientes para obter reduções nas plantas energéticas dos países. No trabalho desenvolvido por Yilmaz (2020) foram aplicadas nanopartículas de Óxido de Cobre e liga de Cobre/Prata (Cu/Ag) em um VCRS com compressor hermético alternativo e R134a/POE, em que foi obtida a redução do coeficiente de atrito (COF, do inglês, Coefficient of friction) 9,9% e 5,5%, redução da pressão de sucção e descarga máxima de 15,4% e 13,9%, redução na temperatura de descarga média de 2,01% e 10,5%, e um aumento do coeficiente de desempenho, COP, de 14,55% e 20,88%, respectivamente. O autor atribui os resultados encontrados ao aumento adequado da viscosidade dinâmica, que tende a melhorar o desempenho tribológico, reduz o atrito entre duas superfícies sólidas pelos efeitos de rolamento e polimento nas zonas de contato. Tendo um nanolubrificante com nanopartícula esférica com boa dispersão e baixa sedimentação, tem-se um maior preenchimento de fendas e ranhuras, além disso, forma um tribofilme mais estável que permite uma redução da energia dissipada pelo atrito entre os componentes.

Os nanolubrificantes que não apresentam boa estabilidade formam aglomerados que desencadeiam sedimentação, que pode causar o aumento tensões naquela região, gerando condições para ocorrer a abrasão e subsequentemente falha da proteção contra o desgaste e o aumento do atrito (HUANG et al., 2019). Por estes motivos, diversos estudos têm sido realizados para aumentar a estabilidade de nanolubrificantes, através otimização da concentração ótima de nanopartículas empregadas em conjunto com surfactante ou a funcionalização dessas nanopartículas, para maximizar os ganhos. Bordignon et al. (2018) avaliaram o comportamento tribológico de nanopartículas de grafeno multicamadas (GM) funcionalizadas com nitrogênio (N₂) e Amônia (NH₃) com concentração de 0,5 wt.% com óleo POE. Os autores identificaram que os resultados tribológicos do POE/GM, POE/GM-N₂ e POE/GM-NH₃, não obtiveram uma redução no COF, mas, o teste de desgaste mostrou um aumento no tempo de lubrificidade, em que com o mesmo tempo de teste foi obtido uma marca de desgaste 32%, 54% e 160% (POE/GM, POE/GM-N₂ e POE/GM-NH₃, respectivamente) menor para os nanolubrificantes em relação ao fluido base. Além disso, foi observado que as nanopartículas de GM funcionalizadas reduzem a aglomeração no nanolubrificante, devido ao seu tamanho pequeno e alta área superficial específica, impedindo o contato direto entre as superfícies deslizantes (devido à formação de um tribofilme), reduzindo o atrito e desgaste para regimes limitrofes, ou seja, o filme de fluido lubrificante é muito fino para impedir o contato direto entre as superfícies deslizantes, conforme é ilustrado na Fig. 2.

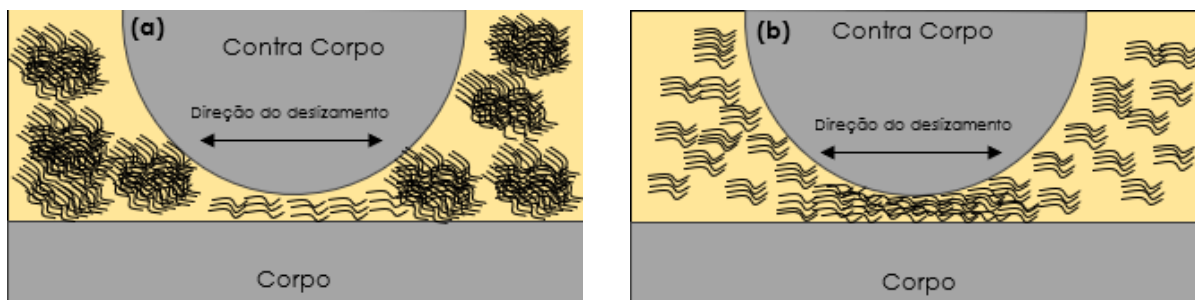


Figura 2 - Grafeno multicamadas como aditivo em óleo POE. a) Aglomeração impede contato deslizante. b) Dispersão homogênea proporciona antidesgaste entre as superfícies. Adaptado de (BORDIGNON et al., 2018).

Yang et al. (2020) realizaram um estudo sobre nanolubrificantes de nanofolhas de grafeno (NG) e a influência de surfactantes em um refrigerador doméstico. A escolha destas nanopartículas se deve à alta condutividade térmica, ter uma

superfície ultrafina de estrutura da folha, permitindo entrarem facilmente nos vales das interfaces de contato deslizantes. Os autores utilizaram concentrações de 10 - 30 mg/L de NG com OM e surfactante do tipo Span85, obtiveram ganhos na condutividade térmica de 5,9% para maior concentração e temperatura de 70 °C. Na taxa de resfriamento ocorreu o aumento de 4,7% na maior concentração, além disso, reduções no COF de 8,8%, 15,7% e 17,5% (10 mg/L, 20 mg/L e 30 mg/L), redução no tempo de resfriamento de 2,5 minutos para a maior concentração na pressão de descarga do compressor de 2,9%, 5,6% e 7,0% (10 mg/L, 20 mg/L e 30 mg/L), redução na temperatura média de descarga 2,5%, 3,8% e 4,6%, no consumo de energia em funcionamento do ciclo on-off de 14,8%, 18,5% e 20,4%, no tempo de funcionamento do ciclo on-off como apresentado na Fig. 3.

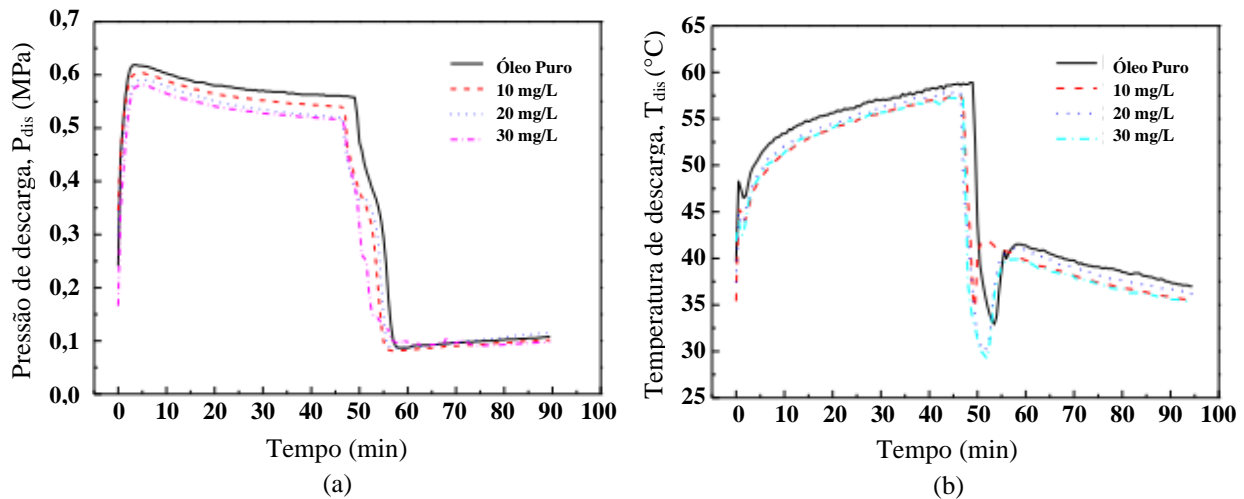


Figura 3 - a) Pressão de descarga em função do tempo para concentrações de NG. b) Temperatura de descarga em função do tempo para concentrações de NG. Adaptado de Yang et al. (2020).

Lou, Zhang e Wang. (2015) analisaram um refrigerador doméstico com R600a com um nanolubrificante de OM/GR com concentrações de 0,05 wt.%, 0,1 wt.%, 0,2 wt.%, 0,5 wt.%, em que foram reportadas reduções no consumo de energia de 3,54%, 4,55%, 3,61% e 0,64%, uma redução na temperatura de descarga e na superfície do compressor.

Conforme foi apresentado acima, os nanolubrificantes apresentam resultados promissores na área de refrigeração. Desta forma, este trabalho tem como objetivo a avaliação experimental da síntese e produção de nanolubrificantes com nanopartícula de grafeno em diferentes concentrações de 0,005 wt.%, 0,01 wt.%, 0,05 wt.%, e 0,1 wt.%, como aditivo lubrificante para aplicações em refrigeração. Foi realizada a análise de estabilidade dos nanolubrificantes e a caracterização das propriedades termodinâmicas (viscosidade dinâmica e massa específica).

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Materiais

Neste trabalho foi utilizado poliolester (POE) como óleo base do lubrificante para um compressor alternativo que segundo fabricante tem viscosidade cinemática de 32 mm²/s, e as nanopartículas de grafeno (GR), fornecidas pela GERDAU GRAPHENE, que foram funcionalizadas e os detalhes do processo de funcionalização estão presente no trabalho de Tomanik et al. (2023) que também mostrou ao realizar testes utilizando um microscópio varredura eletrônica que o tipo A0 tem mais de 10 intercadas acopladas, um tamanho lateral da primeira camada pequena e um índice de aglomeração esférica de aproximadamente 25 que definiu o tipo de nanopartícula que será aplicada neste trabalho.

2.2 Síntese de nanolubrificantes

No intuito de obter nanolubrificantes que sejam aplicáveis em sistemas de refrigeração e ar-condicionado, foram utilizados três tipos de nanopartículas de grafeno funcionalizadas que foram misturadas em alto cisalhamento em uma forma concentrada com:

- Tipo 1 – A0: concentração de grafeno de 38% com apenas um processo de alto cisalhamento para funcionalização
- Tipo 2 – A0: concentração de 38% com método de dois processos de alto cisalhamento para funcionalização
- Tipo 3 – A0: concentração de 42,9% com método de um processo de alto cisalhamento para funcionalização.

Os trabalhos desenvolvidos por Al-Janabi et al. (2022) e Saufi e Mamata (2022) demonstraram que aplicação de baixas concentrações e a utilização de um dispersante contribui para uma boa estabilidade e melhora das propriedades termofísicas. Desta forma, foram definidas concentrações em massa de 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1% para todos os tipos de nanopartículas de grafeno funcionalizadas. Estas nanopartículas foram sintetizadas com o lubrificante POE ISO VG 32 utilizando o método de dois passos. Inicialmente se utilizou um programa em matlab, que era baseado na lei de conservação das massas para calcular na síntese a quantidade em massa de nanopartícula em cada concentração, com isto em uma balança digital da marca Shimadzu do modelo AUY220 com precisão de quatro dígitos foram pesadas cada concentração em massa e depois foi utilizado um agitador magnético da marca Fisatom do modelo 752a e um agitador ultrassônico da marca QSonix do modelo Q500 para sintetizar o óleo lubrificante e a nanopartícula. Para a definição dos parâmetros para síntese da mistura foram utilizados os trabalhos de (Abdullah, 2021; Ahmed e Ahamed, 2022, Al-Janabi, Hussin, Ismail et al., 2022, Sanukrishna e Jose, 2022, Saufi e Mamat, 2022), conforme está apresentado na Tab. 1. Na Fig. 4 foi demonstrado de forma resumida o processo realizado para síntese dos nanolubrificantes produzidos no presente trabalho.

Tabela 1. Parâmetros para dispersão

Nanopartículas	Amostra	Concentração (wt.%)	Método da síntese de produção	Parâmetros experimentais				
				Tempo (min)	Veloc. (RPM)	Temp. (°C)	Pulsos (kHz)	Tempo Pulsos (s)
Tipo 1	1.1	0,005	Agitador magnético	20	1250	40-50	-	-
	1.2	0,01						
	1.3	0,05	Agitador ultrassônico	30	-	20-40	20	0,7
	1.4	0,1						
Tipo 2	2.1	0,005	Agitador magnético	20	1250	40-50	-	-
	2.2	0,01						
	2.3	0,05	Agitador ultrassônico	30	-	20-40	20	0,7
	2.4	0,1						
Tipo 3	3.1	0,005	Agitador magnético	20	1250	40-50	-	-
	3.2	0,01						
	3.3	0,05	Agitador ultrassônico	30	-	20-40	20	0,7
	3.4	0,1						

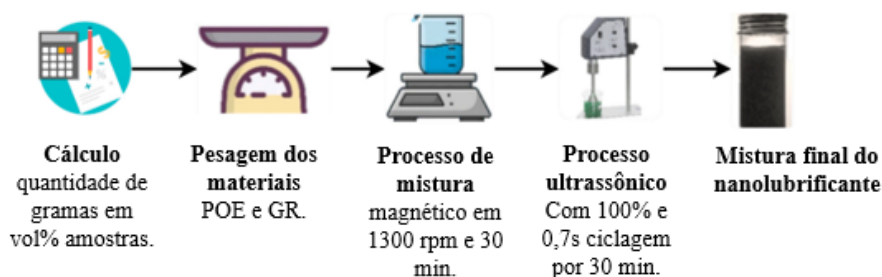


Figura 4 - Processo de preparação para amostras de nanolubrificantes. Adaptado de Al-Janabi et al. (2022)

2.3 Estabilidade dos nanolubrificantes

Na avaliação da estabilidade dos nanolubrificantes que foram produzidos no item 2.2 permitiu-se obter dados sobre a dispersão das nanopartículas no lubrificante base ao longo do tempo. Na literatura existem algumas metodologias para avaliação da estabilidade dos nanolubrificantes, no qual entre as mais utilizadas se destacam: a inspeção visual das amostras ao longo do tempo, potencial Zeta e a absorvância (Yildiz, Ağbulut e Gürel, 2021). Foram utilizados os métodos de absorvância e de inspeção visual. No método de absorvância foi utilizado um espectrofotômetro da marca Shimadzu do modelo UV-1900, sendo feito as medidas dos comprimentos de ondas na faixa de 400 até 700 nm, sendo feita esta escolha baseando-se nos trabalhos desenvolvidos por Farade et al. (2021) e Al-Janabi et al. (2021). O processo da análise de estabilidade foi realizado por um período de 20 dias. Para uma melhor compressão dos efeitos da sedimentação das nanopartículas será apresentado um gráfico da variação nas amostras comparando a relação da concentração inicial no primeiro dia com a redução da concentração com o decorrer de 20 dias, sendo complementado com o método da inspeção visual no primeiro, no décimo e vigésimo dia da preparação.

2.4 Viscosidade dinâmica e Massa específica dos nanolubrificantes

A viscosidade dinâmica dos nanolubrificantes foi medida utilizando um viscosímetro do tipo Stabinger da marca Anton Paar e modelo SVM-3000, cujas incertezas de medição fornecidas pelo fabricante, conforme a Tab. 2. Com o intuito de analisar de forma simultânea o efeito da temperatura no comportamento da viscosidade dinâmica da substância

em estudo, as amostras de lubrificante puro e nanolubrificantes foram variadas as temperaturas no intervalo de 20 a 100 °C com incrementos de 10 °C.

Tabela 2. Incerteza de medição fornecidas pelo fabricante

Parâmetro	Faixa de medição	Incerteza de medição
Viscosidade dinâmica	0,2 a 20.000 [mPa.s]	±0,35%
Massa específica	0,65 a 3 [g/cm³]	0,0005 [g/cm³]
Temperatura	-56 a 105 [°C]	0,02 °C

A massa específica dos nanolubrificantes foram medidas utilizando o mesmo equipamento da viscosidade dinâmica com a função de densímetro com a incerteza sendo mostrada na Tab. 2. Foram analisados dois efeitos, o efeito da temperatura da amostra e da concentração de nanopartículas no fluido lubrificante. Sendo variada a temperatura no intervalo de 20 até 100 °C com incrementos de 10 °C, assim como na viscosidade dinâmica.

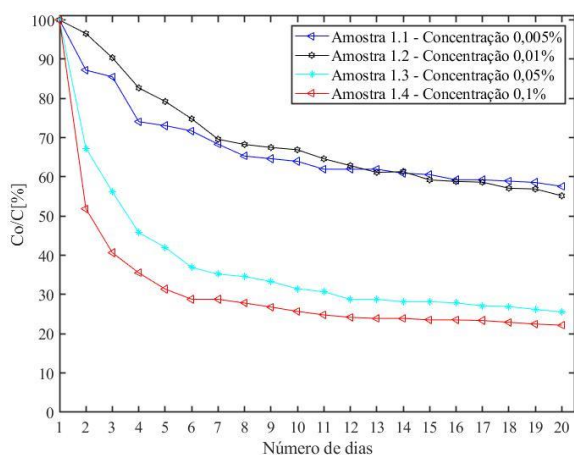
3 RESULTADOS EXPERIMENTAIS

3.1 Avaliação da estabilidade dos nanolubrificantes

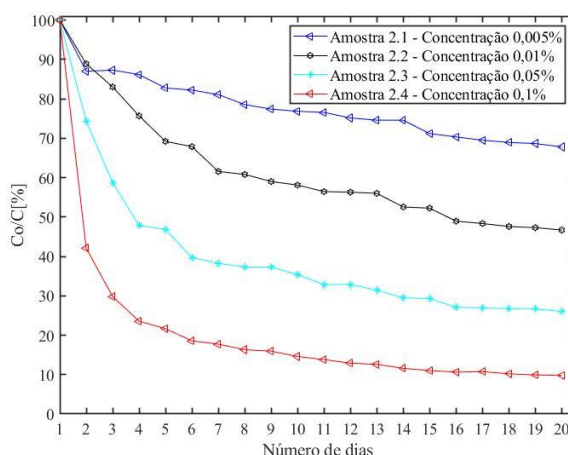
A estabilidade dos nanolubrificantes possuem papel crucial na real aplicação em sistemas de refrigeração. O tipo de nanopartícula aplicada pode influenciar diretamente na estabilidade do nanolubrificante, assim como as técnicas químicas e misturas realizadas para desenvolvimento das nanopartículas podem contribuir significativamente para estabilidade (Al-Janabi, Hussin e Abdullah, 2021)

Conforme foi observado no trabalho de Bordignon et al. (2018), diferentes tipos de funcionalização aplicados ao mesmo tipo de nanopartícula de grafeno podem apresentar desde um nanolubrificante estável até um nanolubrificante com baixa estabilidade. Neste trabalho para analisar a estabilidade foi utilizado o método de absorvância por fornecer uma medida quantitativa da estabilidade do nanolubrificante ao avaliar um pico de absorção da nanopartícula que está suspensa no fluido base ter uma tendência a absorver luz na faixa de luz visível e ultravioleta, logo a estabilidade pode ser medida com o espectrofotômetro que foi citado em 2.3 para medição deste pico de absorção com a variação do tempo (Chakraborty e Panigrahi, 2020).

Na Fig. 5 foram apresentados três gráficos que utilizam a variação do pico de absorção com a variação pelo tempo num período de 20 dias, em que é possível observar que as nanopartículas do Tipo 1 (Fig. 5-a) tem uma boa para baixas concentrações (0,005 wt.% e 0,01 wt.%) com concentração do nanolubrificante acima de 50 % com relação a concentração inicial e baixa estabilidade para concentrações mais altas (0,01 wt.% e 0,1 wt.%) com concentração abaixo de 30 % com relação a concentração inicial que pode também ser observado na Fig 6-a). Na nanopartícula do Tipo 2 (Fig. 5-b) mostram boa estabilidade para menor concentração (0,005 wt.%) com concentração do nanolubrificante acima de 60 % com relação a concentração inicial e baixa estabilidade conforme o aumento da concentração empregada (0,01 wt.% até 0,1 wt.%) com concentração abaixo de 50 % com relação a concentração inicial e que com o aumento da concentração se tem um aumento da sedimentação das nanopartículas que pode ser visto também na Fig. 6-b). Conforme demonstrado no gráfico da Fig. 5-c), a nanopartícula do Tipo 3 (funcionalizada), mostra uma maior estabilidade para as duas menores quantidades (0,005 wt.% e 0,01 wt.%) em relação as duas maiores quantidades (0,05 wt.% e 0,1 wt.%) com contração de nanolubrificantes acima de 60 % com relação a concentração inicial e mostrando que independente da concentração aplicada foi observado o efeito da prevenção na formação de grandes aglomerados, conforme pode ser observado na Fig. 6-c).



a)



b)

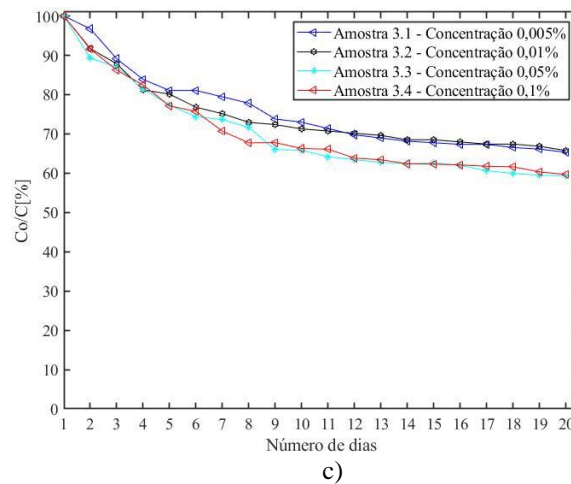


Figura 5 – Gráfico da redução da concentração inicial usando pico de absorção com relação ao tempo a) Nanopartículas do Tipo 1. b) Nanopartículas Tipo 2. c) Nanopartículas do Tipo 3

O comportamento de sedimentação apresentado pelas amostras 1.3, 1.4 e 2.2-2.4 pode ser explicado por conta de as nanopartículas estarem sujeitas as diferentes forças ao nível molecular como forças gravitacionais, eletrostáticas, empuxo e Van der Waal, que podem variar com relação a muitos fatores. Por conta destas interações de forças, as nanopartículas interagem por terem um fenômeno coesivo e adesivo que induz aglomeração que podem gerar grandes aglomerados causando uma sedimentação no nanolubrificante (Said et al., 2022). A funcionalização de nanopartículas é realizada para reduzir estes efeitos, porém, o comportamento da nanopartícula Tipo 1 para amostras 1.3 e 1.4 e Tipo 2 para as amostras 2.2-2.4 se assemelha ao observado no trabalho de Bordignon et al. (2018) em que ao utilizar grafeno funcionalizado com nitrogênio foi observado que a dopagem realizada para melhorar a insolubilidade causada pela interação das forças de Van der Wall não conseguiu prevenir a formação de aglomerados pelas interações das nanopartículas de grafeno.

No caso do comportamento apresentado pelas amostras 1.1,1.2, 2.1 e 3.1-3.4 se assemelha ao que foi observado no trabalho de Bordignon et al. (2018) quando aplicou grafeno funcionalizado com amônia (NH₃) que inicialmente tem uma sedimentação das nanopartículas de grafeno e com o decorrer do tempo a funcionalização reduz essa sedimentação tornando o nanolubrificante estável, assim como também pode ser observado mostrando uma estabilidade do nanolubrificante produzido. Isto pode ser explicado por conta da funcionalização química covalente ao ser aplicada em nanopartículas de carbono conseguirem realizar transformações químicas que podem preencher lacunas e evitar a formação dos aglomerados (Banerjee, Hemraj-Benny e Wong, 2005).

Aplicação de nanolubrificantes estáveis em sistemas de refrigeração pode promover uma redução do desgaste dos componentes, redução do trabalho realizado, aumento da capacidade de refrigeração e aumento do COP do sistema. (Marcucci Pico et al., 2020).

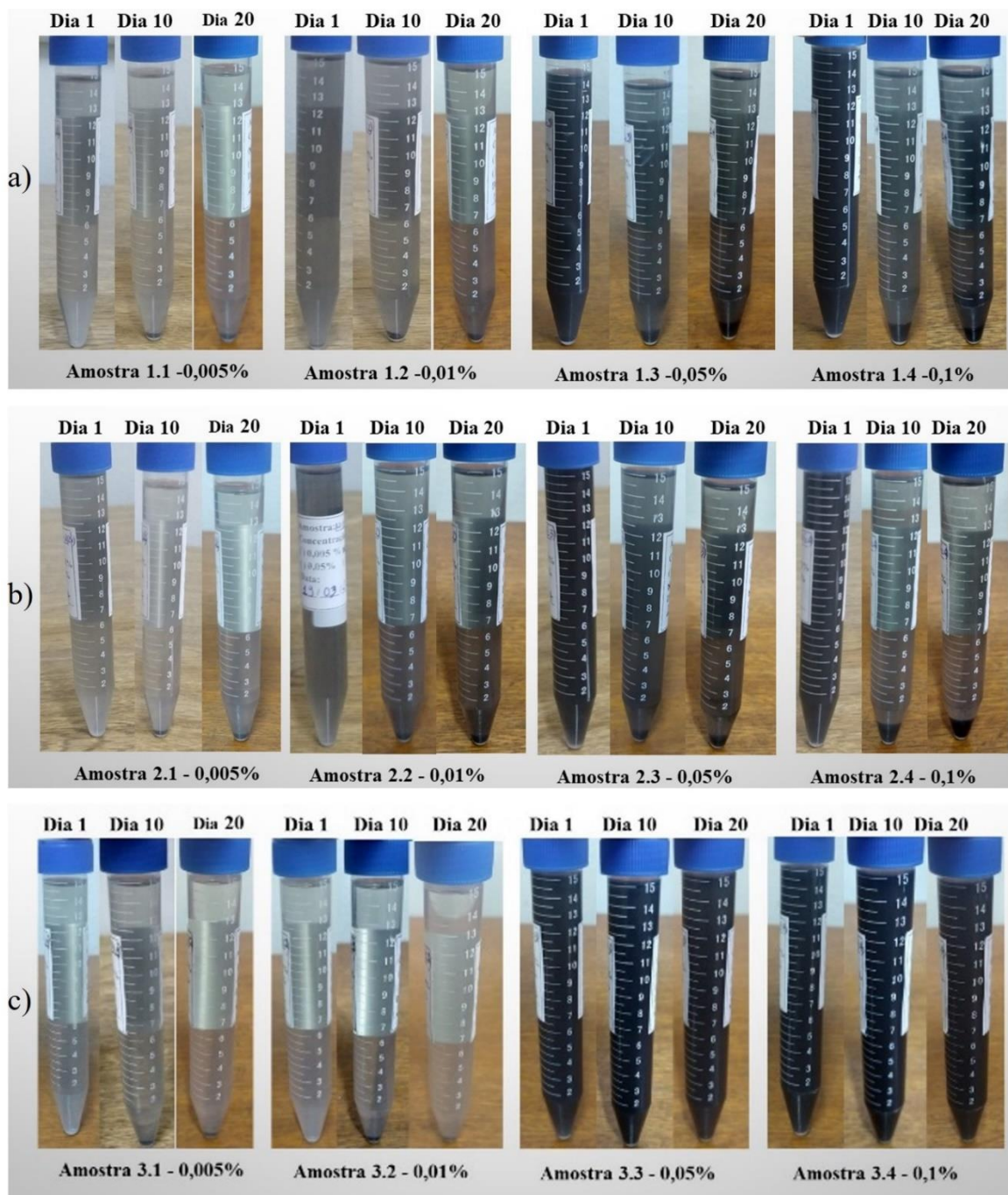


Figura 6 – Sedimentação do Grafeno com o Tempo. a) Nanopartículas do Tipo 1. b) Nanopartículas do Tipo 2. c) Nanopartículas Tipo 3

3.2 Viscosidade dinâmica dos nanolubrificantes

Conforme pode ser observado na Fig. 7, o incremento da temperatura tem um efeito direto na redução da viscosidade do óleo e dos nanolubrificantes. Este efeito pode ser explicado pelo fato das forças de atrito interno entre várias camadas do líquido à medida que a temperatura aumenta as forças de Vander Walls de atração e ligações intermoleculares secundárias que podem ser sobrepostas pelo movimento browniano que por conta do aumento da energia causa uma quebra nos aglomerados que foram formados reduzindo a viscosidade (Liñeira Del Río et al., 2018, Narayanasarm e Kuzhiveli, 2019). No estudo realizado por Narayanasarma e Kuzhiveli (2019) que trabalharam com óleo do tipo POE na faixa de temperatura de 25 °C a 100 °C com incrementos de 15 °C por medição, mostrou uma diminuição da viscosidade dinâmica tanto do óleo base quanto dos nanolubrificantes de óxido de silício nas concentrações em massa de 0,01% a 0,2%. No trabalho realizado por Aljuwayhel et al. (2023) na viscosidade do óleo base POE foi observado o mesmo comportamento de redução da viscosidade na faixa de temperatura de 10 °C a 100 °C com incrementos de 10 °C e também foi observado o mesmo efeito nos nanolubrificantes de POE com nanopartículas de diamante com concentração em volume de 0,05% a 0,5%.

Na Fig. 7 está ilustrado que a viscosidade não teve um aumento significativo com relação ao fluido base com a adição de nanopartículas. Este comportamento pode ser explicado por conta da baixa concentração empregadas de nanopartículas funcionalizadas. Segundo o trabalho de Beheshti et al. (2014) um baixo valor de viscosidade indica uma baixa resistência ao fluxo que aumenta a fluidez, podendo melhorar resfriamento, reduzir o desgaste dos componentes, reduzir o atrito e aumentar a eficiência dos compressores.

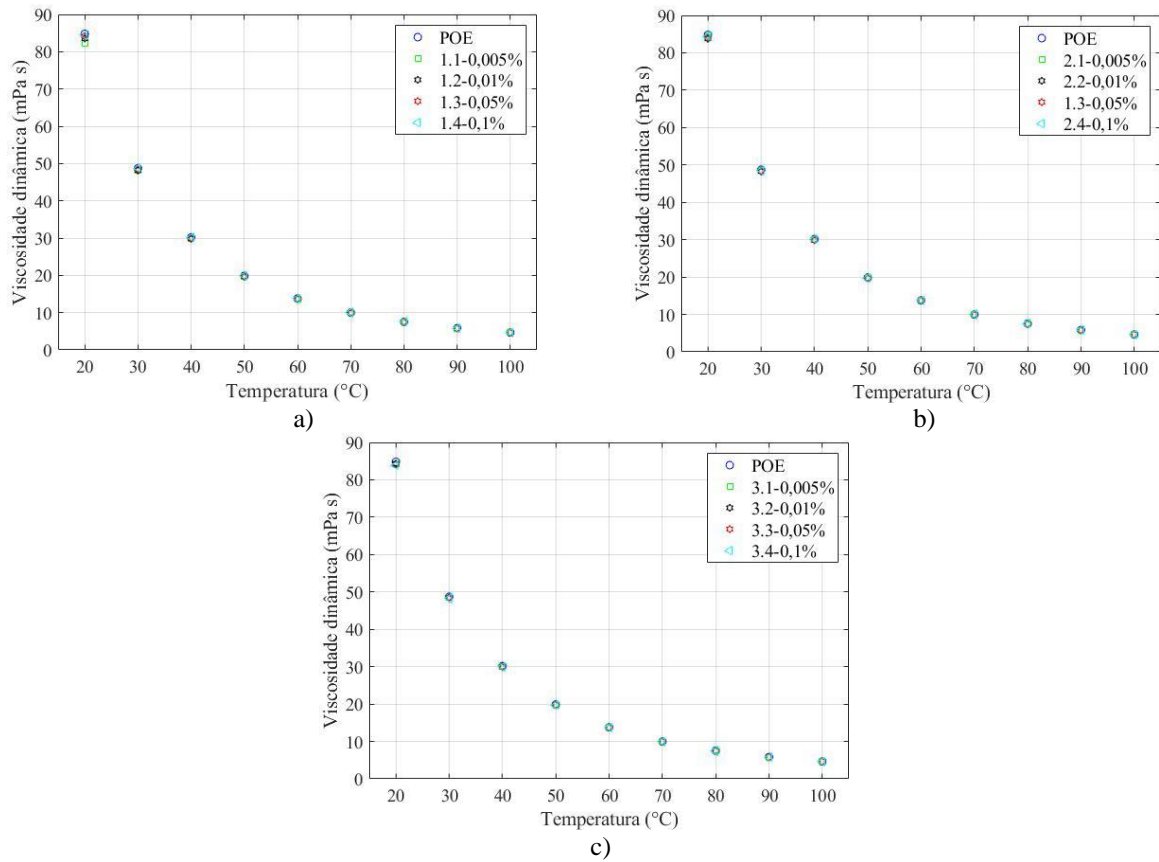
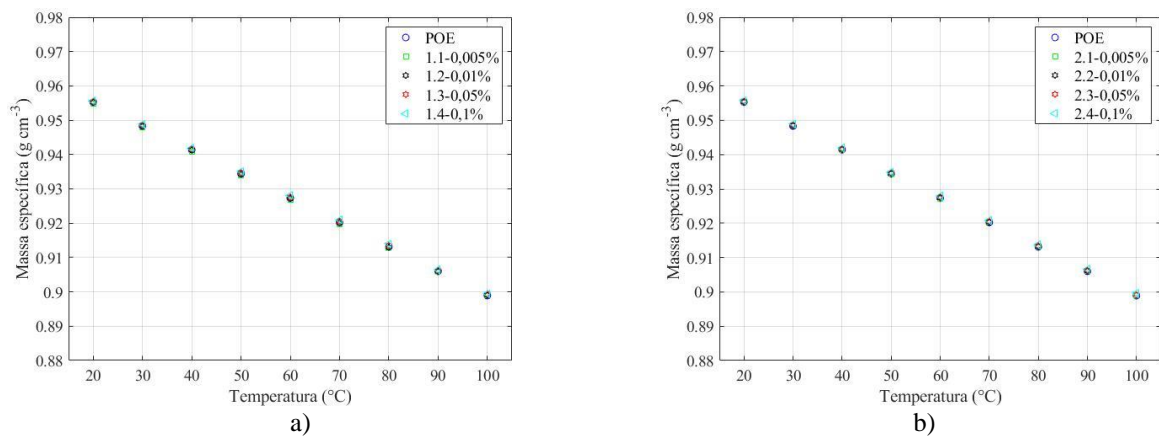


Figura 7 – Gráfico da Viscosidade dinâmica com a temperatura. a) Nanopartículas do Tipo 1. b) Nanopartículas Tipo 2. c) Nanopartículas do Tipo 3

3.3 Massa específica dos nanolubrificantes

A massa específica assim como a viscosidade apresentada no item 3.2, não teve aumentos significativos quando comparados ao fluido base conforme pode se observar na Fig. 8 e que conforme aumenta a temperatura reduz a massa específica. Isto indica o mesmo comportamento observado no estudo realizado por Beheshti et al. (2014) que ao aplicar nanopartículas em uma quantidade em massa de 0,001% a 0,01% de nanotubos de carbono de paredes múltiplas observou o mesmo efeito de um baixo aumento da massa específica com relação à concentração de nanolubrificante, podendo influenciar de forma positiva na transferência de calor.



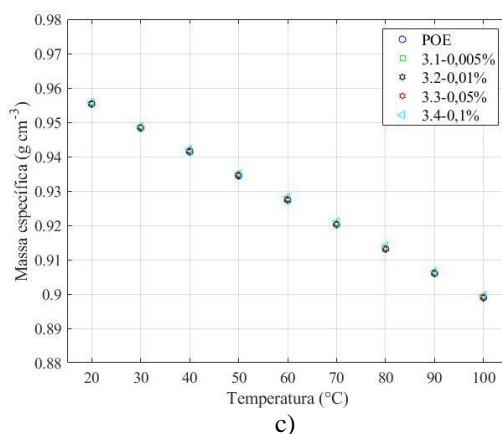


Figura 8 – Gráfico da Viscosidade dinâmica com a temperatura. a) Nanopartículas do Tipo 1. b) Nanopartículas Tipo 2. c) Nanopartículas do Tipo 3

4 CONCLUSÕES

Os nanolubrificantes do Tipo 1 com concentração em massa de 0,005% e 0,01% apresentam nanolubrificante estáveis, enquanto para o nanolubrificante do Tipo 2 apenas a concentração em massa de 0,005% apresenta a melhor concentração para produção de nanolubrificantes estáveis, e o nanolubrificante do Tipo 3 para qualquer concentração em massa de 0,005% a 0,1% para os casos estudados apresentam nanolubrificantes estáveis com isto a aplicação em trabalhos futuros desses nanolubrificantes estáveis em sistemas de refrigeração pode promover uma redução do desgaste dos componentes, redução do trabalho realizado, aumento da capacidade de refrigeração e aumento do COP.

A viscosidade dinâmica dos nanolubrificantes estudados não apresentaram aumentos significativos com relação ao fluido base, logo sua aplicação em sistemas de refrigeração com ciclos de compressão a vapor pode melhorar resfriamento dos compressores, reduzir o desgaste dos componentes, reduzir o atrito e aumentar a eficiência dos compressores. Na massa específica não foram observados incrementos significativos, portanto, as concentrações empregadas não têm uma grande influência neste parâmetro.

Agradecimentos

Os autores agradecem o suporte dado à essa pesquisa pelas agências de fomento CNPq, FAPEMIG e CAPES, e pelas empresas apoiadoras NTC Cooling, Tecumseh, RAC e CAREL pela doação de equipamentos. À GERDAU GRAPHENE pelo fornecimento das nanopartículas de grafeno.

4 REFERÊNCIAS

- Ahmed, M. I., and J. U. Ahamed. 2022. TiO₂ nanolubricant: An approach for performance improvement in a domestic air conditioner. *Results in Materials* 13:100255.
- Al-Janabi A. S., M. Hussin, M. Z. Abdullah, and M. A. Ismail. 2022. Effect of CTAB surfactant on the stability and thermal conductivity of mono and hybrid systems of graphene and FMWCNT nanolubricant. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* 648:129275.
- Al-Janabi, A.S., M. Hussin, and M. Z. Abdullah. 2021. Stability, thermal conductivity and rheological properties of graphene and MWCNT in nanolubricant using additive surfactants. *Case Studies in Thermal Engineering* 28:101607.
- Aljuwayhel, N. F., N. Ali, S. A. Ebrahim, and A. M. Bahman. 2023. Experimental investigation of thermophysical properties, tribological properties and dispersion stability of nanodiamond-based nanolubricant for air conditioning systems. *International Journal of Refrigeration* 145:325–337.
- Banerjee, S., T. Hemraj-Benny, and S. S. Wong. 2005. Covalent surface chemistry of single-walled carbon nanotubes. *Advanced Materials* 17:17-29.
- Beheshti, A., M. Shanbedi, S. Z. Heris. 2014. Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid. *Journal of Thermal Analysis and Calorimetry* 118:1451–1460.
- Bordignon, R., D. Salvaro, C. Binder, A. N. Klein, V. Drago, and J. D. B. De Mello. 2018. Tribological Behaviour of Plasma-Functionalized Graphene as Low-Viscosity Oil Additive. *Tribology Letters* 66(3):1-14.
- BRASIL. Centrais Elétricas Brasileiras S.A. – ELETROBRAS. 2019. Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial. Available at <https://q.eletronbras.com/pt/Paginas/PPH-2019.aspx>.
- BRASIL. Ministério de Minas e Energia/ Empresa de Pesquisa Energética – MME/EPE. 2019. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2020. Available at <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados>

abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-160/topico-168/Anu%C3%A1rio%20Estat%C3%ADstico%20de%20Energia%20El%C3%A9trica%202020.pdf.

- BRASIL. Ministério de Minas e Energia/Empresa de Pesquisa Energética – MME/EPE. 2022. Anuário Estatístico de Energia Elétrica 2023. Available at <https://dashboard.epe.gov.br/apps/anuario-livro>.
- Chakraborty, S., P. K. Panigrahi. 2020. Stability of nanofluid: A review. *Applied Thermal Engineering* 174.
- Choi, S. U. S., and J. A. Eastman. 1995. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. United States.
- Farade, R.A., N. I. A. Wahab, D. E. A. Mansour, N. B. Azis, J. B. Jasni, V. Veerasamy, M. Thirumeni, A. X. R. Iru-dayaraj, and A.S. Murthy. 2021. Investigation of the effect of sonication time on dispersion stability, dielectric properties, and heat transfer of graphene based green nanofluids. *IEEE Access* 9:50607–50623.
- Huang, S., A. He, J. H. Yun, X. Xu, Z. Jiang, S. Jiao, and H. Huang. 2019. Synergistic tribological performance of a water based lubricant using graphene oxide and alumina hybrid nanoparticles as additives. *Tribology International* 135: 170–180.
- Icaza, D., D. Borge-Diez, and S. P. Galindo. 2022. Analysis and proposal of energy planning and renewable energy plans in South America: Case study of Ecuador. *Renewable Energy* 182:314–342.
- Ismail, M.F., W. H. Azmi, R. Mamat, and R. A. Rahim. 2022. Rheological Behaviour and Thermal Conductivity of Polyvinyl Ether Lubricant Modified with SiO₂-TiO₂ Nanoparticles for Refrigeration System. *International Journal of Refrigeration* 138:118–132.
- Liñeira del Río, J. M., M. J. G. Guimarey, M. J. P. Comuñas, E. R. López, A. Amigo, and J. Fernández. 2018. Thermophysical and tribological properties of dispersions based on graphene and a trimethylolpropane trioleate oil. *Journal of Molecular Liquids* 268, 854–866.
- Lou, J. F.; H. Zhang, and R. WANG. 2015. Experimental investigation of graphite nanolubricant used in a domestic refrigerator. *Advances in Mechanical Engineering* 7(2):1–9.
- Marcucci Pico, D. F., L. R. R. da Silva, O. S. Hernandez Mendoza, and E. P. Bandarra Filho. 2020. Experimental study on thermal and tribological performance of diamond nanolubricants applied to a refrigeration system using R32. *International Journal of Heat and Mass Transfer* 152.
- Narayanasarma, S., and B. T. Kuzhiveli. 2019. Evaluation of the properties of POE/SiO₂ nanolubricant for an energy-efficient refrigeration system – An experimental assessment. *Powder Technology* 356:1029–1044.
- Said, Z., L. S. Sundar, A. K. Tiwari, H. M. Ali, M. Sheikholeslami, E. Bellos, and H. Babar. 2022. Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. *Physics Reports* 946:1-94.
- Sanukrishna, S. S., and V. M. Jose. 2022. Evaluation of thermal and rheological characteristics of CNT-PAG nanolubricant for the development of energy efficient refrigeration systems. *Materials Today: Proceedings* 58:114–120.
- Saufi, M. A., and H. Mamat. 2022. Comparison of dispersion techniques of graphene nanoparticles in polyester oil. *Materials Today: Proceedings* 66:2747–2751.
- Tomanik, E., P. Berto, W. Christinelli, G. Papoulias, X. Raby, and V. Peressinotto. 2023. Use of Functionalized Graphene-Based Materials on Grease. *Lubricants* 11:452.
- Yang, S., X. Cui, Y. Zhou, and C. Chen. 2020. Study on the effect of graphene nanosheets refrigerant oil on domestic refrigerator performance. *International Journal of Refrigeration* 110:187–195.
- Yildiz, G., Ü. Ağbulut, and A. E. Gürel. 2021. A review of stability, thermophysical properties and impact of using nanofluids on the performance of refrigeration systems. *International Journal of Refrigeration* 129:342–364.
- Yilmaz, A.C., 2020. Performance evaluation of a refrigeration system using nanolubricant. *Applied Nanoscience (Switzerland)* 10:1667–1678.
- Zhu, Y., S. Xia, and Z. Shi. 2010. Research on the Effect of Nano-materials Used in Rotary Compressor.

GRAPHENE/POE NANOLUBRICANT: AN ANALYSIS OF STABILITY AND THERMOPHYSICAL PROPERTIES FOR APPLICATION IN REFRIGERATION SYSTEMS

Abstract. Refrigeration systems play a crucial role in society, with their significance increasing over the years due to climate events, compliance with international standards, and their direct impact on electricity consumption. Researchers explore new technologies for optimizing refrigeration systems, including the application of nanolubricants in compressors. Stability is a fundamental factor in these studies, given the high potential to enhance thermophysical properties as well the tribological properties. Nanolubricants can lead to improvements in refrigeration system performance coefficients, cooling capacity, and reductions in power consumption and suction pressure. In this experimental study, we analyzed the stability, viscosity, and density of three types of graphene-functionalized nanolubricants, using polyol ester (POE) oil as the base fluid. The nanolubricants were classified as Type 1, Type 2, and Type 3, with mass concentrations of 0.005%, 0.01%, 0.05%, and 0.1%. Stability was assessed over 20 days using a spectrophotometer, revealing that Type 1 nanolubricants at 0.005 wt.% and 0.01 wt.% were stable, while Type 2 nanolubricant at 0.005 wt.% and all concentrations of Type 3 exhibited good stability. Viscosity and density analysis showed no significant changes, suggesting that these nanolubricants can be applied in refrigeration systems to evaluate performance impacts.

Keywords: Refrigeration, Nanolubricants, Stability, Viscosity, Specific gravity