



XVIII CONBRAVA - CONGRESSO BRASILEIRO DE REFRIGERAÇÃO, AR-CONDICIONADO, VENTILAÇÃO, AQUECIMENTO E TRATAMENTO DO AR
São Paulo Expo – 13 à 15 de setembro de 2023

ESTADO DA ARTE SOBRE ADIÇÃO DE NANOPARTÍCULAS A LUBRIFICANTES EM SISTEMAS DE REFRIGERAÇÃO

PAPER 77

RESUMO

Recentemente, os nanolubrificantes tem surgido na literatura como uma alternativa para melhorar o desempenho de sistemas de refrigeração por compressão a vapor (VCRS, conforme sigla em inglês). Diversas pesquisas demonstram que a dispersão de nanopartículas (NPs) em lubrificantes convencionais pode melhorar, de forma simultânea, as suas propriedades termofísicas e tribológicas. No presente artigo, foi realizada uma análise extensiva dos trabalhos encontrados na literatura sobre os impactos da adição de nanopartículas nas propriedades termofísicas, condutividade térmica e viscosidade, e, nas propriedades tribológicas, coeficiente de atrito e desgaste. Além disso, foram abordados de forma introdutória os métodos de produção e o uso de surfactantes para melhorar a estabilidade de longo prazo de nanolubrificantes. Por último, foi abordada a aplicação de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração e os seus impactos diretos no coeficiente de desempenho, capacidade frigorífica, pressão de operação, e consumo de energia.

Palavras-chave: Nanolubrificante. Sistemas de refrigeração. Nanopartículas.

ABSTRACT

Recently, nanolubricants have emerged in the literature as an alternative for improving the performance of vapor compression refrigeration systems (VCRS). Several research demonstrate that dispersion of nanoparticles (NPs) in conventional lubricants can simultaneously improve their thermophysical and tribological properties. In the present paper, an extensive review of the works found in the literature of the impacts of nanoparticle addition on the thermophysical properties, thermal conductivity and viscosity, and, on the tribological properties, coefficient of friction and wear. In addition, production methods and the use of surfactants to improve the long-term stability of nanolubricants were studied in detail. Finally, the application of nanolubricants in refrigeration systems and their impacts on coefficient of performance, refrigeration capacity, operating pressures, and energy consumption were analyzed.

Keywords: Nanolubricant. Refrigeration systems. Nanoparticles.

1 INTRODUÇÃO

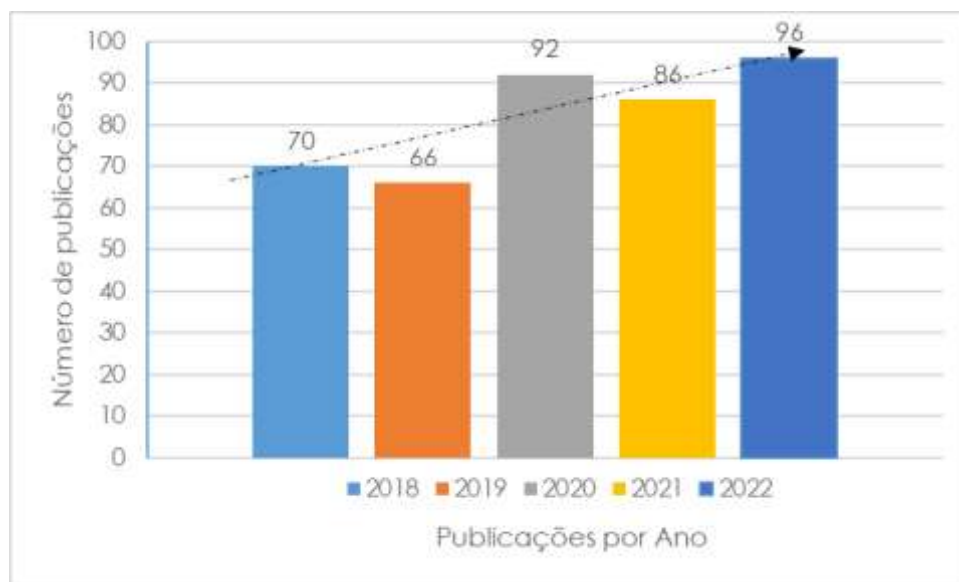
Os sistemas de refrigeração que seguem o ciclo por compressão de vapor (VCRS, conforme sigla em inglês) estão presentes em diversas aplicações, desde residenciais até industriais. O sistema de refrigeração, na sua composição mais básica, é composto por um condensador, um evaporador, um compressor e um dispositivo de expansão. Nessa composição básica, os sistemas de refrigeração modernos podem ser aprimorados com a adição de novos componentes e controles eletrônicos para atingir maiores eficiências.

Dentro dos componentes que constituem o sistema de refrigeração, o

compressor é o que possui o maior consumo de energia e, por consequência, o seu desempenho é o que mais influência na eficiência do sistema. O compressor é composto por um motor, um sistema de compressão e um óleo lubrificante. Esse último possui três principais funções: (1) eliminar o contato e evitar o desgaste entre as partes móveis; (2) servir como um selo dinâmico das válvulas e do mecanismo de compressão; e, (3) dissipar o calor gerado durante a compressão do fluido refrigerante (MANG; DRESEL, 2007). Outra função não menos importantes do óleo lubrificante é a de evitar a oxidação e a corrosão. A adição de nanopartículas em escala nanométrica em óleos lubrificantes convencionais, como Poliol Éster (POE), Óleo Mineral (OM), Polialquileno Glicol (PAG) etc., para formar um nanolubrificante pode 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; SHI, 2010).

A Figura 1 apresenta o número de publicações por ano encontradas nas bases de dados científicas (www.sciencedirect.com) filtrado através da palavra-chave nanolubrificante, no período de 2018 até 2022. Esse crescente número se dá devido à que os nanolubrificantes estão sendo alvo de pesquisa com alto potencial e estão sendo aplicados em diversas áreas : como a biotecnologia, a indústria automotiva, a soldagem (OSAMA et al., 2018), os sistemas térmicos, entre outros (SAI PINNI; KATARKAR; BHAUMIK, 2021).

Figura 1 – Gráfico da quantidade de pesquisas de nanolubrificantes no período de 2018 a 2022.



Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Science Direct, 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/> Acesso em: 01 de março de 2023.

Nesse sentido, o principal objetivo desse trabalho é avaliar o desempenho de nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração que seguem o ciclo por compressão de vapor por intermédio de uma revisão da literatura. Para isso, serão abordados os tipos de nanopartículas, métodos de produção, fluido base, propriedades termofísicas (viscosidade, condutividade térmica e massa específica), assim como, os impactos da sua aplicação em sistemas de

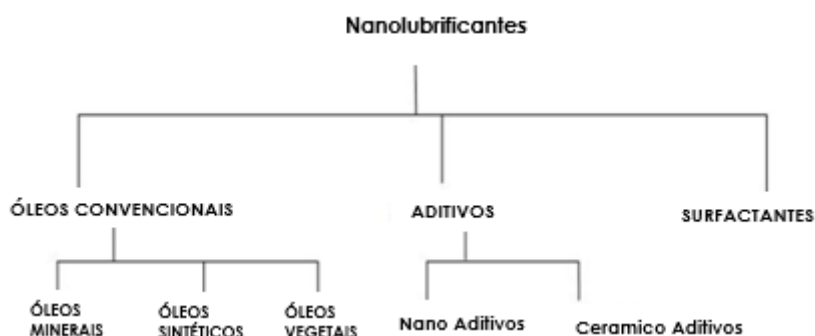
refrigeração.

2 NANOLUBRIFICANTES

Os nanolubrificantes, como um tipo de nanofluidos, são uma dispersão de partículas em escala nanométrica (0 – 100 nm) dentro de um lubrificante de convencional. O principal destaque dos nanofluidos é maior condutividade térmica quando comparado com os fluidos de transferência de calor convencionais. Por outro lado, as nanopartículas, quando adicionadas a um lubrificante base, também podem ser consideradas como aditivos lubrificantes de elevado potencial. Entre as principais vantagens em relação aos aditivos convencionais do uso de partículas em escala nanométrica como aditivo lubrificante estão: (1) o reduzido tamanho permite que as partículas entrem nas regiões de contato mais facilmente; (2) Apresentam elevada eficiência à temperatura ambiente, ou seja, não requerem de condições específicas (temperatura, pressão, entre outros) desenvolverem as suas propriedades tribológicas (MARTIN; OHMAE, 2008); (3) E, em função da natureza das nanopartículas, possuem baixa ou nula toxicidade (ZHAI et al., 2017). Devido à essas vantagens, os nanolubrificantes apresentam-se como uma abordagem promissória para melhorar as propriedades térmicas, reológicas e tribológicas de um sistema (SANUKRISHNA; PRAKASH, 2018a).

Por se tratar de partículas sólidas, insolúveis no fluido base, os nanolubrificantes apresentam problemas de estabilidade e decantação ao longo do tempo (SAID et al., 2021). A dispersão desses aditivos tende melhorar a lubricidade, o desempenho da taxa de desgaste, o coeficiente de atrito (COF) e a condutividade térmica de lubrificantes convencionais. Óleos convencionais podem ser classificados de diferentes tipos, como, mineral, sintética e vegetal. Os aditivos podem ser classificados em duas subcategorias como nano e químicos, conforme está ilustrado na Figura 2 (KHALID SHAFI; CHAROO, 2018; ZAWAWI; AZMI; GHAZALI, 2022).

Figura 2 – Componentes do processo de nanolubrificantes.



Fonte: Adaptado de KHALID SHAFI; CHAROO (2018).

A Tabela 1 apresenta de forma resumida os principais destaques dos trabalhos que aplicaram nanolubrificantes em sistemas de refrigeração.

Tabela 1 – Nanolubrificantes em sistemas térmicos

Trabalho	Óleo	Aditivo	$\phi\phi$	Nanolubrificante
----------	------	---------	------------	------------------

			[%]	
(SANTHANA KRISHNAN et al., 2018)	POE	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , ZrO ₂ , CNT	0,1–0,3% v/m	Al ₂ O ₃ /POE, SiO ₂ /POE, ZrO ₂ /POE, CNT/POE
(SANUKRISHNA et al., 2018)	PAG	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₂	0,07–0,6% v	Al ₂ O ₃ /PAG, SiO ₂ /PAG, TiO ₂ /PAG
(GILL et al., 2018)	OM	Al ₂ O ₃ , SiO ₂ , TiO ₂	0,2% g/l	Al ₂ O ₃ /OM, SiO ₂ /OM, TiO ₂ /OM
(NARAYANASARMA; KUZHIVELI, 2019)	POE	SiO ₂	0,01–0,2% g	SiO ₂ /POE
(ADELEKAN et al., 2019)	OM	GR	0,2–0,6% g/l	GR/OM
(MARCUCCI PICO et al., 2019)	POE	D	0,1–0,5% g	D/POE
(SALEM, 2020)	POE	MWCNT	0,1–0,5%g	MWCNT/POE
(BABARINDE; AKINLABI; MADYIRA, 2020)	OM	MWCNT	0,4–0,6% g/l	MWCNT/OM
(ABDUR RAZZAQ; AHAMED, 2020)	OM	TiO ₂	0,1–0,4% g	TiO ₂ /OM
(CHOI et al., 2021)	POE	MWCNT	0,1% g	MWCNT/POE
(YOGESH JOSHI; DINESH ZANWAR; SANDEEP JOSHI, 2021)	POE OM	Al ₂ O ₃	0,02–0,1% g	Al ₂ O ₃ /POE Al ₂ O ₃ /OM
(AHMED; AHAMED, 2022)	POE	TiO ₂	0,01–0,2% g	TiO ₂ /POE
(MADYIRA; BABARINDE; MASHININI, 2022)	POE	GR	0,2–0,6% g/l	GR/POE

Fonte: Elaborado pelo autor. Nota: PAO: Polialfaolefina; OM: Óleo mineral; POE: Poliál éster; PAG: Polialquilenoglicol, MWCNT: Nanotubo de carbono de paredes múltiplas, GR: Grafeno, D: Diamante.

2.1 Nanopartículas

As nanopartículas podem ser classificadas como metais, óxidos metálicos, compósitos, baseados em carbono e híbridas. Conforme pode ser observado na Tabela 1, as partículas mais utilizadas para sistemas de refrigeração são os óxidos (Al₂O₃, SiO₂ e ZrO₂) e os baseados em carbono (Grafeno, Diamante e MWCNT) por apresentarem melhorias no antidesgaste e no coeficiente de atrito, além de mudar a viscosidade do nanolubrificante. (ALI et al., 2019; WHITE et al., 2018).

As nanopartículas de óxidos são utilizadas devido à sua estabilidade química, ao seu baixo custo, e a sua morfologia esférica (GILL et al., 2018). As de grafeno apresentam alta resistência e condutividade térmica (4800 a 5700 W·m⁻¹·K⁻¹), baixa tensão de cisalhamento na direção planar fazendo com que suas camadas possam deslizar uma sobre as outras (WHITE et al., 2018).

Os nanodiamantes se destacam pela elevada condutividade térmica, capacidade de produção em larga escala, dureza e a sua nula toxicidade. A elevada dureza permite que as nanopartículas realizem o polimento de determinadas superfícies do sistema tribológico, que dependendo da aplicação, pode acarretar resultados benéficos. Por outro lado, os nanotubos de carbono são altamente utilizados, principalmente, pela sua alta condutividade térmica e grande área superficial. (AHMADI NADOOSHAN; ESHGARF; AFRAND, 2018; BABARINDE; AKINLABI; MADYIRA, 2020; SALEM, 2020).

2.2 Síntese e produção de nanolubrificantes

Atualmente, existem dois métodos amplamente utilizados na literatura para síntese de nanolubrificantes, que são o método de dois passos e o método de um passo. O método de dois passos consiste em dispersar diretamente as nanopartículas na concentração desejada no lubrificante base. A dispersão é realizada através de um mecanismo físico, tais como: homogeneizador de alta pressão, agitador ultrassônico, agitador magnético, entre outros. Esses agitadores possuem alta simplicidade e baixo custo, e podem ser aplicados em larga escala. No entanto, apresentam como principal desvantagem uma baixa estabilidade de longo prazo. Para Hemmat e Esfandeh (2018), os principais fatores que devem ser observados durante a preparação de nanofluidos são: a natureza, o tipo, o tamanho das nanopartículas, o uso de surfactantes, a acidez e a temperatura. Já, no método de um passo, a produção das nanopartículas é realizada simultaneamente com a dispersão no fluido base. Como principais vantagens, tem-se a baixa aglomeração de nanopartículas e estabilidade prolongada. No entanto, este método apresenta como desvantagens o alto custo, limitação para baixas concentrações, o que inviabiliza a produção em larga escala (KHALID SHAFI; CHAROO, 2018).

Conforme mencionado anteriormente, a principal desvantagem do método de dois passos é baixa estabilidade de longo prazo do nanolubrificante. Para melhorar a estabilidade de nanolubrificante diversos pesquisadores tem sugerido o uso de surfactantes para formarem micelas reversas (GHADIMI; METSELAAR, 2013; MARTIN; OHMAE, 2008). Os surfactantes podem promover uma mudança na superfície que em alguns casos se comportam como hidrofóbica e assim gerar um aumento das forças de repulsão entre as partículas suspensa (HWANG et al., 2007). Os surfactante mais encontrados na literatura são: EDTA, Octa-dodecil Amina, Puro Etanol, Hexa-Dodecil Amina, SDS (SANTHANA KRISHNAN et al., 2018), Ácido oleico (AO) (DHAR et al., 2016), sódio cilbenzeno sulfonatos (SALEM, 2020), Triton-X 100 (CHOI et al., 2021) SDS, PVP, e CTAB (AHMED; AHAMED, 2022). Segundo Sajumon., Jubin , Sreejith, Aghil e Sreeraj (2013), o uso de surfactantes pode promover uma solução estável e permanente com baixo índice de aglomeração que irá possibilitar um longo período de uso no compressor.

Na Tabela 3 são apresentados os trabalhos sobre nanolubrificantes, dando foco na estabilidade de nanofluidos. A estabilidade é um fator fundamental no aprimoramento dos fluidos lubrificantes. Dentre os parâmetros analisados destacam-se o tempo de estabilidade (Tempo de TEST) que significa o tempo em que foi analisado na pesquisa se a amostra era estável, e o método de estabilidade (MEST de TEST) é referente ao tipo de método que foi usado para caracterizar a estabilidade do nanolubrificante.

Tabela 3 – Resumo dos métodos de preparação, surfactantes, tempos de estabilidades analisados e métodos de análise da estabilidade

Trabalho	NL	MEPR	SURF	Tempo de TEST	MEST
----------	----	------	------	---------------	------

(SANTHANA KRISHNAN et al., 2018)	Al ₂ O ₃ /POE, SiO ₂ /POE ZrO ₂ /POE, CNT/POE	ultrassom	SURF	4 dias	Visual
(SANUKRISHNA; JOSE PRAKASH, 2018)	Al ₂ O ₃ /PAG, SiO ₂ /PAG TiO ₂ /PAG	ultrassom MAG	N.U	5 dias	Spectro UV
(GILL et al., 2018)	Al ₂ O ₃ /OM, SiO ₂ /OM, TiO ₂ /OM	ultrassom	N.U	Sem EST	Sem EST
(NARAYANASARMA; KUZHIVELI, 2019)	SiO ₂ /POE	ultrassom	N.U	6 dias	Spectro UV
(ADELEKAN et al., 2019)	GR/OM	ultrassom	N.U	Sem EST	Sem EST
(MARCUCCI PICO et al., 2020)	D/POE	ultrassom	Ácido oléico	7 dias	Spectro UV
(SALEM, 2020)	MWCNT/POE	ultrassom	SURF	60 dias	Potencial zeta
(BABARINDE et al., 2020)	MWCNT/OM	ultrassom	N.U	Sem EST	Sem EST
(ABDUR RAZZAQ; AHAMED, 2020)	TiO ₂ /OM	ultrassom	N.U	60 dias	Visual
(CHOI et al., 2021)	MWCNT/POE	ultrassom	SURF	3 dias	Laser
(YOGESH JOSHI; DINESH ZANWAR; SANDEEP JOSHI, 2021)	Al ₂ O ₃ /POE Al ₂ O ₃ /OM	ultrassom	N.U	2 dias	Visual
(AHMED; AHAMED, 2022)	TiO ₂ /POE	ultrassom MAG	SURF	3 dias	Potencial zeta

Fonte: Adaptado de Science Direct. Nota: PAO: Polialfaolefina; OM: Óleo mineral; POE: Poliol éster; PAG: Polialquilenol glicol, MWCNT: Nanotubo de carbono de paredes múltiplas, GR: Grafeno, D: Diamante, NL: Nanolubrificante, MEPR: Método de produção Produção, N.U=Não utilizado, MAG=Magnético.

2.3 Propriedades termofísicas

A condutividade térmica de nanolubrificantes está diretamente relacionada com o aumento da temperatura e da concentração de nanopartículas. Pois o movimento browniano aumenta com aumento da energia pela mudança de temperatura que pode proporcionar incrementos no sistema de refrigeração, menor temperatura de descarga e maior subresfriamento (MARCUCCI PICO et al., 2020; NARAYANASARMA; KUZHIVELI, 2019; SALEM, 2020).

Alguns pesquisadores observaram que a viscosidade aumenta proporcionalmente com a concentração de nanopartículas e diminui com o aumento da temperatura, isto porque o aumento do movimento browniano que causa um desequilíbrio das forças intermoleculares que pode proporcionar uma aceleração na sedimentação das nanopartículas (MARCUCCI PICO et al., 2020; NARAYANASARMA; KUZHIVELI, 2019; SALEM, 2020).

Como um parâmetro de influência direta se tem a concentração de nanopartículas que deverá buscar a menor viscosidade, maior coeficiente de condutividade térmica, entre outros. Conforme dados mostrados na Tabela 4 que apresenta de forma resumida as principais variações na viscosidade e na condutividade térmica de nanolubrificantes reportadas nos trabalhos encontrados na literatura para diversas nanopartículas, concentrações e fluidos de base.

Tabela 4 – Resumo da viscosidade e condutividade térmica em nanolubrificantes de sistemas térmicos.

Autor	Nanolubrificante	Φ [%]	Destques
(SANUKRISHNA et al., 2018)	Al ₂ O ₃ /PAG SiO ₂ /PAG TiO ₂ /PAG	0,6%v	↑9,71% $\mu_{Al_2O_3}$, ↑10,34% μ_{SiO_2} ↑5,64% μ_{TiO_2} NT
(GILL et al., 2018)	Al ₂ O ₃ /OM, SiO ₂ /OM, TiO ₂ /OM	0,2%g/l	↑6,09% $\mu_{Ti_3O_2}$ ↑0,99% μ_{SiO_2} ↑2,75% $k_{Ti_2O_3}$ ↑0,45% k_{SiO_2}
(NARAYANASARMA; KUZHIVELI, 2019)	SiO ₂ /POE	0,01–0,2%g	↑10,89% μ , ↑10,9% k NT
(YANG et al., 2020)	GR/OM	10, 20 e 30 mg L ⁻¹	↑5,9% k
(SANUKRISHNA; PRAKASH, 2022)	GR/PAG	0.07-0.6%v	↑1,48% k ↑33% μ
(AL-JANABI; HUSSIN; ABDULLAH, 2021)	MWCNT/OM GR/OM	0.1v%	↑15% μ_{GR} ↑25% μ_{MWCNT} ↑6% k_{GR} ↑3% k_s
(SANUKRISHNA; JOSE, 2022)	CNT/PAG	0.03–0.2v%	↑1,18% k ↑55% μ
(ALJUWAYHEL et al., 2023)	D/POE	0,05 – 0,5%v	↑15,0% k ↑498% μ
(MARCUCCI PICO et al., 2017)	D/POE	0,5%g	↑11% μ , ↑11% k

Fonte: Adaptado de Science Direct. Nota: PAO: Polialfaolefina; OM: Óleo mineral; POE: Poliol éster; PAG: Polialquileno glicol, MWCNT: Nanotubo de carbono de paredes múltiplas, GR: Grafeno, D:Diamante, NT=Newtoniano.

2.4 Características tribológicas

Para Sajumon et al. (2013) o formato esférico da nanopartícula pode proporcionar o mecanismo de fricção por rolamento eficaz. A nanopartícula serve como um terceiro corpo no contato, causando a redução do contato direto do corpo e contra corpo. Este processo de tribosinterização forma um filme protetor na superfície de desgaste e reduz o efeito do atrito. Em estudo recente SANUKRISHNA et al. (2018) foi reportado que para a concentração (Φ [%]) de 0,4%v em PAG/SiO₂, PAG/TiO₂ e PAG/Al₂O₃ encontrou uma redução do COF de 23,8%, 15,8% e 2,3% e no teste de desgaste que foi realizado do tipo esfera e superfície, PAG/SiO₂ e PAG/TiO₂ apresentaram diâmetro marca de desgaste de 36% e 22,5% menor que o lubrificante puro e PAG/Al₂O₃ produz um efeito prejudicial à superfície isso se dá por conta que a nanopartícula de Al₂O₃ tem natureza abrasiva principalmente quando está na forma aglomerada. Para outro tipo de nanolubrificante se tem PAG/Al₂O₃ Φ [%] de 0,01%v, COF médio com redução de 2,14% e no teste de desgaste que foi realizado do tipo simulação anel do pistão e camisa do cilindro, encontrou um desgaste reduzido médio de 17,67% (AMINULLAH et al., 2018), POE/SiO₂, Φ [%] de 0,15%g, COF com redução de 36% e desgaste reduzido de 27% (NARAYANASARMA; KUZHIVELI, 2019).

Conforme mostrado na Tabela 5 para melhorar sua parte tribológica está diretamente ligado a natureza (tipo e tamanho), concentração de nanopartícula que podem influenciar os parâmetros tribológicos de forma

positiva ou negativa.

Tabela 5 – Nanolubrificantes e características tribológicas

Autor	Nanolubrificantes	Φ [%]	MET EXP	Destaques
(SANUKRISHNA et al., 2018)	PAG/SiO ₂ , PAG/TiO ₂ PAG/Al ₂ O ₃	0,4%v	Esfera- superfície	↓23,8%COF ↓15,8%COF ↓2,3%COF ↓36% DE ↓22,5,8%DE
(AMINULLAH et al., 2018)	PAG/Al ₂ O ₃	0,01%v	AN-CC	↓2,14% COF médio ↓17,64% DE médio
(NARAYANASARMA; KUZHIVELI, 2019)	POE/SiO ₂	0,15%g	-----	↓36%COF ↓27% DE
(YANG et al., 2020)	GR/OM	10, 20 e 30 mg L ⁻¹	TEFR-4-ES	↓17,5%COF

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Nota: MET EXP: Método experimental, MEN FA DES: Menor faixa de desgaste, COF=Coeficiente de Atrito, DE=Desgaste, AN= Anel do pistão, CC= Camisa do cilindro, TEFR-4-ES=Testador de atrito de quatro esferas.

3 Nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração

Diversos trabalhos encontrados na literatura têm apresentado resultados promissórios quanto à utilização de nanolubrificante, principalmente relacionados ao aumento da eficiência do compressor, à diminuição das quedas de pressão, ao aumento do coeficiente de desempenho e à melhora da transferência de calor nos trocadores. Santhana Krishnan et al. (2018) utilizaram o nanolubrificante SiO₂/POE com uma concentração (Φ [%]) 0,1%v e encontrou um aumento do coeficiente de desempenho (COP) de 21,83%. Sanukrishna et al. (2018) utilizaram uma mistura de R-123/R134a com Al₂O₃/PAG nas concentração de 0,07-0,6%v e obtiveram aumentos nos coeficientes de transferência de calor de 1,38%, 1,31% e 1,48%. Marcucci Pico et al. (2019) aplicaram nanolubrificantes de Diamante/POE nas concentrações de 0,1-0,5% m/m com aumentos da capacidade de refrigeração 4,2% e 7% e a aumento do COP de 4% e 8%. Salem (2020) utilizaram R-134a com MWCNT/POE na Φ [%] de 0,5% relatando um aumento do COP em 37%. Abdur e Ahamed (2020) utilizaram R-22 e R-600a (blend) com TiO₂/OM na Φ [%] 0,1-0,4%v observando aumentos do COP de 10% e 19%. Choi et al. (2021) R-134a com MWNCT/POE na re Φ [%] de 0,5% aumento do COP em 17% e aumento coeficiente de transferência de calor(h) em 5,8%. Madyira; Babarinde; Mashinini (2022) utilizando R-600a com Grafeno/POE na Φ [%] 0,2-0,6%g tendo aumento da aumentos da capacidade de refrigeração de 5,2% a 14,2% e redução do consumo de potência(W) em 8,8% a 26,4%. Ahmed e Ahamed (2022) com R22, R32 (blend1) e R32, R-600a (blend 2) TiO₂/POE na Φ [%] 0,01-0,02%v observando aumento do COP em 25%-60% (para o blend 1) e 20%-30% (para o blend 2). Tabela 5 mostrar de forma resumida essas informações localizadas relacionadas ao nanolubrificante em sistemas de refrigeração.

Tabela 5 – Nanolubrificantes em sistemas térmicos

Trabalho	Refrigerante	Nanopartícula	[%]	Ganhos encontrados
(SANTHANA KRISHNAN et al., 2018)	R-134a	SiO ₂	0,1% v/m	↑21,83% COP
(SANUKRISHNA; PRAKASH, 2018b)	R-123/R-134a	TiO ₂ , SiO ₂ , Al ₂ O ₃	0,07-0,6% v	↑1,38%h _{TiO₂} ↑1,31%h _{SiO₂} ↑1,48%h _{Al₂O₃}
(MARCUCCI PICO et al., 2019)	R-410 ^a	Diamante	0,1-0,5% g/l	↑4,2%Qc e ↑7%Qc ↑4% COP e ↑8% COP
(SALEM, 2020)	R-134 ^a	MWCNT	0,5%	↑37% COP
(ABDUR RAZZAQ; AHAMED, 2020)	R-22 R-600a (blend)	TiO ₂	0,1-0,4% v	↑10% COP e ↑19% COP
(CHOI et al., 2021)	R-134a	MWNCT	1,0%	↑5,8%h ↓17% PC
(MADYIRA; BABARINDE; MASHININI, 2022)	R-600a	Grafeno	0,2-0,6% g	↑5,2-14,2% Qc ↓8,8-26,4% PC
(AHMED; AHAMED, 2022)	R22, R32 (blend 1) R32, R-600a (blend 2)	TiO ₂	0,01- 0,02% v	↑25% COP e ↑60% COP (blend 1) ↑20% COP e ↑30% COP (blend 2)

Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Nota: COP: Coeficiente de desempenho, h: coeficiente de transferência de calor, Qc: capacidade de refrigeração, PC: consumo de potência do compressor.

4 CONCLUSÕES

Muitos estudos foram encontrados sobre nanolubrificantes, quando se observa a quantidade de estudos direcionados a nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração, se tem uma alta redução. Conclui-se que, por ser uma área multidisciplinar se deve fazer um estudo sendo considerado o tipo, quantidade, forma da nanopartícula, quantificar os parâmetros possíveis do comportamento tribológico, propriedades termofísicas, energia do sistema, eficiência, temperaturas e perdas de pressão.

Nas propriedades termofísicas ao se aumentar a contração de nanopartículas a condutividade térmica e a viscosidades são aumentadas. Independentemente do tipo de nanopartícula e o tipo de fluido base.

As características tribológicas tem uma relação direta com a natureza (tamanho e tipo) e forma da nanopartícula. Partículas abrasivas em determinadas concentrações podem deteriorar o equipamento. Partículas esféricas podem melhorar as propriedades tribológicas.

Os nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração neste estudo demonstraram que nanopartículas de carbono melhoram o sistema, mesmo em baixas contrações.

Nanopartículas de grafeno tem a maior condutividade comparado as outras nanopartículas, portanto pode ser feito um estudo da sua aplicação com a mínima concentração possível, surfactante mínimo e máximos ganhos ao sistema.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o suporte dado à essa pesquisa pelas entidades de fomento CNPq, FAPEMIG e CAPES.

REFERÊNCIAS

ABDUR RAZZAQ, M. E.; AHAMED, J. U. Thermodynamic analysis of an air conditioner using R22/HC blend with TiO₂/Mineral oil nanolubricant to retrofit R22/POE oil. **Results in Engineering**, v. 8, n. May, 2020.

ADELEKAN, D. S. et al. Performance of an Iso-Butane Driven Domestic refrigerator infused with various concentrations of Graphene based Nanolubricants. **Procedia Manufacturing**, v. 35, p. 1146–1151, jan. 2019.

AHMADI NADOOSHAN, A.; ESHGARF, H.; AFRAND, M. Measuring the viscosity of Fe₃O₄-MWCNTs/EG hybrid nanofluid for evaluation of thermal efficiency: Newtonian and non-Newtonian behavior. **Journal of Molecular Liquids**, v. 253, p. 169–177, mar. 2018.

AHMED, M. I.; AHAMED, J. U. TiO₂ nanolubricant: An approach for performance improvement in a domestic air conditioner. **Results in Materials**, v. 13, p. 100255, mar. 2022.

AL-JANABI, A. S.; HUSSIN, M.; ABDULLAH, M. Z. Stability, thermal conductivity and rheological properties of graphene and MWCNT in nanolubricant using additive surfactants. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 28, n. August, p. 101607, 2021.

ALI, I. et al. Advances in carbon nanomaterials as lubricants modifiers. **Journal of Molecular Liquids**, v. 279, p. 251–266, 2019.

ALJUWAYHEL, N. F. et al. Experimental investigation of thermophysical properties, tribological properties and dispersion stability of nanodiamond-based nanolubricant for air conditioning systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 145, n. September 2022, p. 325–337, 2023.

AMINULLAH, A. R. M. et al. Tribology investigation of automotive air condition (AAC) compressor by using Al₂O₃/PAG nanolubricant. **Journal of Mechanical Engineering**, v. 5, n. 1, p. 49–61, 2018.

BABARINDE, T. O. et al. Enhancing the energy efficiency of vapour compression refrigerator system using R600a with graphene nanolubricant. **Energy Reports**, v. 6, p. 1–10, 2020.

BABARINDE, T. O.; AKINLABI, S. A.; MADYIRA, D. M. Energy performance evaluation of R600a/MWCNT-nanolubricant as a drop-in replacement for R134a in household refrigerator system. **Energy Reports**, v. 6, p. 639–647, fev. 2020.

CHOI, T. J. et al. Effect of polyolester oil-based multiwalled carbon-nanotube nanolubricant on the coefficient of performance of refrigeration systems. **Applied Thermal Engineering**, v. 192, p. 116941, jun. 2021.

DHAR, P. et al. Superior dielectric breakdown strength of graphene and carbon nanotube infused nano-oils. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 23, n. 2, p. 943–956, 2016.

GHADIMI, A.; METSELAAR, I. H. The influence of surfactant and ultrasonic processing on improvement of stability, thermal conductivity and viscosity of titania nanofluid.

Experimental Thermal and Fluid Science, v. 51, p. 1–9, 2013.

GILL, J. et al. Energetic and exergetic analysis of a domestic refrigerator system with LPG as a replacement for R134a refrigerant , using POE lubricant and mineral oil based TiO₂ - , SiO₂ - and Al₂O₃ -lubricants Analyse énergétique et exergétique d ' un réfrigérate. **International Journal of Refrigeration**, v. 91, p. 122–135, 2018.

HWANG, Y. et al. Stability and thermal conductivity characteristics of nanofluids. **Thermochimica Acta**, v. 455, n. 1–2, p. 70–74, 2007.

KHALID SHAFI, W.; CHAROO, M. S. "NanoLubrication Systems: An Overview". **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 9, p. 20621–20630, jan. 2018.

MADYIRA, D. M.; BABARINDE, T. O.; MASHININI, P. M. Performance improvement of R600a with graphene nanolubricant in a domestic refrigerator as a potential substitute for R134a. **Fuel Communications**, v. 10, p. 100034, mar. 2022.

MANG, T.; DRESEL, W. **Lubricants and lubrication**. 2nd Ed ed. [s.l: s.n.].

MARCUCCI PICO et al. Transport Properties of Nanolubricants Based in Polyolester Refrigeration Oil and Diamond Nanoparticles. p. 14–17, 2017.

MARCUCCI PICO, D. F. et al. Performance evaluation of diamond nanolubricants applied to a refrigeration system. **International Journal of Refrigeration**, v. 100, p. 104–112, abr. 2019.

MARCUCCI PICO, D. F. et al. Experimental study on thermal and tribological performance of diamond nanolubricants applied to a refrigeration system using R32. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 152, p. 119493, 2020.

MARTIN, J. M.; OHMAE, N. **NANOLUBRICANTS**. John Wiley ed. West Sussex, England: [s.n.]. v. 95

NARAYANASARMA, S.; KUZHIVELI, B. T. Evaluation of the properties of POE/SiO₂ nanolubricant for an energy-efficient refrigeration system – An experimental assessment. **Powder Technology**, v. 356, p. 1029–1044, nov. 2019.

OSAMA, M. et al. Physical properties optimization of POME-groundnut-naphthenic based graphene nanolubricant using response surface methodology. **Journal of Cleaner Production**, v. 193, p. 277–289, 2018.

SAI PINNI, K.; KATARKAR, A. S.; BHAUMIK, S. A review on the heat transfer characteristics of nanomaterials suspended with refrigerants in refrigeration systems. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 1331–1335, 2021.

SAID, Z. et al. Recent advances on the fundamental physical phenomena behind stability, dynamic motion, thermophysical properties, heat transport, applications, and challenges of nanofluids. **Physics Reports**, v. 946, p. 1–94, 2021.

SAJUMON.K.T, JUBIN V JOSE, SREEJITH S, AGHIL V MENON, SREERAJ KURUP P N, S. S. PERFORMANCE ANALYSIS OF NANOFUID BASED LUBRICANT. **International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology**, v. 2, n. December, 2013.

SALEM, M. R. Performance enhancement of a vapor compression refrigeration system using R134a/MWCNT-oil mixture and liquid-suction heat exchanger equipped with twisted tape turbulator. **International Journal of Refrigeration**, v. 120, p. 357–369, 2020.

SANTHANA KRISHNAN, R. et al. Analysis and Feasibility of Nano-Lubricant in Vapour Compression Refrigeration System. **Materials Today: Proceedings**, v. 5, n. 9, p. 20580–20587, jan. 2018.

SANUKRISHNA, S. S. et al. Effect of oxide nanoparticles on the thermal , rheological and tribological behaviours of refrigerant compressor oil : An experimental investigation Étude expérimentale sur l ' effet des nanoparticules d ' oxyde sur le comportement thermique , rhéologique. **International Journal of Refrigeration**, v. 90, p. 32–45, 2018.

SANUKRISHNA, S. S.; JOSE PRAKASH, M. Thermal and rheological characteristics of refrigerant compressor oil with alumina nanoparticles—An experimental investigation. **Powder Technology**, v. 339, p. 119–129, 2018.

SANUKRISHNA, S. S.; JOSE, V. M. Evaluation of thermal and rheological characteristics of CNT-PAG nanolubricant for the development of energy efficient refrigeration systems. **Materials Today: Proceedings**, v. 58, p. 114–120, 2022.

SANUKRISHNA, S. S.; PRAKASH, M. J. Thermal and rheological characteristics of refrigerant compressor oil with alumina nanoparticles — An experimental investigation. **Powder Technology**, v. 339, p. 119–129, 2018a.

SANUKRISHNA, S. S.; PRAKASH, M. J. Experimental studies on thermal and rheological behaviour of TiO₂-PAG nanolubricant for refrigeration system Études expérimentales du comportement rhéologique et thermique du nanolubrifiant Tio₂ - PAG pour les systèmes frigorifiques. **International Journal of Refrigeration**, v. 86, p. 356–372, 2018b.

SANUKRISHNA, S. S.; PRAKASH, M. J. Exploiting the thermal and rheological potentials of graphene-PAG nanolubricant for the development of energy efficient refrigeration systems. **Materials Today: Proceedings**, v. 59, p. 7–14, 2022.

WHITE, D. et al. Microtribological behavior of Mo and W nanoparticle/graphene composites. **Wear**, v. 414–415, p. 310–316, nov. 2018.

YANG, S. et al. Study on the effect of graphene nanosheets refrigerant oil on domestic refrigerator performance. **International Journal of Refrigeration**, v. 110, p. 187–195, 2020.

YOGESH JOSHI; DINESH ZANWAR; SANDEEP JOSHI. Performance investigation of vapor compression refrigeration system using R134a and R600a refrigerants and Al₂O₃ nanoparticle based suspension. **Materials Today: Proceedings**, v. 44, p. 1511–1519, jan. 2021.

ZAWAWI, N. N. M.; AZMI, W. H.; GHAZALI, M. F. Tribological performance of Al₂O₃–SiO₂/PAG composite nanolubricants for application in air-conditioning compressor. **Wear**, v. 492–493, p. 204238, mar. 2022.

ZHAI, W. et al. Carbon nanomaterials in tribology. **Carbon**, v. 119, p. 150–171, 2017.

ZHU, Y.; XIA, S.; SHI, Z. Research on the Effect of Nano-materials Used in Rotary Compressor. 2010.