

IZAAQUE ANICETO MACEDO

**APLICAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO
COMO ADITIVO DE LUBRIFICANTE POE EM UM
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

2025

IZAAQUE ANICETO MACEDO

**APLICAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO
COMO ADITIVO DE LUBRIFICANTE POE EM UM
SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO**

Dissertação apresentada ao Programa de
Pós-graduação em Engenharia Mecânica da
Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos
requisitos para a obtenção do título de **MESTRE**
EM ENGENHARIA MECÂNICA

Área de concentração: Transferência de calor e
Mecânica dos fluidos

Orientador: Prof. Dr. Valério Luiz Borges.

UBERLÂNDIA – MG

2025

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

M141 Macedo, Izaaque Aniceto, 1995-
2025 APLICAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS DE GRAFENO COMO ADITIVO
DE LUBRIFICANTE POE EM UM SISTEMA DE REFRIGERAÇÃO
[recurso eletrônico] / Izaaque Aniceto Macedo. - 2025.

Orientador: Valério Luiz Borges.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Uberlândia,
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
DOI <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2025.470>
Inclui bibliografia.
Inclui ilustrações.

I. Engenharia mecânica. I. Borges, Valério Luiz,1979-, (Orient.).
II. Universidade Federal de Uberlândia. Pós-graduação em
Engenharia Mecânica. III. Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091

Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074

FOLHA DE APROVAÇÃO



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA

Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia

Mecânica

Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902

Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica			
Defesa de:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 663, PPGEM			
Data:	10/07/2025	Hora de início:	08:30	Hora de encerramento:
Matrícula do Discente:	12222EMC001			
Nome do Discente:	Izaaque Aniceto Macedo			
Título do Trabalho:	Aplicação de nanopartículas de grafeno como aditivo de lubrificante poe em um sistema de refrigeração			
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos			
Linha de pesquisa:	Dinâmica dos Fluidos e Transferência de Calor			
Projeto de Pesquisa de vinculação:	Não se aplica			

Reuniu-se por videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Prof. Dr. Luben Cabezas Gómez - USP; Prof. Dr. Solidônio Rodrigues de Carvalho - UFU e Prof. Dr. Valério Luiz Borges - UFU; orientador do candidato.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Valério Luiz Borges, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu ao Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação do Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir, o senhor presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos examinadores, que passaram a arguir o candidato. Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o candidato:

Aprovado.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Mestre.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar, foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Luben Cabezas Gómez, Usuário Externo**, em 10/07/2025, às 10:23, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Valério Luiz Borges, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/07/2025, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 10/07/2025, às 10:24, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site
https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **6442164** e o código CRC **4244FA29**.

Referência: Processo nº 23117.042133/2025-16

SEI nº 6442164

DEDICATÓRIA

Agradeço à minha família que me apoiou e encorajou, especialmente aos meus pais, meus irmãos e minha namorada Marcela, por essa conquista.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais que desde a minha graduação me apoiaram e incentivaram para estudar mesmo longe de casa, seja com apoio na forma financeira, como com palavras de força e sendo um porto seguro na minha vida.

À minha namorada Marcela dos Santos Silva que durante todo o processo esteve comigo me apoiando, ajudando e me dando forças para realizar todas as tarefas e atividades, sendo parte essencial para essa conquista.

Ao Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, pela confiança, orientação, oportunidade e prontidão, permitindo desenvolver o trabalho com maior nível científico que já foi feito por mim até o momento.

Aos meus amigos colombianos Yeyner Carillo, Daniel Susa, Frank Willians e Richard Hernandez, meus sinceros agradecimentos pelo acolhimento, ajuda durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho, assim como na vida pessoal.

À toda equipe do LESTnano pelo apoio e ajuda durante todo o processo de desenvolvimento deste trabalho. Principalmente ao Pedro Henrique Silva Santos por ter sido um excelente companheiro de trabalho e peça fundamental neste projeto, na implementação e na construção da bancada experimental, quero dar os meus mais sinceros agradecimentos. Além disso, quero agradecer ao Prof. Dr. Gleyzer Martins, Carolina Beicker, Vítor Rosan Bandarra e Filipe Santos, pela ajuda no desenvolvimento de algumas etapas deste trabalho. Também um agradecimento especial ao Erick Oliveira do Nascimento pela ajuda ao meu desenvolvimento científico, pela prontidão, pelas dúvidas sanadas durante a realização deste trabalho e por sua disponibilidade durante este trabalho.

Ao David Fernando Marcucci Pico por durante todo o processo de desenvolvimento ter sido uma peça fundamenta para desenvolvimento do trabalho, pela sua ajuda em direcionamento para atividades, dúvidas, disponibilidade para construção de processos e correções necessárias, logo desejo meus sinceros agradecimentos por tudo que foi realizado e feito por mim proporcionando o meu crescimento científico e melhoria da minha capacidade de escrita.

Ao técnico Jonas que mesmo não fazendo parte do LESTnano, foi peça fundamental para o desenvolvimento deste trabalho, ajudando no desenvolvimento de peças e na fabricação de componentes.

Às empresas CAREL, Tecumseh, RAC, BRAHEX e GERDAU GRAPHENE pelo fornecimento da válvula de expansão, sensores de pressão, compressores e dos óleos lubrificantes, visor de líquido, trocador de placas brasadas, nanopartículas de grafeno utilizados para o desenvolvimento desta pesquisa.

À Fundação de Amparo e Pesquisa do Estado de Minas Gerais, FAPEMIG, pelo apoio financeiro fornecido por meio da bolsa de estudos.

À Universidade Federal de Uberlândia e, especialmente, ao programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica.

MACEDO, I. A., **Aplicação de nanopartículas de grafeno como aditivo de lubrificante POE em um sistema de refrigeração.** 2025. 124 f. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Minas Gerais, Brasil.

Resumo

O presente trabalho aborda a aplicação de nanolubrificantes à base de grafeno em sistemas de refrigeração, com o objetivo de avaliar os principais efeitos provocados por sua utilização. Para isto foi desenvolvido uma bancada experimental de refrigeração que projetada para minimizar interferências de fatores externos, aplicando técnicas e equipamentos que possam mitigar esses efeitos. Entre as medidas adotadas, destacam-se aplicação de trocadores de placas nos evaporadores e condensadores, a implementação de um sistema secundário de controle de cargas térmicas, isolamento térmico, aplicação de sensores de temperatura, aplicação de sistema de controle. Tendo como propósito central o foco nos parâmetros como capacidade de refrigeração do sistema, a potência consumida pelo compressor, o coeficiente de desempenho (COP), as temperaturas de descarga, superficial e cárter do compressor, sob a aplicação de nanolubrificantes de grafeno nas concentrações mássicas de 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1%. Foram realizados teste com fluido refrigerante R290, variando-se a temperatura de evaporação entre -10 °C e 5 °C, a temperatura de condensação entre 30 °C e 50 °C, e com um superaquecimento fixo de 10 K. Além disso, foram realizados ensaios laboratoriais das propriedades termofísicas dos nanolubrificante de grafeno, como massa específica, viscosidade e condutividade térmica. Por meio dos resultados obtidos, foi possível concluir que, em determinadas condições, a utilização de nanolubrificantes promoveu aumentos na capacidade de refrigeração e no coeficiente de desempenho, além de reduções na potência consumida. Também foram observados, em algumas situações, aumentos nas temperaturas de descarga e superficial do compressor, bem como reduções na temperatura do cárter.

MACEDO. I. A., **Application of graphene nanoparticles as a POE lubricant additive in a refrigeration system.** 2025. 124 p. M. Sc. Dissertation, Universidade Federal de Uberlândia, Minas Gerais,

Brazil..

Abstract

This study investigates the application of graphene-based nanolubricants in refrigeration systems, aiming to assess their primary effects on system performance. To achieve this, a dedicated experimental refrigeration bench was developed, specifically designed to minimize external interferences by incorporating advanced techniques and components to mitigate such influences. Key features include the use of plate heat exchangers for both evaporators and condensers, the integration of a secondary thermal load control system, thermal insulation, temperature sensors, and an automated control system. The experimental analysis focused on critical performance parameters, including cooling capacity, compressor power consumption, coefficient of performance (COP), discharge temperature, compressor shell surface temperature, and oil sump (crankcase) temperature. Graphene nanolubricants were tested at mass concentrations of 0.005%, 0.01%, 0.05%, and 0.1%, using R290 refrigerant under varying operating conditions: evaporation temperatures from -10 °C to 5 °C, condensation temperatures from 30 °C to 50 °C, and a fixed superheat of 10 K. In addition, the thermophysical properties of the graphene nanolubricants, such as density, viscosity, and thermal conductivity, were characterized through laboratory testing. The results show that, under certain conditions, the use of nanolubricants led to increases in cooling capacity and coefficient of performance, as well as reductions in power consumption. In some situations, increases in compressor discharge and surface temperatures, as well as reductions in crankcase temperature, were also observed.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Esquema de um sistema de refrigeração por compressão a vapor. Adaptado de Ling; Hwang; Radermacher (2005).....	6
Figura 2.2 – Esquema do diagrama $\ln(P)$ - h com os pontos de estado de um ciclo de compressão de vapor sobrepostos. Adaptado de Ling; Hwang; Radermacher (2005).....	7
Figura 2.3 – Gráfico de absorção de água (higroscopicidade) por óleos de refrigeração. Adaptado de Mang (2014).....	11
Figura 2.4 – Diagrama esquemático para evacuação de um sistema de refrigeração. Adaptado de Brasil (2017)	12
Figura 2.5 – Gráfico de pesquisas encontradas no Science Direct com nanolubrificantes. Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Science Direct, 2024	13
Figura 2.6 – Diagrama esquemático de componentes dos nanolubrificantes. Fonte: Adaptado de Khalid; Shafi; Charoo (2018).	14
Figura 2.7 – O mecanismo do surfactante CTAB ligando às nanopartículas de GR e formando uma micela. Fonte: Adaptado de Al-Janabi et al. (2022).	16
Figura 2.8 – Processo de preparação para amostras de nanolubrificantes. Fonte: Adaptado de Al-Janabi et al. (2022).	17
Figura 2.9 – Comparaçao das taxas de resfriamento das embalagens M no congelador. Fonte: Adaptado de Yang et al. (2020).....	40
Figura 2.10 – (a) Incremento do COP (%) e (b) redução da potência consumida (%) em função da concentração mássica (%w.t.) de nanopartículas.....	43
Figura 3.1 – Imagens SEM do grafeno tipo A0 investigado em 3 níveis de ampliação diferentes. a) Escala 40 μm . b) Escala 5 μm . c) Escala 2 μm . Fonte: Adaptado de Tomanik et al., (2023).	48
Figura 3.2 – Síntese dos nanolubrificantes: (1) Cálculo da quantidade em massa; (2) Pesagem dos materiais; (3) Processo de mistura com agitado magnético; (4) Processo de mistura com agitador ultrassônico; (5) Mistura final dos nanolubrificantes.....	50
Figura 3.3 – Equipamento espectrofotômetro da marca Shimadzu, modelo UV-1900.....	51
Figura 3.4 – Equipamento Viscosímetro do tipo Stabinger da marca Anton Paar, modelo SVM-3000.	52
Figura 3.5 – Diagrama esquemático da montagem experimental para medição da condutividade térmica dos nanolubrificantes.....	53

Figura 3.6 – Diagrama esquemático da bancada de refrigeração.....	57
Figura 3.7 – Compressor alternativo AE4435U-AA1A. Fonte: Catálogo do fabricante.	59
Figura 3.8 – Trocadores de placas brasados Brahex. a) Evaporador PHE P1S. b) Condensador PHE P0S. Fonte: www.brahex.com.br/brasados.html	60
Figura 3.9 – Sistema de controle dispositivo de expansão eletrônica Carel. a) Valvula de expansão eletrônica. b) Driver EVD0000T50. c) Sensor de pressão ratriométrico. d) Sensor de temperatura de contato NTC. Fonte: www.carel.com.br	61
Figura 3.10 – Componentes dos sistemas auxiliares do evaporador e condensador. a) Galão de 20 L. b) Bomba d’água. c) Sensor de vazão de água. d) Resistência de aquecimento. Fonte: Catálogo dos fabricantes.....	61
Figura 3.11 – Dispositivos para verificar e eliminar umidade do sistema. a) Visor de líquido. b) Filtro secador. Fonte: Catálogo dos fabricantes.	62
Figura 3.12 – Dispositivos de segurança pressostato de alta e baixa, Danfoss, modelo KP15. Fonte: www.store.danfoss.com	63
Figura 3.13 – Diagrama elétrico da ligação dos componentes da bancada experimental.	64
Figura 3.14 – Projeto final da bancada experimental. a) Vista frontal. b) Vista Isométrica. ...	65
Figura 3.15 – Posicionamento dos termopares na bancada experimental. a) Posicionamento pretendido. b) Aplicação na bancada experimental.....	66
Figura 3.16 – Programa em Labview para controle, monitoramento e aquisição de dados da bancada experimental.	68
Figura 3.17 – Bancada experimental de refrigeração construída para o desenvolvimento deste trabalho. a) Vista isométrica. b) Vista frontal.	69
Figura 4.1 – Gráficos da variação do pico de absorbância pelo tempo de nanopartícula do tipo 1. a) Durante 20 dias com variação a cada um dia. b) Durante 6 meses com variação a cada 10 dias.....	76
Figura 4.2 – Sedimentação do Grafeno com o Tempo de nanopartículas do Tipo 1. a) Amostra 1.1 com concentração de 0,005%. b) Amostra 1.2 com concentração de 0,01%. c) Amostra 1.3 com concentração de 0,05%. d) Amostra 1.4 com concentração de 0,1%.....	77
Figura 4.3 – Gráficos da variação do pico de absorbância pelo tempo de nanopartícula do Tipo 2. a) Durante 20 dias com variação a cada um dia. b) Durante 6 meses com variação a cada 10 dias.....	78

Figura 4.4 – Sedimentação do Grafeno com o Tempo de nanopartículas do Tipo 2. a) Amostra 2.1 com concentração de 0,005%. b) Amostra 2.2 com concentração de 0,01%. c) Amostra 2.3 com concentração de 0,05%. d) Amostra 2.4 com concentração de 0,1%.....	78
Figura 4.5 – Gráficos da variação do pico de absorbância pelo tempo de nanopartícula do Tipo 3. a) Durante 20 dias com variação a cada um dia. b) Durante 6 meses com variação a cada 10 dias.....	79
Figura 4.6 – Sedimentação do Grafeno com o Tempo de nanopartículas do Tipo 3. a) Amostra 3.1 com concentração de 0,005%. b) Amostra 3.2 com concentração de 0,01%. c) Amostra 3.3 com concentração de 0,05%. d) Amostra 3.4 com concentração de 0,1%.....	80
Figura 4.7 – Gráficos comparativos da estabilidade dos nanolubrificantes. a) Amostras com concentração de 0,005%. b) Amostras com concentração de 0,01%. c) Amostras com concentração de 0,05%. d) Amostra com concentração de 0,1%.....	81
Figura 4.8 – Gráficos da massa específica dos nanolubrificantes. a) Amostras com nanopartículas do Tipo 1. b) Amostras com nanopartículas do Tipo 2. c) Amostras com nanopartículas do Tipo 3.....	82
Figura 4.9 – Gráficos da viscosidade dinâmica dos nanolubrificantes. a) Amostras com nanopartículas do Tipo 1. b) Amostras com nanopartículas do Tipo 2. c) Amostras com nanopartículas do Tipo 3.....	84
Figura 4.10 – Gráficos da validação dos dados da condutividade térmica do óleo base POE.	85
Figura 4.11 – Gráficos da condutividade térmica do óleo base POE e os nanolubrificantes..	87
Figura 4.12 – Gráficos da vazão mássica da bancada de experimental de refrigeração com R290 operando apenas com óleo base POE.....	88
Figura 4.13 – Gráficos da Capacidade de refrigeração pela temperatura de evaporação.....	89
Figura 4.14 – Gráficos da capacidade de refrigeração do fluido refrigerante R290 medida com relação a capacidade de refrigeração do na linha da mistura de etanol e água.....	90
Figura 4.15 – Capacidade de refrigeração com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.	94
Figura 4.16 – Potência consumida do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.....	98

Figura 4.17 – Coeficiente de desempenho (COP) com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.....	101
Figura 4.18 – Temperatura de descarga do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.....	103
Figura 4.19 – Temperatura superficial do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.....	104
Figura 4.20 – Temperatura de cárter do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.....	105

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Tabela de comparação de parâmetro R290 e R22	8
Tabela 2.2 – Tabela de cronograma de eliminação do consumo de HCFCs.....	10
Tabela 2.3a – Tabela de resumo de trabalhos da viscosidade em nanolubrificantes.....	27
Tabela 2.4a – Tabela de resumo de trabalhos da condutividade térmica em nanolubrificantes.	
.....	34
Tabela 2.5a – Tabela de resumo de trabalhos da utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração.....	44
Tabela 3.1 – Tabela de parâmetros da síntese, definidos com base na revisão bibliográfica...50	
Tabela 3.2 – Tabela de Condições de operação para o equipamento.	56
Tabela 3.3 – Tabela de valores para equipamentos de sistema de refrigeração por compressão a vapor.	56
Tabela 3.4 – Tabela de faixas de operações das condições de operação e dos equipamentos do sistema de refrigeração por compressão a vapor.	58
Tabela 3.5 – Tabela de módulos e instrumentos da bancada experimental de refrigeração....68	
Tabela 3.6 – Tabela das condições de testes da bancada experimental.....	72
Tabela 3.7 – Incertezas associadas às variáveis diretas.....	73
Tabela 3.8 – Incertezas associadas às variáveis calculadas.....	74
Tabela 4.1 – Tabela das viscosidades cinemáticas dos testes para validação pela norma ASTM D-2422 –97.....	84
Tabela A.1a – Tabela de resumo de trabalhos com nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração por compressão a vapor.....	119
Tabela B.1 – Curvas de calibração dos sensores termopar tipo t para medição da temperatura	122
Tabela B.2 – Curvas de calibração dos sensores de temperatura RTD- PT 100 localizados no	123
Tabela B.3 – Curvas de calibração dos sensores de temperatura RTD- PT 100 localizados no	123
Tabela B.4 – Curvas de calibração dos sensores de pressão piezo resistivos.	123
Tabela B.5 – Curvas de calibração dos medidores de vazão tipo coriolis e de fluxo de água.	
.....	123

LISTA DE SÍMBOLOS

Arábicos

BE	Balanço de energia
Cp	Calor específico de uma substância [kJ/(kg · K)]
h	Entalpia [kJ/(kg · K)]
I	Incremento relativo de uma propriedade
k	Condutividade térmica [W/(m · K)]
k_{fb}	Condutividade térmica do fluido base [W/(m · K)]
k_{np}	Condutividade térmica da nanopartícula [W/(m · K)]
k_r	Razão entre a condutividade térmica do nanolubrificante sobre a do fluido base
m	Massa [kg]
m_{fb}	Massa do fluido base [kg]
m_{np}	Massa de nanopartículas [kg]
\dot{m}	Vazão mássica de fluido refrigerante [kg/s]
\dot{m}_{EA-H_2O}	Vazão mássica da mistura de etanol e água [kg/s]
P	Pressão absoluta [bar]
\dot{Q}_{evap}	Capacidade de refrigeração [W]
$\dot{Q}_{evap,EA-H_2O}$	Capacidade de Refrigeração [W]
T	Temperatura [°C]
T_{EVAP}	Temperatura de evaporação [°C]
U	Incerteza expandida
\dot{W}_{comp}	Potência consumida pelo compressor [W]
x	Título, propriedade termodinâmica [-]
X	Propriedade a ser avaliada

Gregos

μ	Viscosidade dinâmica [mPa · s]
μ_{fb}	Viscosidade dinâmica do fluido base [mPa · s]

μ_{nf}	Viscosidade dinâmica do nanolubrificante [mPa · s]
ρ	Massa específica [kg/m^3]
ρ_{fb}	Massa específica do fluido base [kg/m^3]
ρ_{np}	Massa específica da nanopartícula [kg/m^3]
Φ	Concentração de nanopartículas
φ_v	Concentração volumétrica de nanopartículas
ϕ_m	Concentração em massa de nanopartículas

Siglas

ASHRAE	Sociedade Americana de Engenheiros do Setor de Aquecimento, Refrigeração e Ar-Condicionado
CFC	Clorofluorcarbonos
COP	Coeficiente de desempenho
EPE	Empresa de Pesquisa Energética
GWP	Potencial de aquecimento global
GR	Grafeno
HFC	Hidrofluorcarbono
HCFC	Hidroclorofluorcarbono
ISO	Organização Internacional de Normalização
LESTnano	Laboratório de energia, sistemas térmicos e nanotecnologia
ODP	Potencial de destruição de ozônio
OM	Óleo mineral
PAG	Polialquileno glicol
PAO	Polialfaolefina
PPH	Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial
POE	Polioléster
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

SUMÁRIO

CAPÍTULO I	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Estrutura da dissertação	3
CAPÍTULO II.....	5
2.1 Sistemas de refrigeração com compressão a vapor	5
2.1.1 Fluido refrigerante R290	8
2.1.2 Lubrificante sintético polioléster (POE).....	10
2.2 Nanolubrificantes.....	12
2.3 Sínteses e métodos para análises de estabilidade dos nanolubrificantes	17
2.4 Propriedades termofísicas de nanolubrificantes	21
2.4.1 Massa específica	21
2.4.2 Viscosidade.....	23
2.4.3 Condutividade térmica.....	30
2.5 Utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração.....	37
CAPÍTULO III	48
3.1 Síntese dos nanolubrificantes e estabilidade	48
3.2 Medição das propriedades termofísicas dos nanolubrificantes	51
3.2.1 Massa específica	51
3.2.2 Condutividade térmica.....	52
3.2.3 Viscosidade.....	54
3.3 Bancada experimental de refrigeração	54
3.3.1 Projeto da bancada de refrigeração.....	54

3.3.1.1	Projeto Informacional.....	55
3.3.1.2	Projeto conceitual.....	56
3.3.1.3	Projeto preliminar.....	59
3.3.1.4	Projeto Final	64
3.3.2	Instrumentação, monitoramento e montagem.	65
3.3.3	Avaliação das propriedades do sistema.....	70
3.3.4	Metodologia dos testes e condições avaliadas.....	71
3.3.5	Análise da incerteza de medição	72
CAPÍTULO IV	.....	75
4.1	Análise de estabilidade dos nanolubrificantes.....	75
4.2	Propriedades termofísicas de nanolubrificantes	81
4.2.1	Massa específica	81
4.2.2	Viscosidade.....	83
4.2.3	Condutividade térmica.....	85
4.3	Testes da aplicação de nanolubrificantes na bancada de refrigeração.....	87
4.3.1	Teste da bancada experimental com R290 e lubrificante POE	87
4.3.2	Teste da bancada experimental com R290 e nanolubrificantes.....	90
CAPÍTULO V	.....	107
REFERÊNCIAS	.....	111
APENDICÊ I	.....	119
APENDICÊ II	.....	122

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

1.1 Motivação

Os impactos ambientais causados pelas mudanças climáticas têm demonstrado ao longo dos anos um aumento significativo no consumo energético elétrico por equipamentos de sistemas de refrigeração.

O avanço tecnológico em sistemas de refrigeração tem sido impulsionado pelas mudanças climáticas, cujos efeitos, como variações extremas de temperatura e umidade, têm impactado significativamente diversos setores.

Questões como busca do conforto térmico em ambientes residenciais, aumento da produtividade em espaços corporativos, otimização de processos industriais e a melhoria da qualidade do ar são fatores que demonstram a importância de soluções eficientes de refrigeração e climatização.

Desta forma a refrigeração tem demonstrado ser um campo de pesquisa que possui diversas áreas de aplicação na sociedade e alto impacto na vida dos seres humanos. Assim, pesquisas têm sido realizadas para aprimorar equipamentos que respeitem as normas internacionais como protocolo de Montreal, emenda de Kigali, eliminação de fluídos refrigerantes que degradam a camada de ozônio e redução de gases de efeito estufa.

Observando as pesquisas quanto a otimização dos sistemas de refrigeração, tem se buscado reduzir consumo energético elétrico que está associado ao compressor e uma alternativa que tem apresentados resultados promissores é a dispersão de partículas em escala nanométrica num fluido base que quando aplicado em óleo lubrificante é chamado de nanolubrificante.

Nas pesquisas associadas aos nanolubrificantes tem demonstrado melhora das propriedades termofísicas e tribológicas quando comparados ao fluido base, o que os torna uma alternativa de relevante potencial para aplicação nos compressores dos sistemas de refrigeração.

Os compressores dos sistemas de refrigeração estão sujeitos a regimes de trabalho por diferentes gradientes de temperatura e pressões, que têm influência direta no seu consumo energético. Logo a aplicação dos nanolubrificantes nos compressores dos sistemas de refrigeração que são um dos componentes com maior custo financeiro por conta do seu projeto e dimensionamento para diferentes regimes de trabalho, podem proporcionar ao sistema uma redução do consumo energético elétrico com um possível aumento da lubrificação, redução do coeficiente de atrito, redução da taxa de desgaste, redução da temperatura de trabalho do compressor, aumento da capacidade de refrigeração do sistema de refrigeração e incrementos no coeficiente de desempenho do sistema de refrigeração.

Desta forma, o presente trabalho apresenta como objetivo avaliar a utilização de nanolubrificantes de grafeno, nas concentrações em massa de 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1% em um sistema de refrigeração com compressor hermético alternativo, operando com fluido refrigerante natural o R290 que atende as novas normas quanto a sustentabilidade.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é avaliar experimentalmente o desempenho de um compressor do tipo hermético alternativo quando aplicado um nanolubrificante, e o compressor faz parte de um sistema de refrigeração que utiliza o fluido refrigerante R290 e o óleo lubrificante polioléster (POE). Para isso, propõe-se a montagem de uma bancada experimental que simula um ciclo de refrigeração convencional, sendo identificadas quais são as necessidades em termos de segurança, que permitam utilizar o fluido refrigerante e o compressor originalmente projetado para trabalhar com o nanolubrificante, buscando avaliar os impactos da sua utilização no sistema. Como principais objetivos deste trabalho, que serão analisados com a adição de nanopartículas, têm-se:

- Realizar uma revisão bibliográfica sobre a utilização de nanopartículas em lubrificantes convencionais aplicados a compressores para sistemas de refrigeração e os seus principais efeitos encontrados na literatura;
- Avaliar o efeito da concentração de nanopartículas na estabilidade e propriedades termofísicas;
- Construção da bancada experimental de refrigeração para a realização dos testes.
- Avaliar experimentalmente na bancada experimental os impactos nos principais parâmetros operacionais, coeficiente de desempenho (COP, do inglês Coefficient of Performance), capacidade de refrigeração, eficiência energética, e entre outros.

1.3 Estrutura da dissertação

Este trabalho está organizado para apresentar uma sequência de etapas com o intuito de obter o objetivo principal deste trabalho. Deste modo, a dissertação foi estruturada em cinco capítulos: (1) introdução, (2) revisão bibliográfica, (3) metodologia experimental, (4) análise e discussão dos resultados e, por fim, (5) conclusões e perspectivas futuras. Sendo assim, os capítulos foram organizados do seguinte modo:

O capítulo II mostra o levantamento bibliográfico que foi realizado que traz de forma introdutória conceitos dos sistemas de refrigeração por compressão a vapor e aborda o tema de fluidos refrigerantes naturais e óleos lubrificantes utilizados. Após isto, são apresentados os conceitos de nanolubrificantes, quanto a sua síntese de produção, análise de estabilidade e o estado da arte das propriedades termofísicas, como massa específica, viscosidade e condutividade térmica. Finalizando são apresentadas as pesquisas realizadas com bancadas experimentais de refrigeração aplicando nanolubrificantes e os seus principais efeitos observados.

No capítulo III mostra-se de modo detalhado o processo de síntese realizado para conseguir os nanolubrificantes aplicados nesta pesquisa. Em sequência, são mostradas as metodologias e equipamentos utilizados para determinar as propriedades termofísicas. Na parte final apresenta detalhadamente a bancada experimental de refrigeração, sendo mostrando as etapas de projeto desenvolvidas como projeto informacional, projeto conceitual, projeto preliminar e projeto final, depois são apresentados as metodologias aplicadas para montagem, instrumentação e monitoramento aplicados, também foram descritos os procedimentos para avaliação das propriedades do sistema, as metodologias utilizadas nos testes nas condições avaliadas e as análises de incertezas das medições.

No capítulo IV, são inicialmente mostrados e discutidos os resultados que foram encontrados quanto à síntese e estabilidade dos nanolubrificantes realizados. Em seguida, são apresentados e discutidos os resultados obtidos em relação às propriedades termofísicas (massa específica, viscosidade e condutividade térmica). Por fim, são apresentados os resultados experimentais da bancada de refrigeração, utilizando nanolubrificantes que foram analisados. Foram identificadas as variáveis que influenciaram de maneira significativa o desempenho do sistema, como potência consumida, capacidade de refrigeração, coeficiente de desempenho,

temperaturas de descarga, superficial e do cárter do compressor, além da pressão de descarga e da vazão mássica.

O capítulo V apresenta as conclusões mais relevantes deste trabalho, juntamente com sugestões para pesquisas futuras.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo tem o intuito de direcionar o leitor quanto aos conceitos necessários para a compreensão do trabalho, sendo discutido inicialmente sobre os princípios básicos dos sistemas de refrigeração com compressão a vapor, fluidos refrigerantes e lubrificantes sintéticos. Em seguida, são abordados os conceitos de nanolubrificantes, critérios para análise de estabilidade dos nanolubrificantes, propriedades termofísicas dos nanolubrificantes como massa específica, viscosidade e condutividade térmica. Finalmente, são abordados os trabalhos encontrados quanto à utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração a vapor e os seus principais impactos encontrados.

2.1 Sistemas de refrigeração com compressão a vapor

Os sistemas de refrigeração são baseados na primeira lei da termodinâmica, que se refere ao princípio de conservação de energia demonstrado na Eq. (2.1) e na segunda lei da termodinâmica que o calor não pode fluir de uma temperatura mais baixa para uma temperatura mais alta sem um consumo de energia demonstrado na Eq. (2.2), assim, os quatro componentes básicos dos sistemas de refrigeração, o compressor, evaporador, condensador e sistema de expansão, são regidos por essas equações (LING; HWANG; RADERMACHER, 2005).

$$\sum Q_i + W = 0 \quad (2.1)$$

$$\sum \frac{Q_i}{T_i} = 0 \rightarrow \forall \text{ Processos Reversíveis} \quad (2.2)$$

O ciclo de refrigeração que os sistemas convencionais seguem são dos sistemas por compressão a vapor compostos pelos quatro componentes básicos mostrados de forma esquemática na Fig. 2.1 que é composto por um fluido de trabalho, denominado de fluido

refrigerante que percorre o sistema realizando o transporte da energia, que foi retirada do meio a ser resfriado para fornecer para o meio exterior.

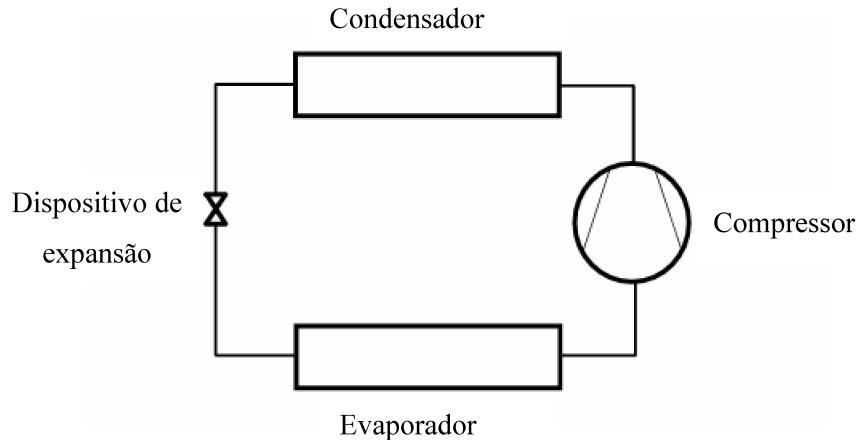


Figura 2.1 – Esquema de um sistema de refrigeração por compressão a vapor. Adaptado de Ling; Hwang; Radermacher (2005).

Cada componente básico do sistema de refrigeração por compressão a vapor apresenta um comportamento físico característico para o funcionamento do sistema.

Nos trocadores de calor (evaporador e condensador), aplicando-se a primeira lei da termodinâmica e hipóteses simplificadoras (regime permanente, processo reversível, escoamento isobárico com atrito desprezível e sistema adiabático), pode-se utilizar a Eq. (2.3) para descrever seu comportamento. No evaporador, o fluido refrigerante entra em regime bifásico e sai como vapor superaquecido; no condensador, entra como vapor superaquecido e é condensado até a fase líquida comprimida.

No dispositivo de expansão, com as mesmas hipóteses simplificadoras e considerando o processo isoentálpico, a Eq. (2.4) descreve seu comportamento, em que o fluido entra como líquido comprimido e, ao passar por uma estrangulação, sofre queda de pressão e transição para a fase bifásica.

Para o compressor, responsável pelo consumo de energia do sistema ao realizar o trabalho e aplicando as hipóteses simplificadoras, pode-se utilizar a Eq. (2.5) para descrever o comportamento físico do componente que na sucção do compressor o fluido de refrigerante se encontra na fase vapor superaquecido e, ao ser comprimido, apresenta uma mudança com aumento de pressão e temperatura na descarga do compressor. Na Fig. 2.2 mostra o diagrama P-h do sistema de refrigeração por compressão de vapor ideal.

O balanço de energia do ciclo de refrigeração por compressão a vapor pode ser descrito pela Eq. (2.6).

$$\dot{Q}_{trocador\ de\ calor} = \dot{m} * (h_{saída} - h_{entrada}) \quad (2.3)$$

$$h_{saída} = h_{entrada} \quad (2.4)$$

$$\dot{W}_{compressor} = \dot{m} * (h_{saída} - h_{entrada}) \quad (2.5)$$

$$\dot{Q}_{evaporador} + \dot{W}_{compressor} - \dot{Q}_{condensador} = 0 \quad (2.6)$$

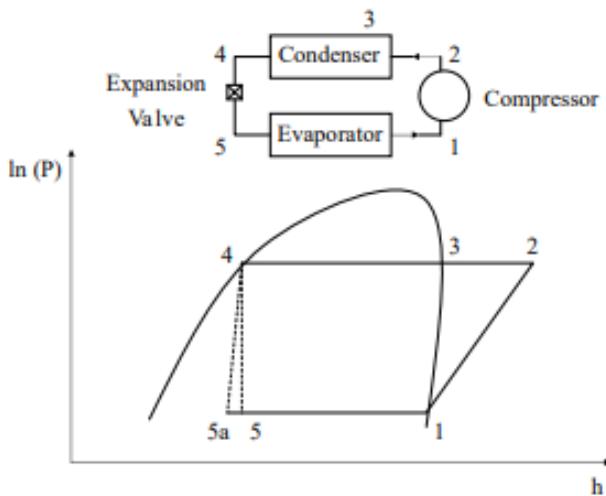


Figura 2.2 – Esquema do diagrama $\ln(P)$ - h com os pontos de estado de um ciclo de compressão de vapor sobrepostos. Adaptado de Ling; Hwang; Radermacher (2005).

No sistema de refrigeração por compressão a vapor o compressor por se tratar do único componente móvel do sistema que é submetido a grandes gradientes de pressões e temperaturas sendo o responsável pelo consumo de energia para realização do trabalho precisa que suas partes móveis que sejam bem lubrificadas. Logo existem diversos tipos de compressores com elementos de compressão que podem ser de pistões, rotores, parafusos, espiral e entre outros, portanto ter uma boa lubrificação garante eliminar o contato e evitar o desgaste entre as partes móveis, pode servir como um selo dinâmico das válvulas e do mecanismo de compressão e dissipar o calor gerado durante a compressão do fluido refrigerante (MANG; DRESEL, 2007).

O lubrificante pode se acumular no compressor em seções mais frias na forma de vapor de óleo ou névoa de óleo levando a circular dentro do sistema de refrigeração por ter uma miscibilidade com o fluido refrigerante e, portanto, deve se garantir seja por meio mecânico como separador de óleo ou através do fluxo de refrigerante (solubilidade do refrigerante) o retorno do óleo ao compressor em todas as condições operacionais para garantir uma boa lubrificação (MANG, 2014).

2.1.1 Fluido refrigerante R290

O R290, ou propano, é um fluido refrigerante natural puro pertencente ao grupo dos fluidos livres de halógenos (não emitem substâncias tóxicas ao serem expostos ao calor ou chama direta), caracterizando-se por ser incolor e quase inodoro. Ele apresenta um potencial zero de destruição da camada de ozônio (ODP) e um baixo potencial de aquecimento global (GWP = 3). Conforme a norma ASHRAE 34, o propano é classificado como A3, o que significa que possui um baixo nível de toxicidade, mas apresenta alta inflamabilidade e alta propagação de chama. Essa classificação implica que o uso do propano em aplicações de refrigeração seja regulado por normas e códigos de segurança.

No Brasil, as normas aplicáveis incluem a EN378, VBG20, DIN 7003 e DIN VDE 0165, bem como a VDE 0100. Tais normas preveem a utilização de dispositivos especiais para proteção contra pressões excessivas e a adoção de características específicas para os sistemas de refrigeração e elétricos, além de cuidados rigorosos em casos de vazamento de fluido refrigerante. Em particular, sistemas de exaustão adequados devem ser implementados para garantir que nenhuma mistura explosiva possa ocorrer. (BRASIL, 2015)

A Tabela 2.1 apresenta alguns parâmetros de comparação entre o fluido refrigerante R22, utilizado como referência devido à sua ampla aplicação em sistemas de refrigeração com hidroclorofluorcarbonos (HCFCs), e o R290, um fluido refrigerante natural, em estudos que avaliam a comparação e substituição entre ambos. Demonstrando como destaque no R290 o ODP como zero e o baixo GWP ao comparar com o R22.

Tabela 2.1 – Tabela de comparação de parâmetro R290 e R22

Fluido refrigeração	R22	R290
Substância Natural	Não	Sim
Nome Comercial	-	Propano
Fabricante	vários	vários
Composição química	CHClF ₂	C ₃ H ₈
ODP	0,05	0
GWP	1500	3
Temperatura Glide (K)	0	0
Inflamabilidade	Não	Alta
Toxidade	Baixa	Baixa
Tipo de óleo lubrificante	MO/AB/ MO+AB	MO/ PAO/POE
Tipo de aplicação	HT / MT / LT	HT / MT / LT (Sist. Indiretos)
Tipo de Equipamento	-	Novos

Fonte: Adaptado de Brasil (2015). Nota: PDO: Potencial de destruição do ozônio, GWP: Potencial aquecimento global, MO=Óleo mineral, MO+AB = mistura de óleo mineral com alquilbenzeno (semi-sintético), POE: Óleo polioléster; PAO: Óleo polialfaolífina, HT = Alta temp. evaporação (ar-condicionado), MT = Média temp. evaporação (sistema de resfriados), LT = Baixa temp. evaporação (sistema de congelados).

Com base nos dados apresentados e nas recentes políticas internacionais, como o Protocolo de Montreal de 1985, que estabeleceu a redução e eliminação da produção e consumo de CFCs (clorofluorocarbonos) e HCFCs (hidroclorofluorcarbonos) devido ao seu alto potencial de destruição da camada de ozônio (ODP), é possível observar que o programa brasileiro de redução do consumo de HCFCs, conforme a Tabela 2.2, mostra uma progressão significativa no cumprimento das metas estabelecidas. O Brasil está próximo de alcançar a eliminação desses HCFCs.

Além disso, estudos nacionais e internacionais, em consonância com políticas mais recentes, como a Emenda de Kigali de 2016, que visa a redução dos HFC (hidrofluorocarbonos), compostos com elevado Potencial de Aquecimento Global (GWP), indicam que há uma tendência crescente em adotar soluções mais sustentáveis. Nesse contexto, o uso de fluidos refrigerantes naturais, sempre respeitando as normas e regulamentações estabelecidas, surge como uma alternativa viável, segura e econômica para aplicações futuras, contribuindo para um ambiente mais sustentável.

Tabela 2.2 – Tabela de cronograma de eliminação do consumo de HCFCs.

Ano	Ação
2013	Congelamento do consumo dos HCFCs (média do consumo de 2009 e 2010)
2015	Redução de 10,0% do consumo
2020	Redução de 35,0% do consumo
2025	Redução de 67,5% do consumo
2030	Redução de 97,5% do consumo
2040	Eliminação do consumo

Fonte: Adaptado de Brasil (2017). Nota: HCFCs: Hidroclorofluorocarbonos.

2.1.2 Lubrificante sintético polioléster (POE)

Os óleos convencionais como óleos minerais, alquilbenzenos ou polialfaolefinas com o advento das mudanças por políticas internacionais para mudança de fluidos refrigerantes dos grupos de CFCs para HCFC e depois para HFC, por conta desses óleos convencionais não serem solúveis nas novas misturas de refrigerantes sem cloro, como R134a, R404a, R507 e entre outras, foi necessário o desenvolvimento de óleos de refrigeração sintéticos à base do poliolésteres solúveis em refrigerantes HFC com base na norma da DIN 8960. Este lubrificante de óleo o polioléster (POE) apresenta uma excelente estabilidade química e térmica, sendo um produto disponível com viscosidade adequadas (ISO VG 15-220) para compressores a pistão e parafuso sejam industriais ou domésticos sendo sempre observados as recomendações de viscosidade dos fabricantes quanto a sua aplicação.

Uma das características similares a todos os óleos de éster, assim como os óleos de o polioléster quando saturados e de alta pureza podem hidrolisar, quando entrarem em contato com umidade no compressor, assim os fabricantes sabem a necessidade deste produto estar protegido de água e da umidade em geral, seja na sua utilização ou armazenamento, logo os óleos poliol ésteres são ultra secados e armazenados em recipientes de tambores de metal herméticos e tendo um teor de água inferior a 100 ppm com uma atmosfera de nitrogênio. Pode se destacar algumas propriedades do óleo o poliol éster como: (1) excelente solubilidade em fluidos refrigerantes HFC, (2) evita o acúmulo de óleo no condensador e evaporador, (3) condutividade térmica constante, (4) demonstra um alto índice de viscosidade natural e um bom comportamento quanto a viscosidade-temperatura, portanto, tendo lubrificação adequada em altas temperaturas, (5) excelente estabilidade térmica e química mesmo na presença de fluidos refrigerantes, (6) excelentes propriedades de fluxo mesmo em baixas temperaturas, (7) longa

vida útil, (8) compatibilidade com todos os materiais de vedação utilizados como NBR, HNBR, EPDM e entre outros, (9) os produtos são ultra-secos. Os poliolésteres são lubrificantes higroscópicos, ou seja, eles absorvem água, logo podem hidrolisar por períodos mais longos quando seu teor de água é acima de 200 ppm (MANG; DRESEL, 2007; MANG, 2014).

Na Fig. 2.3 é demonstrado um teste realizado para medir a concentração de água com passar do tempo em óleos de refrigeração e pode se observar que por conta da característica do óleo POE de serem higroscópicos, com o incremento do tempo tem se um crescimento acentuado de todos os tipos de óleo POE seja qual for sua viscosidade.

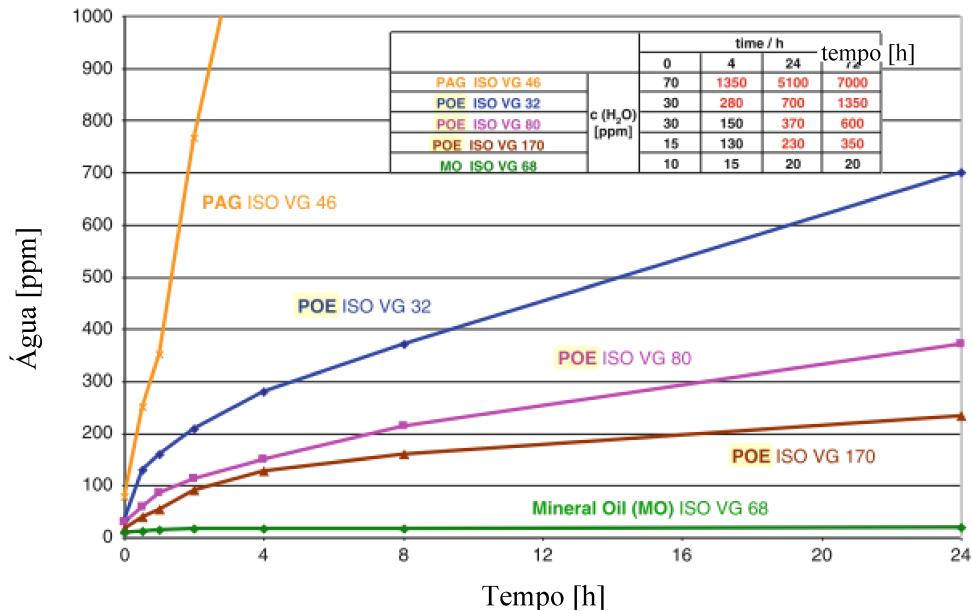


Figura 2.3 – Gráfico de absorção de água (higroscopicidade) por óleos de refrigeração.
Adaptado de Mang (2014)

Portanto, devem ser seguidas as formas de armazenamento realizados pelos fabricantes para garantir uma continuidade das propriedades dos óleos POE e devem ser realizadas as boas práticas de refrigeração conforme descrito na secção Evacuação do circuito de refrigeração que está presente em Brasil (2017), sendo seguido todas as recomendações e procedimentos para remoção de gases não condensáveis e umidade. Para realizar de forma eficiente vácuo no sistema de refrigeração devem ser utilizados equipamentos adequados, como bomba de vácuo, válvula solenoide na sucção da bomba de vácuo (para evitar um retorno de ar por falta de energia durante operação), mangueira de vácuo, manifold e vacuômetro calibrado conforme demonstrado de forma esquemática na Fig. 2.4, para garantir a retirada de toda umidade e gases nocivos do sistema de refrigeração para seu correto funcionamento e prevenção de possíveis

problemas como mau funcionamento, avaria, deterioração ou corrosão do compressor por conta da absorção de água por conta do óleo do compressor.

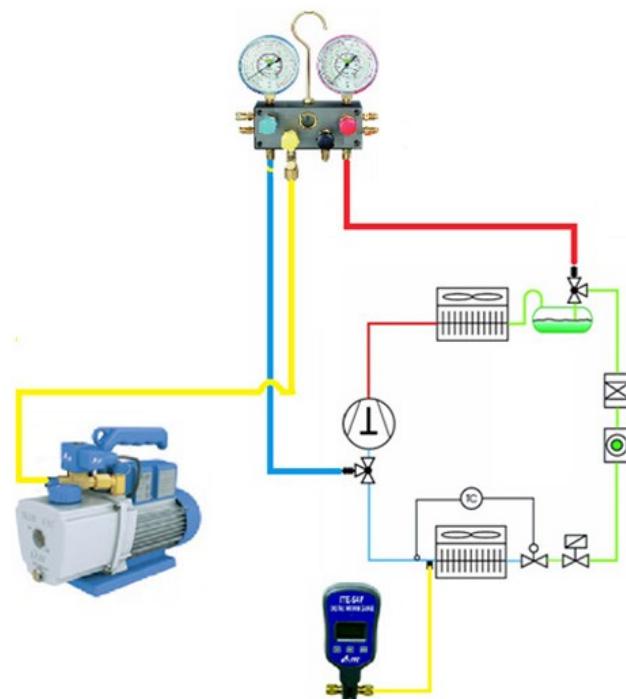


Figura 2.4 – Diagrama esquemático para evacuação de um sistema de refrigeração. Adaptado de Brasil (2017)

2.2 Nanolubrificantes

Segundo a Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial (PPH) 2019 da Eletrobrás, os compressores em sistemas de refrigeração (refrigerador, freezer e ar-condicionado) apresentaram em 2019 um consumo percentual de aproximadamente 37,5%, o que representa um consumo energético anual de 131.198 GWh. Segundo os dados apresentados pela Empresa de Pesquisa Energética (EPE) 2019 do Ministério de Minas e Energia, o que representa economicamente um valor de aproximadamente 52,5 bilhões de reais. Para os anos de 2020-2025, ocorreu um aumento percentual médio no consumo residencial de energia de 4,9%, que, se aplicado ao último levantamento realizado pelo PPH 2019 da Eletrobrás, representa economicamente um valor de aproximadamente 2,6 bilhões de reais a cada ano.

Por se tratar de sistemas presentes no cotidiano das residências e indústrias, e tendo uma tendência de aumento no consumo, deve-se buscar uma alternativa para melhorar as suas

eficiências, e promover uma redução no consumo energético que poderá proporcionar menores impactos ambientais, como na utilização de nanolubrificantes em compressores em sistemas de refrigeração. Esses nanofluidos podem ser definidos como uma dispersão coloidal de partículas de escala nanométrica em um fluido convencional, e geralmente proporcionam uma condutividade térmica elevada, quando comparada ao fluido base (CHOI; EASTMAN, 1995). Por estes motivos, conforme mostrado no gráfico da Fig. 2.5, tem-se um crescente aumento no desenvolvimento de pesquisas nesta área.

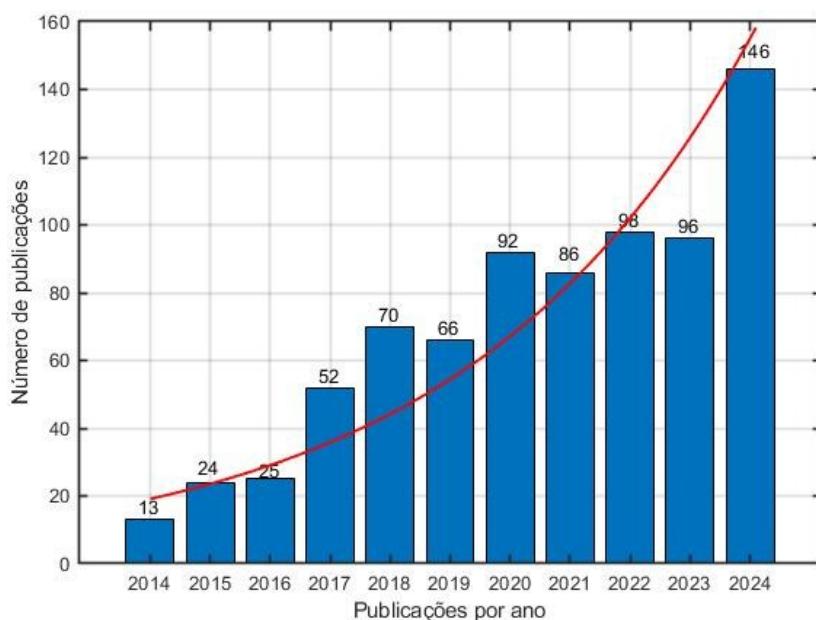


Figura 2.5 – Gráfico de pesquisas encontradas no Science Direct com nanolubrificantes. Fonte: Elaborado pelo próprio autor. Science Direct, 2024

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 a essas vantagens, os nanolubrificantes apresentam-se como uma abordagem promissora para melhorar as propriedades térmicas, reológicas e tribológicas de um sistema (SANUKRISHNA; PRAKASH, 2018). 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 a melhorar a lubricidade, o

desempenho da taxa de desgaste, o coeficiente de atrito e a condutividade térmica de lubrificantes convencionais. Óleos convencionais podem ser classificados de diferentes tipos, como, mineral, sintético e vegetal. Os aditivos podem ser classificados em duas subcategorias, como nano e químicos, (KHALID SHAFI; CHAROO, 2018; ZAWAII; AZMI; GHAZALI, 2022). Na Fig. 2.6 está demonstrado de forma esquemática a possível composição dos nanolubrificantes.

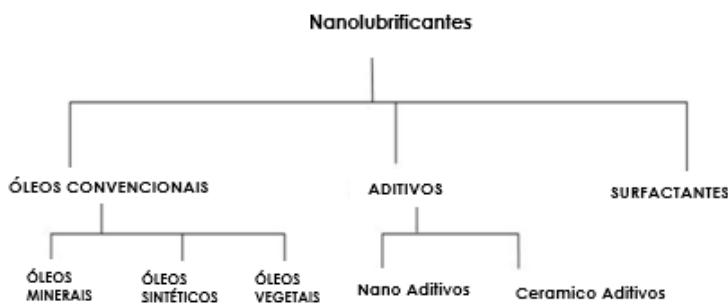


Figura 2.6 – Diagrama esquemático de componentes dos nanolubrificantes. Fonte: Adaptado de Khalid; Shafi; Charoo (2018).

As nanopartículas podem ser classificadas como metais, óxidos metálicos, compósitos, baseados em carbono e híbridas. As partículas mais utilizadas para sistemas de refrigeração são os óxidos (Al_2O_3 , SiO_2 e ZrO_2) 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 à sua morfologia esférica (GILL et al., 2018). As de grafeno apresentam alta resistência e condutividade térmica (4800 a 5700 $\text{W}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$), 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 (MARCUCCI PICO et al., 2020). Por outro lado, os nanotubos de carbono são altamente utilizados, principalmente, pela sua alta condutividade térmica e grande área superficial (ILYAS; PENDYALA; NARAHARI, 2017).

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, como principal desvantagem, apresentam uma baixa estabilidade de longo prazo. Para Hemmat e Eefandeh (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 a 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).

A falta de estabilidade em nanolubrificantes acarreta à formação de aglomerados que desencadeiam, posteriormente, uma sedimentação, que em certos casos pode causar concentrações de tensões, condições de abrasão e, consequentemente, intensificar o atrito e o desgaste prematuro dos componentes (HUANG et al., 2019). Na literatura, é possível encontrar estudos que visam aumentar a estabilidade de nanolubrificantes aplicando a concentração desejada de nanopartículas, em conjunto com algum surfactante ou através da funcionalização superficial das nanopartículas, sempre com o intuito de melhorar a estabilidade.

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 suspensas (HWANG et al., 2007). No estudo realizado por Al-Janabi et al. (2022) observou que aplicação de alta proporção de surfactante CTAB com GR demonstrou uma amostra de nanolubrificante instável, porque o CTAB ser um surfactante anfifílico, possuindo propriedades hidrofílicas e lipofílicas e essas camadas formaram uma micela e um agregado de moléculas de surfactante dispersas no líquido que fez as nanopartículas decantarem. Portanto, com a quantidade ideal de surfactante, faz com que o lipídio micelar, as bicamadas não se formarão, conforme demonstrado na Fig. 2.7 uma quantidade excedida de surfactante irá criar micelas e agregação de surfactante. As nanopartículas assentará mais rapidamente e perderão a influência benéfica que o surfactante faz para estabilizar as nanopartículas. Neste estudo, foram observadas algumas desvantagens com o uso de surfactantes, como controle deficiente de preparação, poluição e maior custo, logo, a sua utilização requer uma pesquisa quanto ao

tipo e à composição ideal a ser aplicada ao nanofluido. 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).

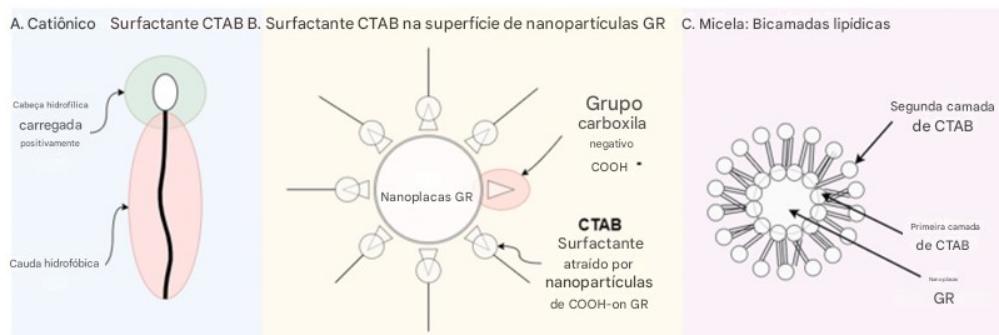


Figura 2.7 – O mecanismo do surfactante CTAB ligando às nanopartículas de GR e formando uma micela. Fonte: Adaptado de Al-Janabi et al. (2022).

Bordignon et al. (2018) avaliaram a estabilidade de nanopartículas de grafeno multicamadas (GM) funcionalizadas com nitrogênio (N_2) e Amônia (NH_3) com concentração de 0,5% em peso com óleo POE. Ao realizarem os testes, os autores identificaram que os resultados do POE/GM, POE/GM-N₂ e POE/GM-NH₃, usando imagens digitais imediatamente após o processo de mistura e regularmente (semanalmente) até 6 meses, e em conjunto medido a agregação de partículas com o valor do potencial zeta, observaram que após 6 meses, a amostra GM estava totalmente sedimentada e a GM-N₂ amostra estava sedimentada parcialmente. Em contraste, o GM-NH₃ ainda é estável até o fim do período analisado. Essa estabilidade pode ser atribuída à presença das funcionalidades polares em GM-NH₃, que evitam a aglomeração de partículas e facilitam a sua dispersão em solventes polares. Quanto mais estável a dispersão, maior a probabilidade de o aditivo entrar na região do contato existente entre as superfícies deslizantes e, dessa forma, intensificar as propriedades do par tribológico sendo uma solução promissora a funcionalização de nanopartículas para aplicação como agente estabilizador.

Como conclusão desta seção as nanopartículas de alótropos de carbono apresentam excelentes propriedades térmicas, especialmente as de grafeno com os maiores coeficientes de condutividade térmica e propriedades tribológicas sendo uma alternativa de aditivos que pode melhorar de forma significativa as propriedades dos óleos convencionais, mas deve-se observar

que com a produção dos nanolubrificantes no método de dois passos a estabilidade é de extrema importância para garantir uma operação segura dos componentes e para poder ser mantido ao longo do tempo as vantagens com transferência de calor e lubricidade com isso na seção 2.3 serão abordados as pesquisas quanto aos processos de sínteses mais utilizados e as formas utilizadas para análise da estabilidade.

2.3 Sínteses e métodos para análises de estabilidade dos nanolubrificantes

Conforme descrito de maneira sucinta na seção 2.2, o método de dois passos é amplamente utilizado na maioria dos estudos devido ao seu baixo custo, alta repetibilidade e controle mais preciso das concentrações empregadas. Dessa forma, a metodologia geral de síntese pelo método de dois passos pode ser representada pelas seguintes etapas: (1) definição da quantidade em massa ou volume de óleo base e nanopartículas, cálculo da concentração em porcentagem de volume (vol.%) ou porcentagem em massa (w.t.%) por amostra de nanolubrificante e, se for o caso, o cálculo da quantidade ideal de surfactante em vol.% ou w.t.%; (2) pesagem das amostras de óleo base e nanopartículas, com ou sem surfactante ou funcionalização; (3) aplicação de um agente homogeneizador, como agitador magnético com controle de tempo e temperatura da amostra e/ou agitador ultrassônico com controle de tempo, pulsos e temperatura; (4) armazenamento em recipiente adequado. A Fig. 2.8 ilustra esquematicamente a aplicação dessa metodologia em cada uma das etapas descritas.

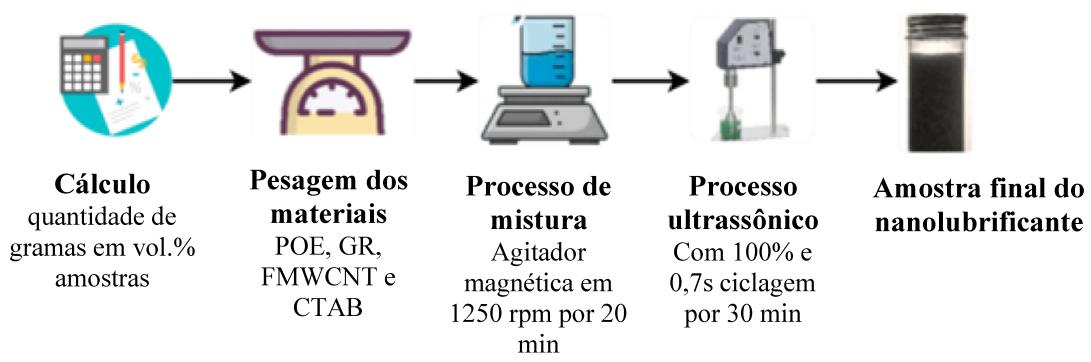


Figura 2.8 – Processo de preparação para amostras de nanolubrificantes. Fonte: Adaptado de Al-Janabi et al. (2022).

Al-Janabi; Hussin; Abdullah (2021) destacam que o controle da temperatura de operação, as técnicas químicas e a mistura mecânica das nanopartículas são fundamentais para a

estabilidade do nanolubrificante. Eles realizaram um estudo utilizando polioléster (POE) com nanopartículas de grafeno (GR) ou nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MMWCNT), com concentração de 0,1% em volume, e diferentes surfactantes (CTAB, SDBS e SPAN-80) na proporção 1:1. A estabilidade das amostras foi analisada por meio do potencial Zeta, que caracteriza a estabilidade dos nanolubrificantes. Amostras com valores de potencial Zeta superiores a ± 30 mV foram consideradas estáveis, enquanto aquelas abaixo de ± 30 mV apresentaram aglomeração. Todos os nanolubrificantes sintetizados apresentaram valores acima de ± 30 mV, com destaque para as amostras com CTAB, que apresentaram os melhores resultados de estabilidade. Além disso, a análise de estabilidade também incluiu a inspeção visual durante 60 dias, revelando que as amostras com CTAB mantiveram a melhor estabilidade ao longo do tempo, e que a aplicação de um agitador ultrassônico teve influência direta na estabilidade, promovendo uma dispersão mais homogênea das nanopartículas.

Saufi e Mamat (2022) realizaram a síntese de nanolubrificantes de POE com nanoplaças de grafeno (NGR) a uma concentração de 0,05% em volume, utilizando surfactantes como CTAB/SDBS ou SPAN-80. O diferencial deste estudo foi a investigação de diferentes homogeneizadores mecânicos, como agitadores ultrassônicos, magnéticos e suspensos, para avaliar sua influência na estabilidade dos nanolubrificantes. A estabilidade foi analisada por inspeção visual ao longo de 14 dias, micrografias metalográficas e medições do potencial Zeta. Os autores observaram que, independentemente do método de síntese, as amostras com CTAB apresentaram uma suspensão homogênea e estável. Além disso, o uso de um agitador suspenso, em vez de um agitador magnético, aumentou a estabilidade do nanolubrificante, demonstrando que a escolha do método de homogeneização pode afetar significativamente a dispersão das nanopartículas e, consequentemente, a estabilidade do nanolubrificante.

Jong et al. (2021) investigaram a síntese de nanolubrificantes com óleo base POE e nanopartículas de MWCNTs, a uma concentração de 0,1% em massa, com o surfactante Triton-X 100. Durante o processo de síntese, utilizaram um agitador ultrassônico com frequência de 40 kHz, potência de 300 W e controle de temperatura a 25 °C por 5 horas. A estabilidade foi avaliada utilizando um sistema de transmissão a laser, desenvolvido pelos próprios autores, e inspeção visual durante 72 horas. Os resultados indicaram que as amostras apresentaram boa estabilidade tanto pela análise do comportamento constante dos dados do sistema de transmissão a laser quanto pela inspeção visual, confirmado que a combinação de parâmetros de ultrassonificação e o uso do surfactante Triton-X 100 contribuem significativamente para a dispersão e estabilidade das nanopartículas.

Diversos outros estudos aplicaram o método de dois passos com diferentes técnicas e materiais. Babarinde et al. (2020) utilizaram nanolubrificantes com óleo mineral (OM) e nanopartículas de grafeno, com concentração de 0,2-0,6 g/L, empregando um agitador magnético durante 45 minutos e um agitador ultrassônico por 3 horas, com controle de temperatura entre 15-20 °C. Embora este estudo não tenha realizado uma análise explícita da estabilidade, os autores se basearam em estudos anteriores para a definição dos parâmetros de síntese, sugerindo que o tempo e a temperatura controlados durante a homogeneização são essenciais para uma dispersão uniforme das nanopartículas.

Joshi et al. (2022) realizaram a síntese de nanolubrificantes com óleo base POE ou OM e nanopartículas de MWCNTs, com concentração de 0,05-0,1%w.t., utilizando um agitador ultrassônico por 55 minutos. Para analisar a estabilidade do nanolubrificante, foi utilizada a inspeção visual em um período de 48 horas, sem que fosse observada qualquer aglomeração ou sedimentação, independentemente da concentração aplicada.

Sanukrishna e Jose (2022) trabalharam com óleo base polialquileno glicol (PAG) e nanotubos de carbono (CNT), com concentração de 0,03-0,2%vol., utilizando um agitador magnético por 1 hora e um agitador ultrassônico com frequência de 40 kHz durante 6 horas. A estabilidade foi analisada por inspeção visual durante 5 dias, sem observação de alterações significativas. Para quantificar a estabilidade, os autores aplicaram espectroscopia ultravioleta-visível (UV-Vis), uma técnica amplamente utilizada para analisar fluidos, pois a luz transmitida através da amostra fornece os espectros de absorbância, que podem ser usados para avaliar a estabilidade das nanopartículas em suspensão. No primeiro e quinto dia de observação, foi detectada uma leve redução do pico de absorbância (de 1,03 para 0,83), mas ainda assim as amostras apresentaram uma alta população de nanopartículas, indicando boa estabilidade do nanolubrificante.

Ismail et al. (2022) investigaram nanolubrificantes com óleo base do tipo polivinílico (PVE) e nanopartículas de dióxido de titânio (TiO₂) e dióxido de silício (SiO₂), com concentração de 0,01-0,1%vol. O processo de síntese utilizou um agitador magnético por 30 minutos e um agitador ultrassônico com frequência de 50 ± 3 kHz e potência de 200 W, variando o tempo de ultrassonicação entre 0 e 7 horas. O objetivo do estudo foi determinar o tempo ideal de sonicação para uma dispersão estável. Os autores observaram que, após 5 horas de ultrassonicação, as amostras apresentaram a melhor estabilidade, que foi confirmada por microscopia eletrônica de transmissão (TEM). Embora tenha sido observada uma pequena aglomeração das nanopartículas, as amostras mantiveram excelente estabilidade, com valores

do potencial Zeta superiores a $\pm 90\text{mV}$, e não apresentaram alterações visíveis durante 30 dias de monitoramento.

Farade et al. (2021) realizaram um estudo para analisar a influência do tempo de sonicação na estabilidade de nanolubrificantes compostos por óleo base de semente de algodão (DNF) e nanopartículas de grafeno multicamadas (GRM), com concentrações variando entre 0,0015% e 0,01% em massa. Além das nanopartículas, os nanolubrificantes também contavam com o surfactante SDBS e o antioxidante TBHQ. O principal foco da pesquisa foi otimizar o processo de sonificação ultrassônica para garantir a dispersão ideal das nanopartículas e a máxima estabilidade do nanolubrificante. Os autores testaram diferentes tempos de sonicação (10, 20, 30 e 60 minutos) e utilizaram um ultrassonicador tipo sonda com um pulso de 40% e potência de 70% para evitar o superaquecimento do fluido base. A escolha dessa configuração foi motivada pela necessidade de controlar a temperatura durante o processo de sonificação, um fator crítico para evitar a degradação do nanolubrificante. A inspeção visual foi realizada durante um período de duas semanas, sendo observados os efeitos do tempo de sonicação na estabilidade das amostras. Os resultados indicaram que os tempos de 30 e 60 minutos foram os mais eficazes para promover a melhor estabilidade das nanopartículas, resultando em dispersões mais homogêneas. Para complementar a avaliação visual, os autores utilizaram espectroscopia UV-Vis para medir o pico de absorbância das amostras durante 90 dias, com coletas a cada 15 dias. A espectroscopia UV-Vis revelou que, à medida que a concentração de nanopartículas de grafeno aumentava, também aumentava o pico de absorbância, indicando uma maior presença de partículas em suspensão. As amostras que passaram por 60 minutos de sonicação apresentaram picos de absorbância superiores aos de 30 minutos, sugerindo uma dispersão mais uniforme das nanopartículas. Como conclusão, os autores observaram que todas as amostras, independentemente do tempo de sonificação, mantiveram uma estabilidade superior a 90% ao longo dos 90 dias de análise. Contudo, as amostras sonicadas por 60 minutos demonstraram maior homogeneidade na dispersão das nanopartículas e, portanto, uma estabilidade ainda mais pronunciada, em comparação com as amostras sonicadas por 30 minutos.

As conclusões dessa seção indicam que o método de dois passos é econômico e viável para aplicações em larga escala. A metodologia geral de síntese dos nanolubrificantes deve ser seguida, levando-se em consideração fatores importantes como a escolha do surfactante, os métodos de homogeneização mecânica (agitadores magnéticos e ultrassônicos), e o controle dos parâmetros que afetam diretamente a estabilidade dos nanolubrificantes. A análise da

estabilidade pode ser feita por métodos qualitativos (inspeção visual) e quantitativos (potencial Zeta, espectroscopia UV-Vis), garantindo uma avaliação precisa das condições dos nanolubrificantes.

2.4 Propriedades termofísicas de nanolubrificantes

Os nanolubrificantes representam uma nova classe de lubrificantes, caracterizada pela dispersão de partículas nanométricas de metais, óxidos metálicos, carbonos e seus alótropos em óleos lubrificantes convencionais. Essa abordagem é promissora, pois aprimora propriedades térmicas, reológicas e tribológicas. A viscosidade e as características reológicas são parâmetros essenciais a serem investigados em conjunto com a condutividade térmica (SANUKRISHNA; VISHNU; PRAKASH, 2018). A incorporação de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração com a miscibilidade entre o fluido refrigerante e o lubrificante. Pequenas quantidades de nanolubrificantes podem circular no sistema, impactando seu desempenho tanto de forma positiva, ao aumentar a taxa de transferência de calor por meio da condutividade térmica, quanto de forma negativa, ao elevar a pressão de descarga devido ao aumento da viscosidade e da massa específica. Portanto, fatores como temperatura, concentração de nanopartículas, forma e tamanho de nanopartículas e entre outros, devem ser analisados para compreender o comportamento dos nanolubrificantes nesses sistemas (SANUKRISHNA; PRAKASH, 2022). Nesta seção, será apresentada uma revisão da literatura sobre a massa específica, a viscosidade e a condutividade térmica dos nanolubrificantes. Embora a literatura contenha uma ampla gama de estudos sobre as propriedades termofísicas de nanofluidos à base de óleo, este trabalho se concentrará exclusivamente nas propriedades termofísicas dos nanolubrificantes.

2.4.1 Massa específica

Uma grande parte dos estudos na literatura indica que a massa específica de nanolubrificantes aumenta com o acréscimo da concentração de nanopartículas. Esse comportamento ocorre devido ao alto valor da massa específica das nanopartículas em comparação com a do fluido base. Com base na literatura, os trabalhos utilizam o modelo de Pak e Cho para estimar a massa específica efetiva de nanofluidos, descrita pela Eq. (2.7).

$$\rho_{nf} = (1 - \phi_{vol}) * \rho_{fb} + \phi_{vol} * \rho_{np} \quad (2.7)$$

Onde, ρ_{nf} representa massa específica do nanofluido, ϕ_{vol} corresponde à concentração volumétrica, ρ_{fb} indica a massa específica do fluido base e ρ_{np} refere-se à massa específica de nanopartículas.

Ilyas; Pendyala; Narahari (2017) investigaram nanolubrificantes compostos por óleo base OM e nanopartículas de MWCNTs, com concentrações em massa variando entre 0,1 e 1%w.t. Para possibilitar a comparação entre medições experimentais e a equação de Pak e Cho, os autores converteram a concentração em massa para concentração volumétrica por meio da Eq. (2.8). Os resultados demonstraram que, a 20 °C e 40 °C, não houve aumento significativo na massa específica dos nanolubrificantes. Além disso, verificou-se que o modelo experimental apresentou boa concordância com os valores medidos. Os autores também destacaram que a massa específica aumenta com a adição de nanopartículas, mas diminui com o aumento da temperatura, independentemente da concentração dessas partículas.

$$\varphi_v = \frac{m_{np}/\rho_{np}}{m_{np}/\rho_{np} + m_{fb}/\rho_{fb}} \quad (2.8)$$

Kedzierski et al. (2017) analisaram nanolubrificantes contendo fluido base POE e nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3) ou óxido de zinco (ZnO), com concentrações em massa entre 15 e 38%w.t. Os pesquisadores observaram uma incerteza máxima de 2% entre o modelo teórico e as medições experimentais. Além disso, constataram que a massa específica reduz com o aumento da temperatura, independentemente do tipo ou concentração de nanopartículas utilizadas.

Dessa forma, os dados experimentais presentes na literatura demonstram que a massa específica dos nanolubrificantes é influenciada tanto pela temperatura quanto pela concentração de nanopartículas. Enquanto o aumento da fração em massa de nanopartículas resulta em um acréscimo na massa específica, e o incremento da temperatura leva a sua redução, independentemente do tipo ou concentração das nanopartículas utilizadas. Esses resultados ressaltam a importância de considerar esses fatores na formulação e aplicação de nanolubrificantes para otimizar seu desempenho em diferentes condições operacionais.

2.4.2 Viscosidade

A viscosidade é uma das principais propriedades reológicas dos fluidos, representando a resistência ao escoamento. Essa característica pode ser significativamente alterada na presença de partículas sólidas dispersas no fluido. Nos nanolubrificantes, que consistem em misturas coloidais (líquido-sólido), a viscosidade assume um papel ainda mais relevante. Mesmo quando as partículas sólidas estão na escala nanométrica, elas podem influenciar de forma significativa o comportamento da viscosidade no sistema. A alteração da viscosidade nos nanolubrificantes pode modificar o regime de lubrificação dos componentes, causar um aumento na queda de pressão ao longo do sistema e, consequentemente, afetar a eficiência energética. Devido a esses impactos, há um crescente interesse científico na investigação dos efeitos que influenciam a viscosidade de nanolubrificantes. Os principais fatores que afetam a viscosidade incluem: dispersão das nanopartículas, tamanho, forma e concentração das partículas, tipo e presença de surfactantes, viscosidade do fluido base, variações de temperatura, que assim como no fluido base, normalmente causam reduções significativas na viscosidade. Para prever o comportamento da viscosidade dos nanofluidos, diversos modelos analíticos empíricos têm sido propostos. Um dos primeiros foi a teoria da viscosidade de Einstein, expressa na Eq. (2.9), que fornece boas estimativas para nanopartículas esféricas em baixas concentrações. No entanto, esse modelo apresenta limitações importantes: ele não considera os efeitos da temperatura e não é aplicável a nanopartículas com formas complexas, como os alótropos de carbono (nanotubos, grafeno e entre outros) (BEHESHTI; SHANBEDI; HERIS, 2014). Dessa forma, foi realizado um levantamento dos principais estudos experimentais disponíveis na literatura, com o objetivo de reunir uma base para a compreensão dos principais fatores que influenciam na viscosidade de nanolubrificantes, considerando diferentes tipos de nanopartículas e variadas condições operacionais.

$$\mu_{np-fb} = \mu_{fb}(1 + 2,5 * \phi_v) \quad (2.9)$$

Ilyas; Pendyala; Narahari (2017) investigaram a viscosidade de nanolubrificantes à base de óleo mineral com adição de nanopartículas de MWCNTs em concentrações em massa de 0,1-1%w.t., utilizando um reômetro rotacional sob taxa de cisalhamento constante e variação de temperatura de 20-90 °C. Os resultados mostraram que, independentemente da concentração, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, devido ao enfraquecimento das interações intermoleculares. Observou-se também um aumento da viscosidade em relação ao

fluído base com o aumento da concentração de nanopartículas, tendo um aumento máximo de 54% para maior concentração de 1%w.t. na temperatura de 20 °C, este efeito foi atribuído ao entrelaçamento estrutural dos nanotubos, que intensifica a resistência ao escoamento entre as camadas do lubrificante. Os autores realizaram uma comparação com o modelo de Einstein, que revelou não ser adequado para prever os valores experimentais obtidos, levando os autores a proporem uma nova correlação empírica para estimar a viscosidade dos nanolubrificantes testados.

Sanukrishna; Vishnu; Prakash (2018) estudaram a viscosidade de nanolubrificantes à base de PAG com nanopartículas de SiO₂, TiO₂ e Al₂O₃ em concentrações de 0,1 a 0,6% vol., variando a taxa de cisalhamento de 3,75-225 s⁻¹ e a temperatura de 20-80 °C. Observaram que a viscosidade aumenta com a concentração de nanopartículas, especialmente em baixas temperaturas e baixas taxas de cisalhamento, devido a colisões entre partículas e aglomeração causada por forças de Van der Waals. Por outro lado, o aumento da temperatura reduz a viscosidade, pois desagrega os aglomerados e enfraquece as interações intermoleculares, tendo um valor máximo de 10,32% para SiO₂ com contração de 0,6 e temperatura de 80 °C. O óleo PAG puro apresentou comportamento newtoniano, enquanto os nanolubrificantes se comportaram como fluidos não newtonianos. Segundo os autores, concentrações moderadas de nanopartículas são mais adequadas para aplicações em compressores de refrigeração, onde não se deseja aumento excessivo da viscosidade.

Pamies et al. (2018) investigaram a viscosidade de nanofluidos à base de líquido iônico dicianamida (LIs) com nanopartículas de grafeno (GR) em concentrações em massa de 0,005–1%w.t., utilizando um reômetro rotacional sob variações de temperatura 25–105 °C e taxa de cisalhamento 1–500 s⁻¹. Os resultados mostraram que, para todas as concentrações, a viscosidade diminui com o aumento da temperatura, comportamento também observado no fluido base. Concentrações mais baixas, como 0,005–0,06%w.t., não alteraram significativamente a viscosidade, enquanto concentrações mais altas como 0,5–1%w.t. resultaram em aumento da viscosidade, atribuído à obstrução do movimento das moléculas do LIs e às interações com as folhas de grafeno. Teve um aumento máximo de 151% para concentração de 1%w.t. de GR na temperatura de 25 °C e taxa de cisalhamento de 500 s⁻¹. O fluido base apresentou comportamento newtoniano em toda a faixa de cisalhamento, mas os nanofluidos com altas concentrações demonstraram comportamento não newtoniano, evidenciado pela diminuição da viscosidade com o aumento da taxa de cisalhamento, efeito atribuído às fortes interações entre o grafeno e o líquido iônico.

Al-Janabi; Hussin; Abdullah (2021) realizaram um estudo da viscosidade com relação a partículas de alótropos de carbono, utilizando um nanolubrificante com fluido base de óleo POE com nanopartículas de MWCNT ou GR em contração em massa de 0,1%w.t., com surfactantes de CTAB, SDBS e SPAN-80 com razão de 1:1, com variação de temperatura de 25-45 °C e taxa de cisalhamento de 500-5000 s⁻¹. Os dados apresentaram que o lubrificante e nanolubrificante com GR sem surfactante têm comportamento de fluido newtoniano, enquanto os nanolubrificantes com MWCNT com e sem surfactantes, GR com surfactantes, têm um comportamento de fluido não newtoniano. O máximo incremento encontrado da viscosidade foi de 20% para amostra de MWCNT sem surfactante, e para GR foi na amostra sem surfactante no valor de 15% na temperatura de 25 °C e taxa de cisalhamento de 1000 s⁻¹. Entre os surfactantes testados, o CTAB foi o que resultou em menores viscosidades, indicando menor aglomeração de partículas. A maior aglomeração observada com outros surfactantes contribuiu para o aumento da viscosidade, devido à formação de estruturas moleculares maiores. Além disso, verificou-se que o aumento da temperatura reduziu a viscosidade em todas as amostras, comportamento atribuído ao aumento da energia cinética das moléculas, que enfraquece as forças de atração intermolecular.

Sanukrishna e Prakash (2022) estudaram o efeito da viscosidade aplicando um algoritmo genético com resultados experimentais obtidos para nanolubrificantes de óleo base de PAG, nanopartículas de grafeno com concentrações em fração de volume de 0,07-0,6%vol. na faixa de temperatura de 20–90 °C e taxa de cisalhamento variada 3,75–225 s⁻¹. Os resultados revelaram que independente da taxa de cisalhamento e fração de volume aplicada, tinha uma redução da viscosidade com o aumento da temperatura, e que mesmo os nanolubrificantes em altas temperaturas e taxas de cisalhamento moderadas os valores de viscosidade se mantém que condiz com as condições operacionais em compressores de refrigeração. O aumento máximo na viscosidade foi cerca de 5 vezes a do fluido base na maior concentração de 0,6%vol. a uma taxa de cisalhamento de 3,75 s⁻¹ e temperatura de 20 °C. Foi observado que fluido base e baixas concentrações tem comportamento newtoniano, enquanto os nanolubrificantes em altas contrações apresentam comportamento não newtoniano.

Joshi et al. (2022) realizou um estudo experimental com nanolubrificantes com dois tipos de óleos base óleo mineral (OM) e POE com aplicação de nanopartículas de MWCNT com concentrações em massa de 0,05–0,1%w.t., na temperatura de 20-80 °C. Tendo como diferencial a comparação dos resultados com o modelo de Brinkman, descrito na Eq. (2.10). Segundo os autores, o valor teórico da viscosidade do modelo demonstrou valores superiores

aos dados experimentais, porém apresentaram o mesmo padrão de ganhos. Sendo o maior valor de ganho encontrado na temperatura de 40 °C para OM-MWCNT na concentração de 0,1%w.t. no valor de 26,4% e para POE- MWCNT na concentração de 0,1%w.t. no valor de 24,4%.

$$\mu_{np-fb} = \frac{1}{(1 + \phi_v)^{2,5}} \mu_{fb} \quad (2.10)$$

Sanukrishna e Jose (2022) realizaram um estudo para comparar os resultados experimentais encontrados da viscosidade de nanolubrificantes de óleo base PAG, com nanopartículas de carbono de paredes múltiplas (CNT) com concentração em volume de 0,05-0,2%vol., com os modelos de Einten, Brinkman, Wang e Park & Cho. Os modelos não conseguiram prever o comportamento dos nanolubrificantes, com isto os autores propuseram uma correlação empírica. Além disso, os nanolubrificantes apresentaram comportamento não newtoniano e o incremento da temperatura causava efeito de redução da viscosidade, independentemente da concentração.

Al-Janabi et al. (2024) avaliaram a viscosidade de nanolubrificantes com óleo base POE com nanopartículas de grafeno (GR) e nanotubos de carbono multicamadas funcionalizadas (FMWCNT) com concentração em volume de 0,025-0,1%vol., na temperatura de 30-100 °C, com taxa de cisalhamento de 500-5000 s⁻¹. O comportamento da viscosidade reportado pela literatura, foi seguido de redução, com o aumento da temperatura e aumento com o incremento da concentração. Nas duas nanopartículas, apenas em baixa concentração, como 0,025%w.t., foi observado comportamento newtoniano, enquanto altas concentrações, como 0,050-0,1%w.t., demonstraram comportamento não newtoniano.

Wadzer; Ni htwe; Mamat (2025) obteve reduções da viscosidade de 6% e 8% quando utilizou nanolubrificantes com fluido base de OM de compressor e OM de motor com nanopartículas cerâmicas de Nitreto de Alumínio (NT) na concentração em volume de 0,13%vol. com surfactante SPAN80 nas temperaturas de 40-100 °C com taxa de cisalhamento constante (500 s⁻¹). Conforme trabalhos anteriores, uma redução da viscosidade com o aumento da temperatura.

A tabela 2.4 apresenta o resumo dos trabalhos encontrados sobre o estudo da viscosidade em nanolubrificantes.

Tabela 2.3a – Tabela de resumo de trabalhos da viscosidade em nanolubrificantes.

Autor	Nanolubrificante	ϕ [%]	Taxa de cisalhamento [s ⁻¹]	Temperatura de medição [°C]	Destaques
(ILYAS; PENDYALA; NARAHARI, 2017)	MWCNT /OM	0,1-1%w.t.	-	20-90	<ul style="list-style-type: none"> Redução com a temperatura; Aumento de até 54% (1,0%w.t.); Propôs correlação empírica.
(SANUKRISHNA et al., 2018)	Al ₂ O ₃ / SiO ₂ TiO ₂ /PAG	0.1-0.6%vol.	3,75-225	20-80	<ul style="list-style-type: none"> Aumento com a concentração; Aumento de até 10,32% (SiO₂ 0,6%w.t.); Redução com a temperatura; Comportamento não newtoniano para as concentrações avaliadas.
(PAMIES et al., 2018)	GR/LIs	0,005–1%w.t.	1-500	25-105	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de até 151% (1,0%w.t.); Redução com a temperatura; Comportamento não newtoniano para altas concentrações (0,5-1,0%w.t.).
(AL-JANABI; HUSSIN; ABDULLAH, 2021)	GR/POE MWCNT/POE	0,1%w.t.	500-5000	35-65	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de 20% (MWCNT puro); Aumento de 15% (GR puro); Redução com a temperatura; Redução da viscosidade com surfactante.

Legenda: MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas; OM: Óleo mineral; Al₂O₃: óxido de alumínio; SiO₂: dióxido de silício; TiO₂: dióxido de titânio; PAG: Polialquíleno glicol; LIs: Líquido iônico dicianamida; GR: Grafeno; POE: Polioéster.

Tabela 2.3b – Tabela de resumo de trabalhos da viscosidade em nanolubrificantes.

Autor	Nanolubrificante	ϕ [%]	Taxa de cisalhamento [s ⁻¹]	Temperatura de medição [°C]	Destaque
(SANUKRISHNA; PRAKASH, 2022)	GR /PAG	0,07-0,6%vol.	3,75-225	20-90	<ul style="list-style-type: none"> Redução com a temperatura; Aumento de 5x (0,6%vol.); Comportamento não newtoniano para altas concentrações.
(JOSHI et al., 2022)	MWCNT/OM	0,05–0,1%w.t.	-	20-80	<ul style="list-style-type: none"> Modelo Brinkman com mesma tendência de ganhos;
	MWCNT/POE				<ul style="list-style-type: none"> Aumento de 26,4% (MWCNT 0,1%w.t.); Aumento de 24,4% (GR 0,1%w.t.); Redução com a temperatura;
(SANUKRISHNA; JOSE, 2022)	CNT/PAG	0,05-0,2%vol..	1-500	25-105	<ul style="list-style-type: none"> Aumento de até 151% (1,0%w.t.); Comportamento não newtoniano; Propôs correlação empírica; Redução com a temperatura.
(AL-JANABI et al., 2024)	GR/POE	0,025-0,1%vol	500-5000		<ul style="list-style-type: none"> Redução com a temperatura;
	FMWCNT/POE				<ul style="list-style-type: none"> Aumento com concentração; Comportamento não newtoniano para altas concentrações (0,05-0,1%w.t.).

Legenda: CNT: Carbono de paredes múltiplas; FMWCNT: Nanotubo de carbono multicamadas funcionalizadas.

Tabela 2.3c – Tabela de resumo de trabalhos da viscosidade em nanolubrificantes.

Autor	Nanolubrificante	ϕ [%]	Taxa de cisalhamento [s ⁻¹]	Temperatura de medição [°C]	Destaques
(WADZER; NI HTWE; MAMAT, 2025)	NT/SPAN-80/OM-C NT/SPAN-80/OM-M	0,13%vol.	500	40-100	<ul style="list-style-type: none"> • Redução com a temperatura; • Aumento de 6% (OM-C.); • Aumento de 8% (OM-M);

Legenda: OM-C: Óleo mineral compressor; OM-M: Óleo mineral motor; NT: Nitreto de alumínio.

2.4.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica pode ser considerada como um dos parâmetros termofísicos de grande influência, por ser responsável pelo transporte de calor por condução e determinar os coeficientes de ebulição do fluido. Como resultado, melhorar a condutividade térmica com nanolubrificantes, pode ter um impacto notável na eficiência da transferência de calor em um sistema (SAID et al., 2023). Na literatura foi possível observar que alguns parâmetros podem influenciar o incremento ou decréscimo da condutividade de nanolubrificantes como a variação da concentração de nanopartículas, temperatura de operação, tipo ou tamanho de nanopartículas, adição de surfactantes ou funcionalização de nanopartículas.

Dentro da literatura, existem diversos trabalhos relacionados com condutividade térmica para avaliar o comportamento do nanofluido, e comparações com modelos teóricos. Shukla e Aiyer (2015) avaliaram a condutividade térmica para nanolubrificantes com óleo mineral (OM) e nanopartículas de diamante (ND) funcionalizado com ácido carboxílico (FAC) na concentração em massa de 0,01-1%w.t. Foi avaliado a condutividade térmica nas temperaturas de 40-120 °C com variação de 40 °C. Os autores observaram que conforme aumenta a concentração de nanopartículas se tem um incremento da condutividade térmica, tendo um incremento máximo de 14,5% na concentração intermediaria de 0,12%w.t., na temperatura de 40 °C, e foi observado que com o incremento da temperatura existe um aumento na condutividade térmica, mas o comportamento observado não é linear e dependente da concentração aplicada, sendo atribuído este efeito ao movimento browniano que aumenta por conta da variação de temperatura que aumenta a energia no sistema.

Zawawi et al. (2018) estudaram a condutividade térmica de nanolubrificantes com óleo PAG e nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3), dióxido de silício (SiO_2) e dióxido de titânio (TiO_2) com concentração em volume de 0.02-0.1%vol. Sendo as medições realizadas com temperaturas de 30-50 °C com variação de 10 °C. Segundo os autores a condutividade térmica dos nanolubrificantes híbridos eram acima dos lubrificantes puros, conforme aumentava a temperatura era reduzido a condutividade térmica e o maior incremento observado foi causado pelo aumento da concentração em volume de nanoparticulas que pode ser explicado com o aumento do movimento browniano e presença de nanocamada na interfase sólido-líquido, tendo um incremento máximo da condutividade térmica de ~3% para o nanolubrificante híbrido PAG/ Al_2O_3 - SiO_2 na concentração de 0,1%vol., na temperatura 30 °C.

Yang et al. (2020) realizou um estudo da condutividade térmica em nanolubrificanres de óleo mineral com nanofolhas de grafeno (NFGR) e surfactante Span85 nas concentrações de

10-30 mg/L, sendo medidos nas temperaturas de 30-70 °C com variações de 10 °C. Segundo os autores com incremento da temperatura e concentração obteve-se um aumento da condutividade térmica, tendo um aumento máximo de 5,9% para condição de 30 mg/L na temperatura de 70 °C.

Farade et al. (2021) realizaram uma pesquisa da condutividade térmica, avaliando seu comportamento com relação ao modelo proposto por Maxwell que está na Eq. (2.11), com nanolubrificantes de óleo de semente de algodão (OSA) com nanopartículas multicamadas de grafeno e surfactante SDBS, tendo concentração em massa de 0,001-0,01%w.t., sendo analisado nas temperaturas de 35-65 °C com variação de 10 °C. Segundo os autores com o aumento da concentração de nanopartículas obteve-se um aumento da condutividade e à medida que se aumentava a temperatura havia um incremento da condutividade térmica, o valor máximo obtido foi para concentração de 0,01%w.t. em 65 °C com um incremento de 18% e todas as amostras das condutividades térmicas experimentais foram acima do modelo de Maxwell.

$$K_{eff} = K_{fb} \left(\frac{K_{np} + 2K_{fb} + 2 * (K_{np} - K_{fb}) * \phi}{K_{np} + 2K_{fb} + (K_{np} - K_{fb}) * \phi} \right) \quad (2.11)$$

Al-Janabi et al. (2022) realizou um estudo de condutividade térmica quanto ao efeito da utilização de surfactantes com diferentes tipos de nanolubrificantes, sendo utilizado um óleo POE com nanopartículas de grafeno (GR), ou/e nanotubos de carbono funcionalizados (FMWCNT) na concentração em volume de 0,025-0,1%vol., com/sem surfactante CTAB. Os autores observaram que as proporções de 1:1 para GR e 1:8 para FMWCNT demonstraram ser as mais bem obtidas para estabilidade. As medições foram nas temperaturas de 25 °C e 45 °C que mostrou um aumento máximo da condutividade térmica de 2% para GR na concentração de 0,1%vol., com uma redução da condutividade térmica ao se utilizar surfactantes, e para FMWCNT na concentração de 0,1%vol., teve-se um aumento máximo de 7%, sendo observado o mesmo efeito de redução da condutividade térmica com a utilização de surfactantes. Segundo os autores, as nanopartículas de grafeno sem surfactantes apresentaram a maior condutividade térmica e que com o aumento da concentração de nanopartículas teve-se um aumento da condutividade térmica.

Aljuwayhel et al. (2023) realizaram um estudo da condutividade térmica tendo como diferencial a análise do comportamento não convencional em nanolubrificantes com óleo base

POE e nanopartículas de diamante (ND) com concentrações em volume de 0,05-0,1%vol., que foram realizadas medições nas faixas de temperatura de 10-100 °C com variação a cada 10 °C. Sendo observado pelos autores que com o aumento da temperatura observou-se uma redução da condutividade térmica tanto no fluido base quanto os nanolubrificantes, que foi algo contrário ao convencional. Segundo os autores, isso se deve ao fato de que fluido base com aumento da temperatura se expande, que faz com que suas moléculas se afastem umas das outras, causando uma redução na condutividade térmica, logo sendo um comportamento comum em líquidos de base orgânica. Foi observado que os nanolubrificantes conforme esperado, com o incremento da concentração proporcionou um aumento da condutividade térmica, no qual se obteve para 0,5%vol. um incremento máximo de 15% na condutividade térmica a 10 °C e 13,7% na condutividade térmica a 100 °C demonstrando que a mudança de temperatura tem um impacto direto no fluido base e não nas nanopartículas.

Said et al. (2023) realizaram um estudo da condutividade térmica com uma simulação numérica aplicando a correlação de Yu e Choi descrita na Eq. (2.12) com coeficiente da espessura da camada interfacial como $\beta=1$ e a correlação de Hamilton descrita na Eq. (2.13), para observar o efeito de nanolubrificantes com fluidos refrigerantes, aplicando o efeito de nanocamada. Segundo os autores foi possível prever para óleo base de POE, nanopartículas de MWCNTs com concentração em volume de 0,5-2%vol. e fluidos refrigerantes R134a e R152a, que ao aplicar nanolubrificantes foi possível observar incrementos da condutividade com o aumento da concentração de nanopartículas, tendo incrementos máximos de 57,06% e 57,12% com a fração em volume em 2%vol. de nanopartículas. Os autores apresentam este incremento foi por causa do movimento browniano que influencia a condutividade térmica dos nanolubrificantes e com o uso de nanopartículas aumenta a área de superfície efetiva disponível para transmissão de calor, resultando em uma taxa de transferência de calor mais rápida.

$$K_{NR} = K_R \left(\frac{K_{np} + 2K_R + 2 * (K_{np} - K_R) * \phi * (1 + \beta)^3}{K_{np} + 2K_R + (K_{np} - K_R) * \phi * (1 + \beta)^3} \right) \quad (2.12)$$

$$K_{np-fb} = K_{fb} \left(\frac{K_{np} + 2K_{fb} + 2 * (K_{fb} - K_{np}) * \phi}{K_{np} + 2K_{fb} + (K_{fb} - K_{np}) * \phi} \right) \quad (2.13)$$

Muhamad Zulkflee e Mamat (2024) realizaram um trabalho para analisar a condutividade térmica em diferentes tipos de nanopartículas quando aplicadas em nanolubrificantes com

fluido base de POE com nanopartículas de grafeno (GR), nitreto de alumínio (NT) e titanato de bário (BTO) nas concentrações em volume de 0,05-0,1%vol. Segundo os autores todos os nanolubrificantes apresentaram incrementos ao comparar com o fluido base e que com o aumento da concentração teve incremento da condutividade térmica, dentre os nanolubrificantes os que continham nanopartículas de grafeno demonstraram a melhor condutividade térmica, tendo um incremento máximo de 11,2% com concentração de 0,1%vol. Este aumento da condutividade térmica de nanopartículas de GR acima das outras, pode ser explicado como a alta razão de aspecto, geometria bidimensional e rigidez do grafeno que aumentaria o fluxo de calor de fônon devido ao movimento browniano e a rede de nanopartículas com a estrutura bidimensional das nanopartículas são as possíveis razões para o aumento da condutividade térmica.

Em estudos mais recentes, Wadzer, Ni Htwe e Mamat (2025) realizaram um comparativo sobre a condutividade térmica de diferentes nanopartículas em nanolubrificantes com óleo mineral (OM), avaliando o efeito da aplicação de surfactantes. Foram analisadas nanopartículas de grafeno (GR) e nitreto de alumínio (NT) em concentrações volumétricas de 0,09%vol. e 0,13%vol., combinadas com os surfactantes SBTS, CTAB e SPAN-80 na razão de mistura 1:1. As medições foram realizadas em temperatura ambiente. Os resultados indicaram que todos os nanolubrificantes apresentaram condutividade térmica superior à do fluido base. No entanto, o nanolubrificante contendo grafeno com CTAB mostrou o maior incremento, alcançando um aumento de aproximadamente 16%. Segundo os autores, a justificativa para o aumento da condutividade térmica está diretamente relacionada à estabilidade. Quando as partículas se agregam, ocorrem alterações em sua morfologia e no tamanho hidrodinâmico, resultando em maior sedimentação e, consequentemente, o sistema coloidal tem uma condutividade térmica reduzida. Assim, uma melhor estabilidade das nanopartículas no fluido favorece um desempenho térmico superior.

Como finalização desta secção, na Tabela 2.4 foi descrito um resumo dos trabalhos citados com relação à condutividade térmica de nanolubrificantes.

Tabela 2.4a – Tabela de resumo de trabalhos da condutividade térmica em nanolubrificantes.

Autor	Nanolubrificante	ϕ [%]	Temperatura de medição [°C]	Destaques
(SHUKLA; AIYER, 2015)	ND/FAC/OM	0,01-1%w.t.	40-120	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 14,5% para 0,12%w.t. e 40 °C; • Aumento com a concentração em massa e com a temperatura, não linear.
(ZAWAII et al., 2018)	Al ₂ O ₃ / SiO ₂ / TiO ₂ /PAG	0.02-0.1%vol.	30-50	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de ~3% para 0,1%vol. e 30 °C; • Redução com aumento da temperatura; • Aumento com a concentração.
(YANG et al., 2020)	NFGR/SPAN85/OM	10-30 mg/L	30-70	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 5,9% para 10-30 mg/L e 70 °C; • Aumento com a concentração em massa e com a temperatura.
(FARADE et al., 2021)	GR/SDBS/OSA	0,001-0,01%w.t.	35-65	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 18% para 0,01%w.t. em 65 °C; • Aumento com a concentração em massa e com a temperatura. • Acima do modelo de Maxwell.

Legenda: ND: Nanopartículas de diamantes; FAC: Funcionalização com ácido carboxílico; OM: Óleo mineral; Al₂O₃: Óxido de alumínio; SiO₂: Dióxido de silício; TiO₂: Dióxido de titânio; PAG: Polialquileno glicol; NFGR: Nanofolhas de grafeno; GR: Grafeno; OSA: Óleo de semente de algodão.

Tabela 2.4b– Tabela de resumo de trabalhos da condutividade térmica em nanolubrificantes.

Autor	Nanolubrificante	$\phi[\%]$	Temperatura de medição [°C]	Destaques
(AL-JANABI et al., 2022)	GR/CTAB /POE FMWCNT/CTAB /POE	0,025-0,1%vol.	25-45	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 2 % no GR e 7% no FMWCNT para 0,1%vol; • Aumento com a concentração em massa e com a temperatura; • Maior sem surfactantes.
(ALJUWAYHEL et al., 2023)	ND/POE	0,05-0,1%vol.	10-100	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 15% para 0,5%vol. e 10 °C; • Aumento com a concentração; • Redução com aumento da temperatura.
(SAID et al., 2023)	MWCNTs/POE	0,5-2%vol.	-	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 57,12% para 2%vol. e 10 °C; • Simulação numérica (Yu e Choi; Hamilton).
(MUHAMAD ZULKFLEE; MAMAT, 2024)	GR/POE NT/POE BTO /POE	0,05-0,1%vol	-	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 11,2% para GR e 0,1%vol.; • Aumento com a concentração em massa e com a temperatura.

Legenda: FMWCNT: Nanotubos de carbono funcionalizados; POE: óleo polioléster; MWCNTs: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas; NT: Nitreto de alumínio; BTO: Titanato de bário.

Tabela 2.4c– Tabela de resumo de trabalhos da condutividade térmica em nanolubrificantes.

Autor	Nanolubrificante	ϕ[%]	Temperatura de medição [°C]	Destaques
(WADZER; NI HTWE; MAMAT, 2025)	GR/SBTS/CTAB/SPAN80/OM NT/SBTS/CTAB/SPAN80/OM	0,09%vol. e 0,13%vol.	T _{amb}	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento máximo de 16 % no GR/CTAB para 0,09%vol e T_{amb}; • Maior estabilidade com CTAB.

Legenda: NT: Nitreto de alumínio; Tamb: Temperatura ambiente.

2.5 Utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração

Os sistemas de refrigeração têm despertado grande interesse quanto à sua otimização, visando a redução do consumo energético e o aumento da capacidade de refrigeração, como uma das abordagens para alcançar esses objetivos, são realizados estudos quanto ao uso de novos aditivos, como nanopartículas em lubrificantes convencionais, formando os nanolubrificantes. Esses aditivos se destacam por apresentarem baixa toxicidade, condutividade superior ao fluido base, incremento na viscosidade, melhorar a lubrificação dos componentes com redução do atrito e desgaste. Nesse contexto dentro da literatura diversos trabalhos têm estudado os efeitos da aplicação de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração, indicando redução de quedas de pressão, diminuição da temperatura de descarga, aumento da eficiência do compressor, melhorar na capacidade de refrigeração, incremento do coeficiente de desempenho (COP) e entre outros.

Neste contexto, Xing; Wang; Yu (2014) investigaram um refrigerador doméstico com R600a aplicando um nanolubrificante de óleo base de OM com nanopartículas de fulereno (C_{60}) com concentração de 1-3 g/L. Tendo como diferencial a implementação de três circuitos de refrigeração em paralelo com o objetivo de controlar rigorosamente as condições de teste, como temperatura ambiente, temperatura de sucção, temperatura de sub-resfriamento, pressões de evaporação e condensação. Foi observado que a capacidade de refrigeração teve um incremento máximo de 1,2% que, segundo os autores, foi um aumento insignificante, atribuído ao uso de um separador de óleo no sistema, o qual limita a atuação direta das nanopartículas em outros componentes do ciclo. Por outro lado, a potência consumida pelo compressor apresentou um decremento de 4,58%, atribuído ao efeito de melhor lubrificação do par cilindro-pistão, melhorando a autorreparação, levando a redução significativa da potência de entrada. Adicionalmente, foi observado um incremento no COP de 5,6% e uma redução da temperatura de descarga de 3 °C.

Lou; Zhang; Wang (2015) realizaram um estudo de um refrigerador com fluido refrigerante R600a, aplicando nanolubrificantes de óleo base de OM com nanopartículas de grafeno com concentrações em massa de 0,05-0,5%w.t. O diferencial deste trabalho foi a análise do comportamento no tempo de pull-down que corresponde ao tempo necessário para que a temperatura interna do refrigerador, inicialmente em condição ambiente, atinja a temperatura de projeto, foi utilizado um sistema auxiliar para controle das variáveis como

umidade relativa do ar, temperatura ambiente, radiação direta e indireta, velocidade do fluxo de ar. Os resultados demonstraram que a aplicação do nanolubrificante proporcionou uma redução máxima de 15,22% no tempo de pull-down, na concentração de 0,1% w.t. Além disso, observou-se uma redução no consumo de energia de até 4,55%, também para essa mesma concentração. Com relação à temperatura superficial do compressor foi observado reduções para as concentrações de até 0,1%w.t. e para concentrações superiores foi observado incremento, atribuído ao alto valor de condutividade térmica das nanopartículas, que promovem uma maior troca de calor, facilitando a saída de calor do compressor.

Marcucci Pico et al. (2019) realizaram uma investigação experimental do desempenho de um sistema de refrigeração operando com fluido refrigerante R134a, aplicando nanolubrificantes com óleo base de POE e nanopartículas de diamante com contração em massa de 0,1-0,5%w.t., este trabalho apresenta como diferencial a utilização de um compressor hermético tipo scroll com aplicando variações nas frequências de entrada da potência, pode acentuar situações críticas de lubrificação, e foi implementado um sistema auxiliar para controle da carga térmica no circuito principal. Foi observado pelos autores que a capacidade de refrigeração aumentou principalmente em baixas frequências de operação, tendo um incremento máximo de 7% para concentração de 0,5%w.t., na condição de operação de temperatura de evaporação de -7 °C e frequência de operação de 45 Hz. Adicionalmente, observou-se que a potência de entrada do compressor permaneceu aproximadamente constante. Esse efeito se deve à utilização do compressor scroll, que com a variação da frequência, promove um tempo maior para deslocamento entre bolsões de alta e baixa pressão. Quanto ao COP, foi observado um incremento máximo de 3% e na temperatura de descarga do compressor uma redução de 4 °C, na mesma concentração e condições de operação da melhor capacidade de refrigeração.

Adelekan et al. (2019) analisaram um refrigerador doméstico com fluido refrigerante de R600a aplicando um nanolubrificante óleo base de OM com nanopartículas de grafeno com contração de 0,2-0,6 g/L. Os autores observaram que a concentração de 0,4 g/L apresentou o melhor resultado, tendo na capacidade de refrigeração volumétrica incremento de 30%, mas na potência consumida teve aumento de 5% e no COP teve um incremento de 4%.

Babarinde et al. (2020) investigaram o comportamento de um refrigerador doméstico com fluido refrigerante R600a quando aplicado nanolubrificantes de óleo base de OM com nanopartículas de grafeno com concentração de 0,2-0,6 g/L. Os resultados demonstraram que a melhor concentração foi 0,2 g/L melhorando o tempo de pull-down com redução de

aproximadamente 26%, um incremento na capacidade de refrigeração de 33,4%, incremento no COP de 45% e redução na pressão de descarga de 34,4%.

De acordo com Wang; Zhang; Liao (2020) a utilização de nanolubrificantes de óleo base OM e nanopartículas de fulerenos (C70) e ferrita de níquel (NiFe_2O_4) na concentração em 2 g/L, estabilizadas com o surfactante Span-80, em um refrigerador doméstico com fluido refrigerante R22, sendo testados através de um calorímetro composto de dois circuitos de refrigeração, permitindo o controle preciso das temperaturas de sub-resfriamento e de operação. Foi possível observar uma redução de 0,31% na potência de entrada e um aumento de 0,94% na capacidade de refrigeração, resultando em uma melhoria de 1,23% no COP. Esse desempenho superior foi atribuído à diminuição do desgaste dos componentes do compressor e ao aumento da eficiência volumétrica do sistema, proporcionados pelas melhores propriedades de lubricidade e condutividade térmica do nanolubrificante.

Marcucci Pico et al. (2020) avaliaram o desempenho de nanolubrificantes de óleo base POE com nanopartículas de diamante na concentração em massa de 0,1-0,5%w.t., aplicados em um sistema de refrigeração experimental utilizando o fluido refrigerante R32, que possui menor GWP em comparação a alguns refrigerantes convencionais. O estudo incluiu variações na frequência da potência de entrada. Os resultados mostraram que, com aumento da temperatura de evaporação havia um aumento da capacidade de refrigeração para óleo base, alcançando um incremento máximo na capacidade de refrigeração de 2,4% para concentração de 0,5%w.t., operando na temperatura de evaporação de 1 °C e frequência da potência de entrada de 45 Hz. Também foi avaliada a temperatura de descarga, que apresentou uma redução máxima de 2 °C, enquanto a potência ativa do compressor apresentou decrementos apenas de 0,5% que segundo os autores estão dentro da faixa de incerteza, não tendo um impacto significativo. Consequentemente, o COP teve um aumento de até 3,2%, nas mesmas condições da melhor capacidade de refrigeração. Os autores destacam que os efeitos das nanopartículas foram mais evidentes em condições críticas de operação, caracterizadas por baixa frequência e baixa temperatura de evaporação, nas quais as limitações na lubrificação tornam-se mais relevantes.

Yang et al. (2020) analisaram um refrigerador doméstico com compressor hermético alternativo com fluido refrigerante R600a, quando aplicado um nanolubrificante de óleo base OM com nanolubrificantes de nanofolhas de grafeno com concentração de 10-30 mg/L, estabilizados com surfactante de Span85. Neste estudo, os autores utilizaram sistemas auxiliares para controlar parâmetros como umidade relativa, vazão de ar, temperatura ambiente por se tratar de sistemas com evaporadores sensíveis às flutuações dessas condições. Por se tratar de

um refrigerador doméstico com dois compartimentos em que na parte de cima o freezer operava a -18°C e parte debaixo que era compartimento de alimentos frescos operavam a 5°C , foi realizado um teste de pull-down apenas no freezer para avaliar a taxa de resfriamento, tendo um aumento máximo 4,5% para concentração de 30 mg/L. Os autores também observaram o mesmo efeito quando realizaram um teste com uma embalagem M com líquido para medir a capacidade de congelamento do freezer conforme Fig. 2.9 mostrando as mudanças de fases (estado de líquido, saturação, líquido sub-resfriado e solidificação) que demonstrou uma redução do tempo de congelamento de 10% na concentração de 30 mg/L. Além disso, a temperatura e pressão de descarga foram reduzidas em 4,6% e 7%, esse efeito foi atribuído à redução das perdas por atrito no compressor. Por conta deste refrigerador ser doméstico e ter um ciclo on-off, foi avaliado num período de 24 horas os ciclos ligados e observado uma redução máxima no consumo de energia elétrica de 20,4% para concentração de 30 mg/L. Também foi relatado uma diminuição na temperatura da carcaça do compressor, temperaturas de entrada e saída do condensador com a utilização de nanolubrificantes e os autores conseguiram uma repetibilidade dos resultados com 30 dias, tendo um desvio padrão máximo de 0,05.

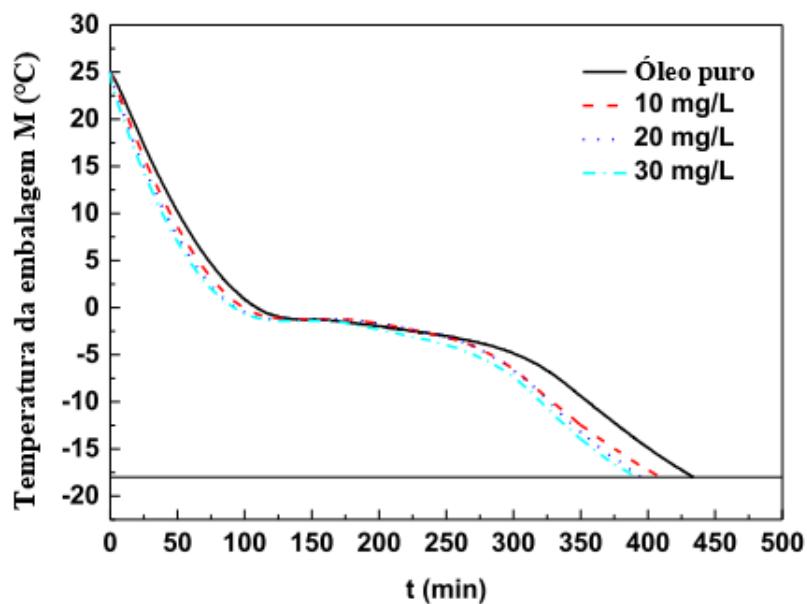


Figura 2.9 – Comparaçao das taxas de resfriamento das embalagens M no congelador. Fonte: Adaptado de Yang et al. (2020).

Salem (2020) apresentou uma análise sobre o efeito da adição de nanolubrificantes com óleo base de POE e nanopartículas de nanotubos de carbono de multicamadas (MWNCTs) com

concentração em massa de 0,1-0,5%w.t., dentro de um sistema de refrigeração por compressão de vapor (VCRS) com fluido refrigerante R134a, acoplada com uma unidade de aquecimento para controle de carga térmica no evaporador. Os resultados mostraram que o melhor desempenho foi obtido na concentração de 0,5% w.t., incremento de 13,1% na potência consumida, melhoria de 27% na transferência de calor no condensador, além de uma redução de 11,5% na vazão da massa específica do refrigerante, e um aumento de 17,4% no COP. Os ganhos na capacidade de refrigeração e na transferência de calor no condensador estão associados ao maior movimento Browniano das nanopartículas, que favorece a taxa de transferência de calor no sistema. Por outro lado, o aumento na potência consumida foi atribuído ao crescimento do volume específico do refrigerante na entrada do compressor, causado pelo maior superaquecimento do nano-refrigerante em concentrações mais altas, o que também levou à redução da vazão mássica do refrigerante. O estudo ainda propôs uma correlação experimental para previsão do COP do sistema.

Jong et al. (2021) realizaram uma investigação sobre um sistema de refrigeração com fluido refrigerante R134a do efeito dos nanolubrificantes de óleo base POE com nanopartículas de MWNCTs com concentração em volume de 0,1%vol., foi feita uma análise experimental e teórica. Os autores realizaram um teste experimental para determinar o comportamento da pressão de sucção no compressor. Por meio desses resultados foi proposto um modelo para prever o comportamento da pressão de sucção no compressor, utilizando correlações e os modelos termodinâmico foi calculado o consumo de energia do compressor que pode ser reduzido em até 7%, o coeficiente de transferência de calor em ebulação em fluxo pode ter um incremento de até 5,8% e finalmente a viabilidade de melhorar do COP em até 28,4%.

Madhyira; Babarinde; Mashinini (2022) realizou uma análise do refrigerador doméstico mudando o fluido refrigerante R134a para R600a, e aplicando nanolubrificantes de óleo base OM com nanopartículas de grafeno com concentração de 0,2-0,6 g/L. Os resultados apresentaram que a mudança do fluido refrigerante não apresenta decrementos na capacidade de refrigeração nem na mudança do fluido para R600a quanto para qualquer concentração de nanopartículas empregadas, sendo observado um incremento máximo de 14,2% para concentração de 0,2 g/L, sendo atribuído ao efeito da maior condutividade térmica da nanopartícula com relação ao fluido base, proporcionando uma maior troca de calor no evaporador. Da mesma forma nenhuma das condições apresentaram um valor de potência consumida maior que o fluido refrigerante de R134a, tendo um decremento máximo de 26,4% na concentração de 0,2 g/L, efeito atribuído a redução do coeficiente de atrito e desgaste do compressor devido as

nanopartículas de grafeno, que resulta em menor potência de bombeamento requerida. Por consequência, a pressão de descarga do compressor apresentou o mesmo efeito da potência consumida, tendo um decreto máximo de aproximadamente 43% na mesma concentração. Por fim, temos o COP que, por conta do aumento da capacidade de refrigeração e redução da potência consumida, apresenta um incremento máximo de 38% na concentração 0,2 g/L, demonstrando que nanopartículas de grafeno podem ser uma promissora alternativa para aditivos em nanolubrificantes.

Recentemente; Dağıdir; Bilen (2023) realizaram um estudo sobre a utilização de nanolubrificantes de óleo base de POE com nanopartículas de óxido de alumínio (Al_2O_3) com concentração em massa de 0,250-1%w.t. ou alótropos de carbono (grafeno (GR) ou nanotubos de carbono (CNT)), com concentração em massa de 0,125-0,375%w.t., aplicando em um sistema de refrigeração com compressão a vapor com um compressor semi-hermético, utilizando o R1234yf um fluido refrigerante alternativo. Os resultados indicaram uma redução da potência consumida para nanopartículas de Al_2O_3 até a concentração de 0,750%w.t., com um valor máximo de 6,26%. No caso dos alótropos de carbono, as nanopartículas de GR até a concentração de 0,250%w.t., com um valor máximo de 6,82% para 0,250%w.t., consequentemente as nanopartículas de CNT apresentaram o mesmo comportamento, tendo uma redução até a concentração de 0,250%w.t. e valor máximo de 5,55%. Os autores definem que as nanopartículas têm uma concentração ideal importante para estabilidade e obter os melhores incrementos do sistema e que uma possível explicação para as nanopartículas de GR terem o melhor resultado da potência consumida reduzida, pode ser pelo fato que o coeficiente de condutividade térmica ser de 4840 a 5300 [W/(m·K)] enquanto o CNT ser 3500 [W/(m·K)] e Al_2O_3 ser 40 [W/(m·K)].

Na revisão realizada por Marcucci Pico; Parise; Bandarra Filho (2023) e bibliografia levantada foi demonstrado que em relação a nanopartículas de alótropos e compósitos de carbono poucos artigos são encontrados quando a sua aplicação em sistemas de refrigeração com compressão de vapor (VCSR) em comparação com a nanopartículas de óxidos conforme demonstrado na Fig. 2.10 com dados das referências utilizadas no Apêndice I. Onde na Fig. 2.10 (a) foram plotados os incrementos no COP reportados pelos autores que aplicaram nanolubrificantes em sistemas de refrigeração como uma função da concentração e da natureza das nanopartículas (carbono, óxidos e compósitos). Já na Figura 2.10 (b) foram reportadas as reduções da potência de acionamento do compressor em função da concentração. Portanto, se pode observar uma tendência de melhoria do desempenho de sistemas de refrigeração pela

utilização de nanolubrificantes. Sendo demonstrado a elevada quantidade de trabalhos em que nanopartículas de óxidos foram aplicados, quando comparados com os poucos trabalhos com nanopartículas de carbono que contemplam ambos os requisitos, logo mais estudos são necessários para descrever o comportamento de nanopartículas de alótropos de carbono quando aplicadas em VCSR.

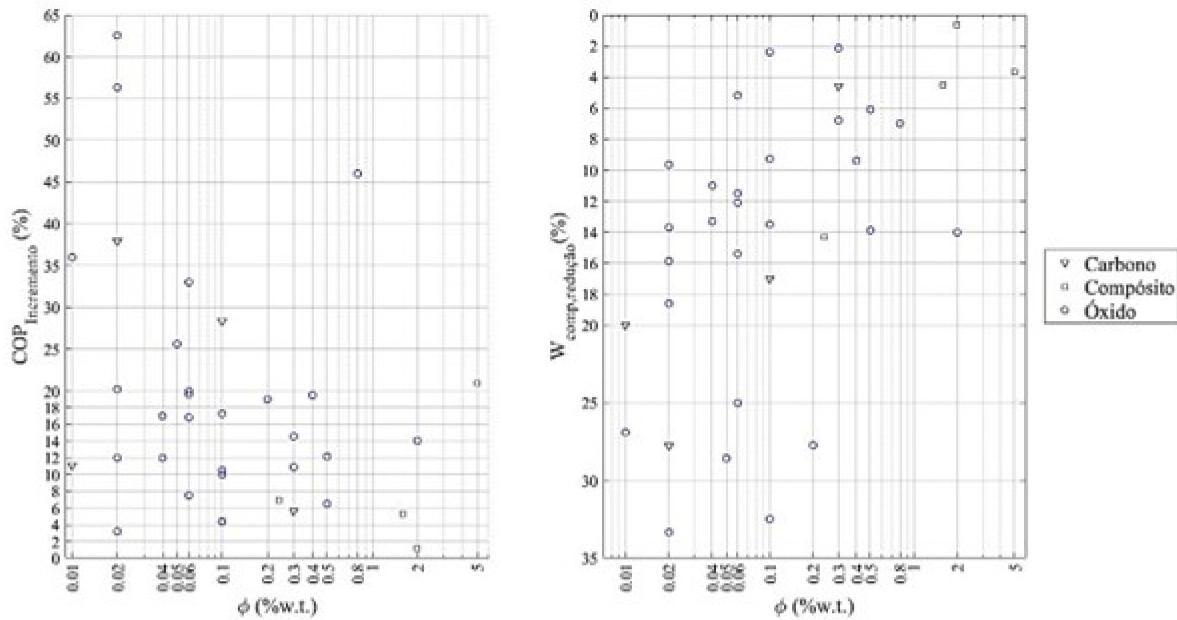


Figura 2.10 – (a) Incremento do COP (%) e (b) redução da potência consumida (%) em função da concentração mássica (%w.t.) de nanopartículas.

Para finalizar este capítulo, a Tabela 2.5 apresenta, de forma resumida, as informações mais relevantes dos estudos analisados sobre a aplicação de nanopartículas de alótropos de carbono em sistemas de refrigeração, destacando seus principais resultados e contribuições para a melhoria do desempenho termodinâmico desses sistemas.

Tabela 2.5a – Tabela de resumo de trabalhos da utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração.

Autor	Nanolubrificante	$\phi[\%]$	Refrigerante	Destaque
(XING; WANG; YU, 2014)	C ₆₀ /OM	1-3 g/L	R600a	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de 1,2% na capacidade refrigeração; • Redução de 4,58% no consumo do compressor; • Aumento de 5,6% no COP; • Redução de 3 °C na temperatura de descarga.
(LOU; ZHANG; WANG, 2015)	GR/OM	0,05-0,5%w.t.	R600a	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de 15,22% no tempo de pull-down; • Redução de 4,55% no consumo de energia; • Temperatura superficial do compressor mais baixa, para até 0,1%w.t.
(MARCUCCI PICO et al., 2019)	ND/POE	0,1-0,5%w.t.	R134a	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração ótima foi a de 0,5%w.t.; • A frequência ótima foi a de 45 Hz; • Temperatura de Evaporação ótima em -7 °C; • Aumento de 7% na capacidade de refrigeração; • Sem mudanças significativas na potência consumida; • Aumento de 3% no COP; • Redução na temperatura de descarga de 3 °C.

Legenda: C₆₀: Fulereno; OM: Óleo mineral; GR: Grafeno; ND: Nanopartículas de diamantes; POE: Polioéster.

Tabela 2.5b – Tabela de resumo de trabalhos da utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração.

Autor	Nanolubrificante	$\phi[\%]$	Refrigerante	Destaques
(ADELEKAN et al., 2019)	GR/OM	0,2-0,6 g/L	R600a	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração ótima foi a de 0,4 g/L; • Aumento de 30% na capacidade de refrigeração; • Aumento de 5% na potência consumida; • Incremento de 4% no COP.
(BABARINDE et al., 2020)	GR/OM	0,2-0,6 g/L	R600a	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração ótima foi a de 0,4 g/L; • Redução de ~26% no tempo de pull-down; • Aumento de 33,4% na capacidade de refrigeração; • Incremento de 45% no COP; • Redução de 34,4% na pressão de descarga.
(WANG; ZHANG; LIAO, 2020)	C ₇₀ /NiFe ₂ O ₄ /Span-80/OM	0,1-0,5%w.t.	R22	<ul style="list-style-type: none"> • Redução de 0,31% no consumo de energia; • Aumento de 0,94% na capacidade de refrigeração; • Aumento de 1,23% no COP.
(MARCUCCI PICO et al., 2020)	ND/POE	0,1-0,5%w.t.	R32	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração ótima foi a de 0,5%w.t.; • A frequência ótima foi a de 45 Hz; • Temperatura de evaporação ótima em 1 °C • Aumento de 2,4% na capacidade de refrigeração; • Redução de 2 °C na temperatura de descarga; • Sem impacto significativo na potência consumida; • Incremento de 3,2% no COP.

Legenda: GR: Grafeno; OM: Óleo mineral; C₇₀: Fulerenos; NiFe₂O₄: Ferrita de níquel; ND: Nanopartículas de diamantes; POE: Polioéster.

Tabela 2.5c – Tabela de resumo de trabalhos da utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração.

Autor	Nanolubrificante	ϕ [%]	Refrigerante	Destaque
(YANG et al., 2020)	NFGR/Span-85/OM	10-30 mg/L	R600a	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração ótima foi a de 30 mg/L; • Redução de 4,5% no tempo de pull-down no freezer; • Decremento de 10% no tempo de congelamento; • Redução de 4,6% na temperatura de descarga; • Decremento de 7% na pressão de descarga; • Redução de 20,4% no consumo de energia; • Menor temperatura carcaça do compressor; • Menor temperatura entrada e saída do condensador; • Repetibilidade dos testes após 30 dias.
(SALEM, 2020)	MWNCTs /POE	0,1-0,5%w.t.	R134a	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração ótima foi a de 0,5%w.t.; • Incremento de 13,1% no consumo de energia; • Aumento de 27% na transferência de calor do condensador; • Redução de 11,5% na vazão da massa específica do refrigerante; • Aumento de 17,4% no COP; • Propôs correlação empírica para COP.

Legenda: NFGR: Nanofolhas de grafeno; OM: Óleo mineral; MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas; POE: Polioéster.

Tabela 2.5d – Tabela de resumo de trabalhos da utilização de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração.

Autor	Nanolubrificante	$\phi[\%]$	Refrigerante	Destaques
(JONG et al., 2021)	MWNCTs/POE	0,1%vol.	R134a	<ul style="list-style-type: none"> • Propôs correlação empírica para pressão de sucção; • Redução em até 7% no consumo de energia; • Incremento de 14,2% capacidade de refrigeração; • Redução de 26,4% na potência consumida; • Decremento de até 43% na pressão de descarga; • Incremento de 38% no COP.
(MADYIRA; BABARINDE; MASHININI, 2022)	GR/OM	0,2-0,6 g/L	R134a R600a	<ul style="list-style-type: none"> • Viabilizaram a mudança do R134a para R600a; • A concentração ótima foi a de 0,2 g/L; • Aumento de 33,4% na capacidade de refrigeração; • Incremento de 45% no COP; • Redução de 34,4% na pressão de descarga.
(DAĞIDIR; BILEN, 2023)	Al ₂ O ₃ /POE GR/POE CNT/POE	0,250-1%w.t. 0,125-0,375%w.t. 0,125-0,375%w.t.	R1234yf	<ul style="list-style-type: none"> • A concentração ótima foi a de 0,750 w.t. (Al₂O₃); • A concentração ótima foi a de 0,250 w.t. (GR); • A concentração ótima foi a de 0,250 w.t. (Al₂O₃); • Redução de 6,26%, 6,82% e 5,55% na potência consumida de Al₂O₃, GR e CNT.

Legenda: MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas; POE: Polioéster; GR: Grafeno; OM: Óleo mineral; Al₂O₃: óxido de alumínio; CNT: Carbono de paredes múltiplas.

CAPÍTULO III

METODOLOGIA EXPERIMENTAL

3.1 Síntese dos nanolubrificantes e estabilidade

Neste trabalho foi utilizado como fluido base o óleo POE ISO VG 32 como lubrificante para compressor hermético alternativo, fornecido pela empresa Tecumseh do Brasil Ltda, 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 intercamadas acopladas, um tamanho lateral da primeira camada pequena e um indicie de aglomeração esférica de aproximadamente 25 nanômetros conforme pode ser observado na Fig. 3.1, que definiu o tipo de nanopartícula que será aplicada neste trabalho.

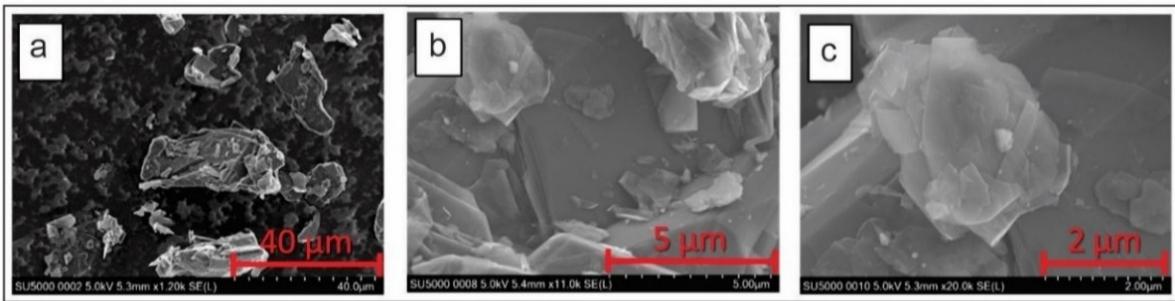


Figura 3.1 – Imagens SEM do grafeno tipo A0 investigado em 3 níveis de ampliação diferentes.
a) Escala 40 μm . b) Escala 5 μm . c) Escala 2 μm . Fonte: Adaptado de Tomanik et al., (2023).

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.

Para o cálculo da quantidade de nanopartículas para síntese dos nanolubrificantes foi utilizada a Eq. (3.1) em função das concentrações de massa desejadas.

$$\phi_m = \frac{m_{np}}{m_{np} + m_{fb}} \quad (3.1)$$

Na equação 3.1 temos ϕ_m concentração em massa de nanopartículas, m_{np} massa de nanopartículas, m_{fb} massa do fluido base.

Conforme visto na revisão da literatura, os trabalhos demonstraram que a aplicação de baixas concentrações e a utilização de um dispersante contribuem 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. O volume das amostras foi definido para serem realizados em duas etapas, na primeira foi utilizado a quantidade de 80 ml por amostra para realização dos testes de condutividade térmica, viscosidade, massa específica e análise de estabilidade, e para segunda etapa as amostras que mostrarem ser o melhor tipo de nanopartículas será aplicada no sistema de refrigeração com quantidade de 180 ml.

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 que utilizou para calcular a m_{fb} se baseando na massa específica do óleo base POE de 0,975 g/cm³ a 25 °C e para calcular a m_{np} a quantidade em massa de nanopartícula em cada concentração, e com isto em uma balança digital da marca Shimadzu do modelo AUY220 com precisão de quatro dígitos com fundo de escala de 220 g, 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 Qsonic do modelo Q500, para sintetizar o óleo lubrificante e a nanopartícula.

Para a definição dos parâmetros para síntese da mistura, foram utilizados os trabalhos da revisão bibliográfica Abdullah, (2021), Ahmed e Ahamed, (2022), Al-Janabi et al., (2022), Sanukrishna e Jose, (2022) e, Saufi e Mamat, (2022). Na Tabela 3.1, foi demonstrado de forma resumida o processo realizado para síntese dos nanolubrificantes produzidos no presente trabalho e Fig. 3.2 demonstra de forma esquemática o processo de síntese, realizado. Após o processo de síntese, os nanolubrificantes foram armazenados para análise da estabilidade.

Tabela 3.1 – Tabela de parâmetros da síntese, definidos com base na revisão bibliográfica.

Nanopartículas	Amostra	Concentração (w.t.%)	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 Agitador ultrassônico	20	1250	40-50	–	–
	1.2	0,01		30	–	20-40	20	0,7
	1.3	0,05						
	1.4	0,1						
Tipo 2	2.1	0,005	Agitador magnético Agitador ultrassônico	20	1250	40-50	–	–
	2.2	0,01		30	–	20-40	20	0,7
	2.3	0,05						
	2.4	0,1						
Tipo 3	3.1	0,005	Agitador magnético Agitador ultrassônico	20	1250	40-50	–	–
	3.2	0,01		30	–	20-40	20	0,7
	3.3	0,05						
	3.4	0,1						

Legenda: Temp.: Temperatura; Veloc.: Velocidade.

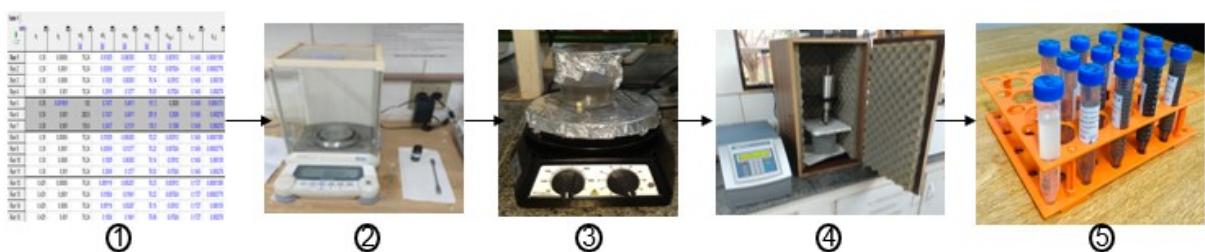


Figura 3.2 – Síntese dos nanolubrificantes: (1) Cálculo da quantidade em massa; (2) Pesagem dos materiais; (3) Processo de mistura com agitado magnético; (4) Processo de mistura com agitador ultrassônico; (5) Mistura final dos nanolubrificantes.

Para avaliação da estabilidade dos nanolubrificantes que foram produzidos, foi feita a análise dos dados sobre a dispersão das nanopartículas no lubrificante base ao longo do tempo, utilizando algumas metodologias da literatura para avaliação dessa estabilidade, no qual entre as mais utilizadas se destacam: a inspeção visual das amostras ao longo do tempo, potencial

Zeta e a absorbância (YILDIZ; AĞBULUT; GÜREL, 2021). Os métodos adotados no presente estudo foram o método de absorbância e o método de inspeção visual. No método de absorbância foi utilizado um espectrofotômetro da marca Shimadzu do modelo UV-1900 demonstrado na Fig. 3.3, 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).



Figura 3.3 – Equipamento espectrofotômetro da marca Shimadzu, modelo UV-1900.

O processo da análise de estabilidade foi realizado por um período inicial de 20 dias com amostras a cada um dia e posteriormente feito análise durante 6 meses com amostras a cada 10 dias. Para uma melhor compressão dos efeitos da sedimentação das nanopartículas foi desenvolvido gráficos da variação nas amostras comparando a relação da concentração inicial no primeiro dia com a redução da concentração com o decorrer de 20 dias e durante 6 meses, sendo complementado com o método da inspeção visual no primeiro, no décimo e vigésimo dia da preparação e os mensais.

3.2 Medição das propriedades termofísicas dos nanolubrificantes

3.2.1 Massa específica

A massa específica foi medida utilizando o equipamento viscosímetro Stabinger SVM 3000/G2 da Anton-Paar, na função densímetro, que utiliza o princípio da oscilação de tubo U para medição, com fundo de escala de 0,65-3 g/cm³ e com incerteza de medição de 0,005 g/cm³. Como diferencial deste equipamento se tem a possibilidade de se variar a temperatura, pois este equipamento conta com uma célula Peltier que controla a temperatura da amostra, proporcionando medições nas temperaturas de 10-105 °C com incerteza de medição de 0,02

°C, que pode ser utilizado para observar os efeitos da variação da temperatura com o incremento da concentração e o comportamento de cada tipo de nanopartícula com este efeito.

Para observar se esses efeitos com a temperatura e a variação da concentração das nanopartículas, foi definido realização de 4 testes para cada condição, variando a temperatura no intervalo de 20 até 100 °C com incrementos de 10 °C, iniciando as amostras pela menor concentração até a maior concentração para cada tipo de nanopartícula. Após finalizar cada medição, foi realizada a limpeza do equipamento utilizando tolueno. Na Fig. 3.4 está sendo apresentado o equipamento utilizado.



Figura 3.4 – Equipamento Viscosímetro do tipo Stabinger da marca Anton Paar, modelo SVM-3000.

3.2.2 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanolubrificantes foi mensurada com o auxílio de um condutivímetro da empresa LINSES, modelo THB-1 que tem como princípio o método da ponta quente transiente para descrever a condutividade térmica, sejam materiais sólidos ou líquidos. O equipamento apresenta um fundo de escala de até $1\text{W/K}\cdot\text{m}$ com uma incerteza menor que 3% do valor mensurado.

Como forma de avaliar o comportamento do fluido base quanto ao incremento da temperatura foi realizado medições e para avaliar o comportamento que o incremento da temperatura pode causar com o incremento da concentração de nanopartículas, foi definido uma variação de temperatura de 5-55 °C em incrementos de 5 °C, com realização de 5 medições por amostra, saindo da menor concentração para maior concentração de nanopartículas.

Porém, por se tratar de um equipamento que não tem um controle interno de temperatura, se faz necessário acoplar à sonda uma cuba projetada para manter constante a temperatura de uma amostra de aproximadamente 5 ml. Esta cuba iria ser como um trocado de calor de tubos que foi acoplado a um equipamento, que possa manter a temperatura, sendo utilizado um banho termostático MQBMP-01 da Microquímica Equipamentos Ltda., com capacidade de controlar a temperatura de 0 até 80 °C, com precisão de 0,1 °C e estabilidade de até 0,02 °C, que está sendo demonstrado de forma esquemática pela Fig. 3.5.

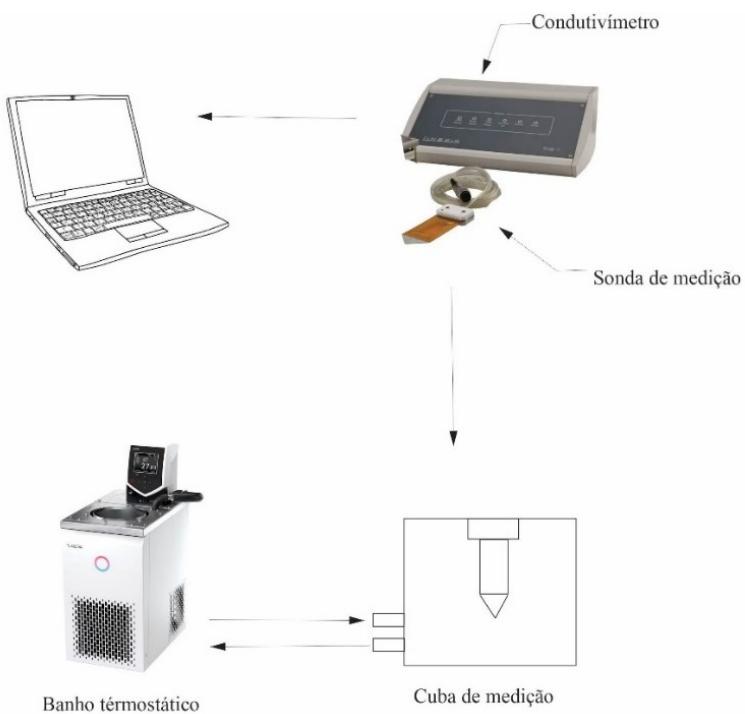


Figura 3.5 – Diagrama esquemático da montagem experimental para medição da condutividade térmica dos nanolubrificantes.

Na realização das medições quanto à condutividade térmica dos nanolubrificantes por se tratar de um teste estático, foi definido apenas que seriam mensuradas as amostras dos tipos de nanopartículas que demonstrassem estabilidade. Por conta de a estabilidade ser um parâmetro que conforme visto na literatura sofre influência direta dos aglomerados de nanopartículas, que podem gerar mudanças significativas nos valores de condutividade térmicas entre as mesmas amostras, por causa das mudanças que podem ser causadas durante o teste pela alteração da concentração de nanopartículas por conta da sedimentação dos aglomerados e levar a conclusões equivocadas.

3.2.3 Viscosidade

A viscosidade foi medida utilizando o mesmo equipamento da massa específica, o viscosímetro Stabinger SVM 3000/G2 da Anton-Paar, mas agora sendo utilizado na função de viscosímetro, e por realizar a medição da massa específica simultaneamente com a viscosidade, consegue realizar tanto a medição da viscosidade dinâmica quanto a viscosidade cinemática na mesma amostra. Este viscosímetro utiliza o princípio de Coutte modificado para medições das viscosidades, com faixa de medição da viscosidade dinâmica 0,2-20.000 m·Pa·s com incerteza de medição de 0,35% e para a viscosidade cinemática tem uma faixa de medição de 0,2-10.000 mm²/s com incerteza de medição de 0,35%.

Por se tratar de um equipamento que apresenta controle da temperatura foi definido a variação da temperatura para as amostras, assim como na medição da massa específica, com o intuito de avaliar os efeitos na viscosidade com o incremento da concentração de nanopartículas e as variações de temperatura. Na aquisição das amostras, foi seguido o mesmo procedimento realizado na massa específica, assim como na limpeza por ser amostragem simultânea.

3.3 Bancada experimental de refrigeração

Este trabalho teve como objetivo o desenvolvimento de uma bancada experimental baseada no ciclo de refrigeração com compressão a vapor que possa avaliar o desempenho do compressor, seguindo as normas, quando estiver com R290/Poliolester (POE) e aplicar os nanolubrificantes. Foi definido para o projeto com base na literatura ser devolvido de modo a indicar o real papel desempenhado pelo nanolubrificante (POE/Grafeno (GR)) no comportamento da capacidade refrigeração, COP, eficiência energética, massa específica, vazão mássica do sistema, pressão de descagar, temperatura de descarga e entre outros.

O desenvolvimento da bancada experimental e testes foi feito em etapas: (1) projeto da bancada experimental, (2) processo de montagem, instrumentação e monitoramento, (3) avaliação das propriedades do sistema, (4) metodologia dos testes e condições avaliadas, (5) análise da incerteza de medição.

3.3.1 Projeto da bancada de refrigeração

Os sistemas de refrigeração convencionais têm uma série de variáveis que geralmente não são monitoradas, desta forma, o projeto da bancada experimental é a implementação de uma bancada experimental de refrigeração que tenha variáveis controladas, e assim seja possível

definir condição de funcionamento do compressor, a capacidade de refrigeração, o coeficiente de desempenho e a potência consumida, para quando se utilizar um nanolubrificante no sistema seja possível evidenciar a influência nos parâmetros do sistema de refrigeração.

O desenvolvimento do projeto foi definido em quatro fases (informacional, conceitual, preliminar e final) descritas nas subseções seguintes.

Para utilizar o método da gestão de projetos, foi aplicada uma divisão de quatro etapas:

- Projeto informacional: Buscou definir as características e requisitos do produto com dados qualitativos e quantitativos, aplicando uma delimitação de escopo do projeto para definir o que será desenvolvido para servir de base para as próximas etapas.
- Projeto conceitual: Identificar os requisitos funcionais, técnicos e aspectos que o projeto deve atender, buscando diferentes soluções possíveis, considerando viabilidade técnica e econômica, sendo selecionado a solução que melhor atende aos requisitos de projeto, incluindo um esboço e informações básicas para próxima fase.
- Projeto preliminar: Estabelece o que o projeto deseja alcançar, determinando o que será incluído ou retirado, sendo identificado as necessidades e expectativas do produto final, avaliando a viabilidade técnica e econômica com diferentes alternativas de solução do problema, definindo um cronograma, orçamento, escopo preliminar para elaboração da próxima etapa.
- Projeto final: Avaliar se todos os requisitos de projeto foram atendidos e os objetivos foram alcançados, com elaboração do produto final com detalhe dos resultados, lições aprendidas, recomendações de projetos futuros e mostrar o resultado final do projeto.

3.3.1.1 Projeto Informacional

Na definição do projeto informacional, foi definido o tipo de compressor como hermético alternativo, utilizando como base a literatura bibliográfica, que demonstrou apresentar uma melhor resposta para quantificar os efeitos da variação da potência consumida quando utilizados nanolubrificantes.

No LESTnano (Laboratório de Energia e Sistemas Térmicos) da Universidade Federal de Uberlândia contava com compressores herméticos alternativo da empresa Tecumseh, modelo AE4435U-AA1A que operava com fluido refrigerante R290, com isso foi definido a utilização

do envelope de operação, segundo a norma ASHRAE, para definir os parâmetros iniciais, conforme mostrado na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – Tabela de Condições de operação para o equipamento.

Condição	Faixa de operação
Temperatura de condensação	30 – 60 °C
Temperatura de evaporação	-20 – 15 °C
Temperatura sub-resfriamento	8,33 K
Temperatura de superaquecimento	20 – 55 K
Temperatura de sucção	35 °C
Vazão do fluído refrigerante	1,33 – 5,33 g/s

Inicialmente considerou-se um primeiro sistema com hipóteses simplificadoras de um sistema de refrigeração ideal, sendo aplicado a equação da continuidade e balanço de energia em cada componente. O segundo sistema considerou todas as condições de operações da Tabela 3.2, encontrando os valores teóricos de operação da bancada experimental (compressor, evaporador, condensador e dispositivo de expansão), conforme apresentados na Tabela 3.3.

Tabela 3.3 – Tabela de valores para equipamentos de sistema de refrigeração por compressão a vapor.

Especificações de projeto	Faixa de operação
Compressor	239 – 484 W
Capacidade de refrigeração	498 – 1992 W
Condensador	626 – 2094 W
Queda de pressão no dispositivo de expansão	244 – 1713 kPa

3.3.1.2 Projeto conceitual

Por meio dos dados obtidos na Tabela 3.3, baseando-se no trabalho apresentado por Lou; Zhang; Wang (2015), Salem (2020) e Yang et al. (2020) definiu-se que essa bancada experimental terá: (1) Compressor acoplado a um sistema de monitoramento de consumo de energia com uso de uma placa de corrente e placa de tensão; (2) Evaporador do tipo trocador de placas que pode melhorar o controle da carga térmica e reduzir erros associados a influências de parâmetros externos, no qual deve ser acoplado a um sistema auxiliar para controle da temperatura de saída, composto por um tanque de etanol e água, com uma resistência elétrica,

uma bomba d'água e com medidor de vazão; (3) Condensador do tipo trocador de placas acoplado a um sistema auxiliar composto por um tanque com agua, composto de uma resistência elétrica, bomba d'água com medidor de vazão e um sistema de refrigeração secundário para controle da temperatura de saída; (4) Válvula de expansão eletrônica; (5) Sensores de temperatura nas entradas e saídas dos componentes; (6) Dois sensores de pressão e três diferenciais de pressão aplicados nas entradas e saídas dos componentes; (7) Medidor de vazão Coriolis; (8) Visor de líquido na linha de líquido; (9) Pressostato com sistema de alta e de baixa para controle e segurança no sistema; (10) Aplicação de sistema de monitoramento, controle e aquisição de dados. Na Fig. 3.6 mostra o diagrama esquemático para demonstrar o sistema proposto.

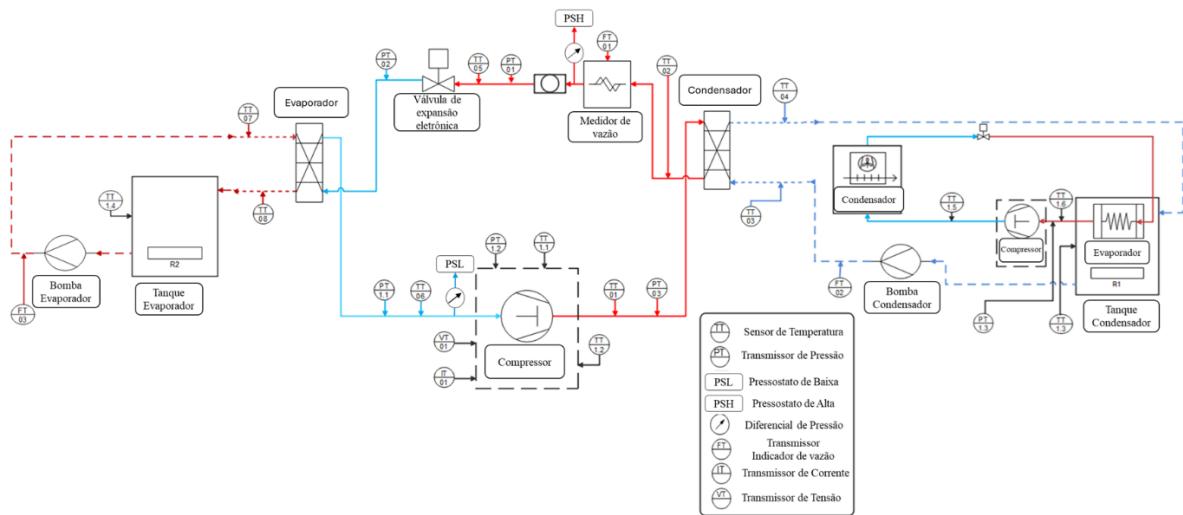


Figura 3.6 – Diagrama esquemático da bancada de refrigeração.

Após definir os componentes para bancada experimental foram calculados para cada componente um balanço de energia utilizando como entrada a Tabela 3.3 para obter a faixa que cada equipamento deveria trabalhar sendo aplicado um coeficiente de segurança de 20%, com isso alguns limitantes foram observados, pois foram utilizados alguns equipamentos disponíveis no LESTnano como o medidor de vazão Coriolis do fabricante Metroval, modelo RMH01, com faixa de medição de 0,001667 – 0,020 kg/s reduzindo a faixa de aplicação dos testes, e também a válvula de expansão eletrônica da CAREL modelo E2V05BS que apenas pode trabalhar na faixa de -20 até 5 °C para temperatura de evaporação e mesmo buscando no mercado para aquisição, foi observado limitações para operação de válvulas de expansão eletrônica dentro de todas as faixas de operação pretendidas, e se fez necessário aplicar reduções nas condições de

operação da bancada de refrigeração, conforme especificado na Tabela 3.4, sendo descrito as novas condições de operação e as faixas de trabalho dos equipamentos.

Tabela 3.4 – Tabela de faixas de operações das condições de operação e dos equipamentos do sistema de refrigeração por compressão a vapor.

Especificações de projeto	Faixa de operação
Temperatura de Evaporação	-10 – 5 °C
Temperatura de Condensação	30 – 50 °C
Compressor	135 – 219 W
Placa de corrente	15 A (corrente de pico)
Placa de tensão	127 V
Trocador de calor de Placas - Evaporador	546 – 1702 W
Tanque evaporador	15 – 20 L
Resistência Evaporador	2,5 kW
Bomba d'água - Evaporador	9 L/min
Medidor de vazão- Evaporador	15 L/min
Trocador de calor de Placas - Condensador	3 kW
Tanque - Condensador	15 – 20 L
Resistência - Condensador	3 kW
Bomba d'água - Condensador	11 L/min
Medidor de vazão- Evaporador	13 L/min
Sistema de refrigeração secundário	4 kW
Válvula de expansão eletrônica	T_evap: -10 – 5 °C / SH 10 – 15 K / 2 kW
Sensores de temperatura	-20 – 50 °C
Medidor de vazão Coriolis	0,001667 – 0,020 kg/s
Diferencial de pressão	244 – 1713 kPa
Sensor de pressão	244 – 1713 kPa
Pressostato de baixa e alta	244 – 1713 kPa
Visor de líquido	3/8" – S

Legenda: T_evap=Temperatura evaporação; SH= Superaquecimento; S= soldável.

Para controle dos componentes que têm alimentação elétrica, foi definido que se deve utilizar a NBR 5410, que define normas técnicas para instalações em baixa tensão. Aplicando uma ligação bifásica com neutro e terra para alimentação dos componentes, deve-se utilizar

componentes de segurança como disjuntores termomagnéticos, disjuntores diferencial, fusíveis e nobreak para prevenir qualquer eventual anomalia na rede elétrica.

3.3.1.3 Projeto preliminar

Utilizando a Tabela 3.4 foram definidos os componentes da bancada experimental, sendo apresentados abaixo os principais:

Compressor que foi definido inicialmente no projeto informacional foi doado pela empresa Tecumseh. A empresa disponibilizou uma quantidade de compressores, que podem proporcionar a utilização de forma individual para análise da aplicação dos nanolubrificantes em cada concentração, logo pode garantir uma análise sem interferência de efeitos lubrificantes residuais dentro do equipamento. Os compressores fornecidos são herméticos do tipo alternativo com variação fixa dos pistões, modelo AE4435U-AA1A com capacidade nominal de 1,92 kW, projetado especialmente para trabalhar com R290, na Fig. 3.7 apresenta o compressor utilizado.



Figura 3.7 – Compressor alternativo AE4435U-AA1A. Fonte: Catálogo do fabricante.

O evaporador e o condensador da bancada experimental foram trocadores de placas brasadas que foram doados pela empresa BRAHEX. O evaporador foi utilizado o modelo PHE P1S de 20 placas que já se encontrava disponível no LESTnano que atendia a condição operacional desejada, entretanto no caso do condensador foi realizado o dimensionamento com base nos dados apresentados na Tabela 3.4, com isso foi solicitado o modelo PHE P0S de 40 placas que apresenta a menor capacidade de transferência de calor de todos os modelos da empresa, tendo uma capacidade de refrigeração de 2,2 kW sendo suficiente para aplicação. Ambos os trocadores de calor a placas apresentam pressão máxima de trabalho de 45 kPa. A escolha de trocadores de placas foi evidenciada com base na observação da literatura quanto ao

tempo de pull-down, tempo de refrigeração e a sensibilidade a fatores externos, exigindo um custo maior para controle, sendo uma alternativa viável para aquisição e implementação. Na Fig. 3.8 estão demonstrados os dois trocadores de calor utilizados.



Figura 3.8 – Trocadores de placas brasados Brahex. a) Evaporador PHE P1S. b) Condensador PHE P0S. Fonte: www.brahex.com.br/brasados.html.

A válvula de expansão eletrônica utilizada foi doada pela empresa CAREL, modelo E2V05BS que trabalha com fluido refrigerante R290, com superaquecimento nulo e subrefriamento de 1 K. Esta válvula de expansão eletrônica é controlada por um driver o EVD0000T50 da própria empresa, que fica responsável por controlar a vazão mássica do sistema mantendo um grau de superaquecimento predefinido na saída do evaporador por meio de um controle PID. Para o funcionamento deste controle, PID as entradas referentes à pressão de evaporação, mediada por sensor de pressão ratiométrico modelo SPKT0013R0, e também da temperatura de saída do evaporador, medida pelo sensor de temperatura de contato da NTC, modelo NTC030HF01. Sendo utilizado a pressão medida o driver estima a temperatura de evaporação e comparando com a temperatura medida de saída do evaporador determina o grau de superaquecimento, com isso pode realizar o ajuste da posição do embolo cônico concêntrico a um orifício calibrado com um motor de passo no interior da válvula de expansão eletrônica, mantendo o controle do superaquecimento gerando uma queda de pressão controlada para evitar o retorno de líquido ao compressor, sendo elevado o grau de superaquecimento na sucção, e assim elevando a temperatura de descarga e aumentando o consumo de energia. Pode-se

observar na Fig. 3.9 a válvula de expansão eletrônica, o driver, sensor de pressão ratiométrico e o sensor de contato da NTC.



Figura 3.9 – Sistema de controle dispositivo de expansão eletrônica Carel. a) Valvula de expansão eletrônica. b) Driver EVD0000T50. c) Sensor de pressão ratriométrico. d) Sensor de temperatura de contato NTC. Fonte: www.carel.com.br.

Para os tanques do evaporador e condensador foram utilizados galões de 20 litros que estavam disponíveis no LESTnano. Foram utilizadas duas bombas d'água da marca Kalps modelo 3.5 Gpm com potência de 0,24 hp, fluxo máximo de água de 13,4 L/min. Nos medidores de vazão de água foram utilizados os da marca Hall modelo YF-S401, fluxo de água de 1 – 30 L/min. Resistência do evaporador foi da empresa ERCO, modelo resistência de aquecimento com potência de 2 kW e para resistência do condensador foi da mesma empresa e mesmo modelo, mas com potência de 3 kW. Na Fig. 3.10 apresenta esses componentes.

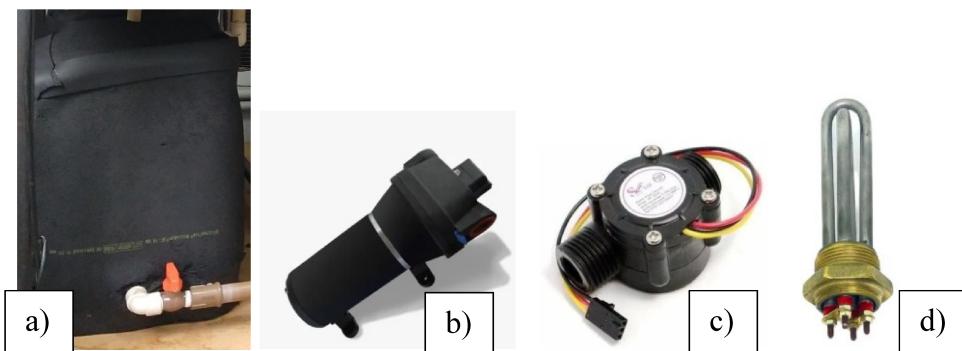


Figura 3.10 – Componentes dos sistemas auxiliares do evaporador e condensador. a) Galão de 20 L. b) Bomba d'água. c) Sensor de vazão de água. d) Resistência de aquecimento. Fonte: Catálogo dos fabricantes.

No sistema auxiliar do condensador para controle da temperatura de saída da água foi utilizado como evaporadora uma serpentina imersa na água do tanque, alimentada por um sistema de refrigeração com um compressor hermético alternativo com um condensador de aletas com ventilação forçada e uma válvula de expansão com controle de histerese ($0,5\text{ }^{\circ}\text{C}$) ON-OFF.

No sistema foi incluído o visor de líquido doado pela empresa RAC-BRASIL, modelo VL 3/8" S, sendo muito importante por mostrar o estado do escoamento na saída do condensador, possibilitando visualizar a passagem de bolhas e também tem um sensor químico que indica umidade dentro do sistema com mudança de cor. Outro importante componente é o filtro secador, que foi utilizado o da empresa Danfoss, modelo DML 083, pois o filtro secador elimina partículas carregadas pelo fluido refrigerante e elimina a umidade por meio de peneira molecular. Na Fig. 3.11 são apresentados o visor de líquido e o filtro secador.



Figura 3.11 – Dispositivos para verificar e eliminar umidade do sistema. a) Visor de líquido. b) Filtro secador. Fonte: Catálogo dos fabricantes.

Além dos componentes citados, um muito importante é o pressostato da empresa DANFOSS, da marca KP15 com sistema de alta e de baixa, que fica responsável por realizar o corte da energia do compressor por acionamento mecânico quando atingir uma condição acima ou abaixo do permitido, para garantir segurança durante a operação e para preservar o compressor. Na Fig. 3.12 foi demonstrado o componente.



Figura 3.12 – Dispositivos de segurança pressostato de alta e baixa, Danfoss, modelo KP15. Fonte: www.store.danfoss.com.

Conforme observado no final do projeto conceitual alguns dispositivos precisão de sistema de segurança para prevenir eventuais falhas ou anomalias da rede, por isso foi desenvolvido um diagrama elétrico considerando a NBR 5410 para cada componente que tem alimentação elétrica que foi especificado anteriormente. Inicialmente foi feito um levantamento de todos os componentes elétricos que fariam parte da rede para calcular a corrente máxima para o disjuntor termomagnético geral, depois foi aplicado um disjuntor diferencial, e antes de ser feito a ligação com os disjuntores termomagnéticos de cada componente, foi incluído fusíveis para proteção da rede. Como componentes foram considerados: (1) Compressor principal com corrente nominal máxima de 5 A; (2) Resistência de aquecimento do evaporador com corrente máxima de 10 A; (3) Resistência de aquecimento do condensador de 15 A; (4) Sistema de alimentação das bombas d'água DC; (5) Sistema de controle e aquisição de dados. Através disso, foi definido um diagrama esquemático para a alimentação dos componentes que pode ser visto na Fig. 3.13.

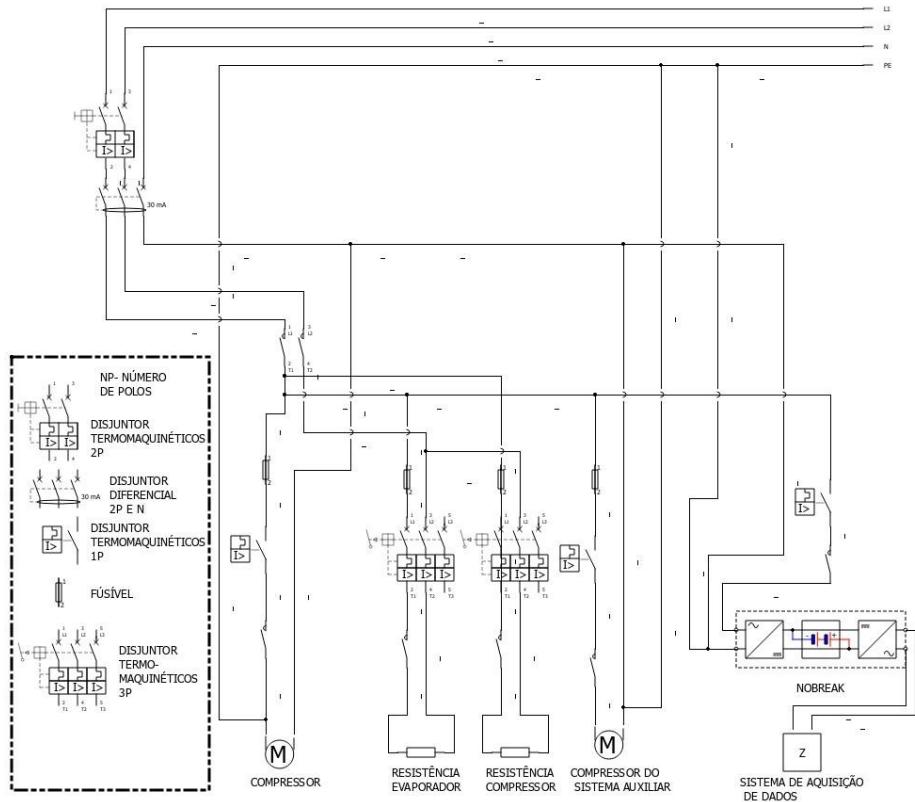


Figura 3.13 – Diagrama elétrico da ligação dos componentes da bancada experimental.

3.3.1.4 Projeto Final

Como projeto final foi aplicado as três etapas anteriores para desenvolvimento e construção de um CAD em modelo 3D que foi demonstrado na Fig. 3.14, que direcionou a montagem dos componentes por meio da criação de desenhos 2D, resultando em uma economia de material, melhor direcionamento de posicionamento dos equipamentos e ganho de tempo para montagem quando comparado ao processo tradicional sem o desenvolvimento do CAD 3D. Na montagem da alimentação elétrica e do sistema de controle, aquisição de dados, o desenvolvimento do diagrama elétrico se provou um grande aliado para prever possíveis situações como resguardar o sistema com quedas de energia, mostrando que se faz muito importante seu desenvolvimento no projeto. Como recomendações futuras, se pode incluir simulações de controle do sistema como das bombas d'água para otimizar possíveis processos.

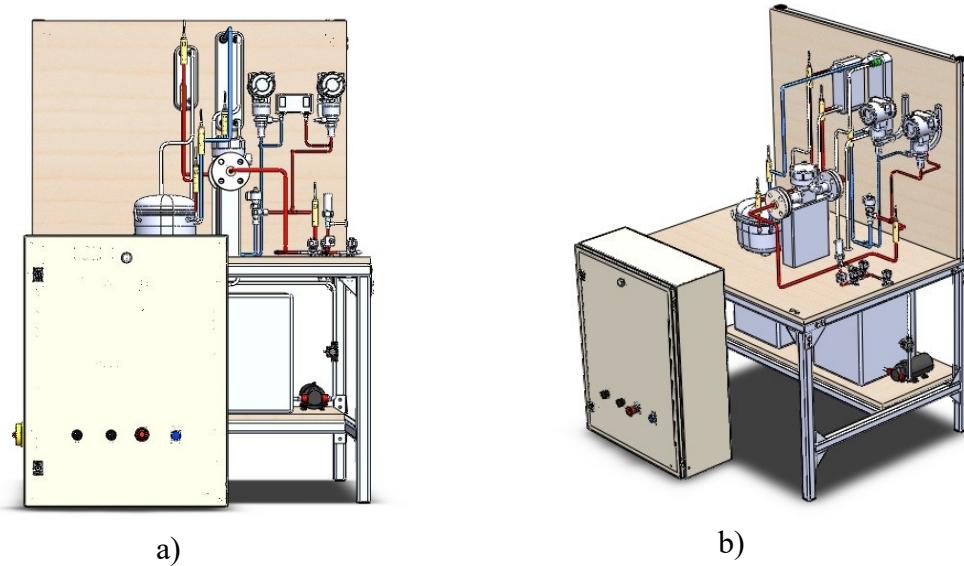


Figura 3.14 – Projeto final da bancada experimental. a) Vista frontal. b) Vista Isométrica.

3.3.2 Instrumentação, monitoramento e montagem.

A instrumentação utilizada foi baseada no diagrama esquemático da Fig. 3.6, sendo utilizados sensores de temperatura RTD (Resistance Temperature Detector) tipo PT-100 da empresa LIOHM, que foram montados tendo contato direto com o fluido refrigerante na entrada e saída do condensador e evaporador, assim como nas linhas de água do condensador na entrada e saída, também para entrada e saída da linha da mistura etanol e água (25% e 75% em vol. sendo baseado no trabalho de Ruoso e Caetano (2018)) do evaporador, para aquisição do sinal foi utilizado uma placa da empresa National Instruments, modelo NI 9216. Para avaliar o comportamento térmico quanto aos impactos diretos dos nanolubrificantes foi colocado dois sensores de temperatura termopar do tipo t, manufaturados e verificados conforme o procedimento apresentado no Apêndice II, para aquisição dos dados foi utilizado uma placa da empresa National Instruments, modelo NI 9213. Na fixação dos termopares foi utilizada uma fita de alumínio por conta da mudança de compressores durante os testes, não poderia se aplicar uma cola de silicone ou qualquer outro modo de fixação permanente. A posição dos termopares foi escolhida na parte superficial (T_1) e na parte do cárter (T_2). Na Fig. 3.15, apresenta o posicionamento pretendido e o processo final no compressor da bancada de refrigeração.

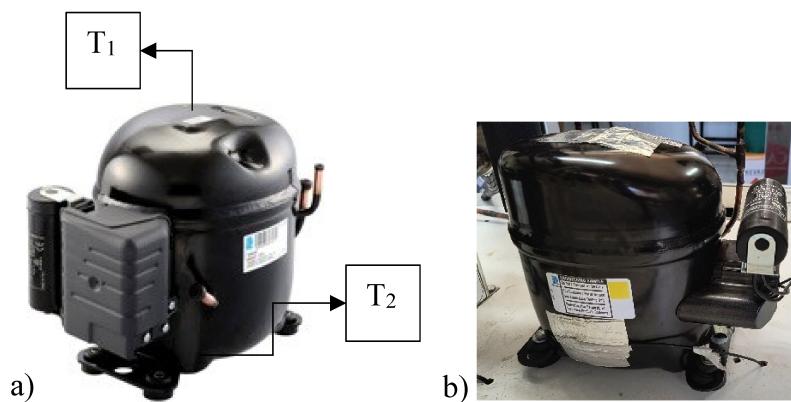


Figura 3.15 – Posicionamento dos termopares na bancada experimental. a) Posicionamento pretendido. b) Aplicação na bancada experimental.

Na aquisição da potência do compressor foram utilizadas duas placas da National Instruments, uma placa de tensão modelo NI 9246 com faixa de trabalho de 0-250 V, e uma de corrente modelo NI 9242 com faixa de operação de 0-20 A.

Para alimentação das bombas d'água foi utilizado uma fonte DC através de uma placa de arduino com controle por uma placa analógica da National Instruments modelo NI 9264 na saída analógica de 0 – 5 V. Os sensores de vazão volumétrica tiveram dois papais importantes na bancada de refrigeração quanto a escolha da vazão adequada e a sua utilização no evaporador para o fechamento do balanço de energia, sua alimentação foi feita pela fonte DC, e a aquisição foi realizada pela mesma placa da National Instruments modelo NI 9264, porém utilizando a entrada analógica de 0 – 5 V.

A pressão da entrada e saída do condensador e entrada do evaporador foram medidas por transmissores de pressão, foram utilizados nas posições descrita no diagrama esquemático da Fig. 3.6, que são representados por PT01, PT02 e PT03, que são do fabricante SMAR, modelo LD291, com faixas de operação de 0 – 250 bar, que pode gerar um sinal de 4-20 mA para comunicação com o sistema de aquisição utilizou-se a placa da empresa National Instruments, modelo NI 9207 com entrada digital. Como forma de complementar os dados foram incluídos mais um sensor de pressão do tipo ratriométrico da empresa CAREL, modelo SPKT0033R0 que está representado no diagrama esquemático como PT1.2, localizados na sucção do compressor, e também feita a aquisição dos dados do sensor utilizado pela válvula de expansão eletrônica representado como PT1.1, foi utilizada a placa da empresa National Instruments, modelo NI 9205.

Na medição da vazão mássica da bancada experimental de refrigeração, utilizou-se um medidor Coriolis do fabricante Metroval, modelo RMH01, com faixa de medição de 0,001667 a 0,020 kg/s. Neste instrumento tem acoplado um transmissor do mesmo fabricante, modelo

CMM01 290DACDCB, que consegue converter o sinal medido da vazão mássica em um sinal proporcional de 4 - 20 mA, que permite a aquisição dos dados pela placa da empresa National Instruments, modelo NI 9207. Este sensor de vazão foi instalado seguindo as recomendações do fabricante, sendo colocado entre o visor de líquido e a entrada da válvula de expansão.

Foi utilizada uma placa da Empresa National Instruments modelo NI 9401 com entrada e saída digital para realizar o controle da bancada experimental por meio de acionadores digitais, sendo usado uma placa Arduino para acionamento dos relés eletrônicos e relés de estado sólidos.

O monitoramento, aquisição e controle dos sinais fornecidos e gerados pelos sensores citados anteriormente, foram adquiridos e gerados segundo as placas descritas anteriormente, do fabricante National Instruments, que para comunicação com um computador utiliza um chassi Ni CompactDAQ, modelo NI cDAQ-9178 com conjunto de 5 módulos de entrada e saída, sendo realizada uma interface desenvolvida no software Labview que pode ser vista na Fig. 3.16, que proporcionou o controle das variáveis de operação, monitoramento e armazenamento de dados.

Na Tabela 3.5 são listados de forma resumida os módulos utilizados para aquisição dos dados.

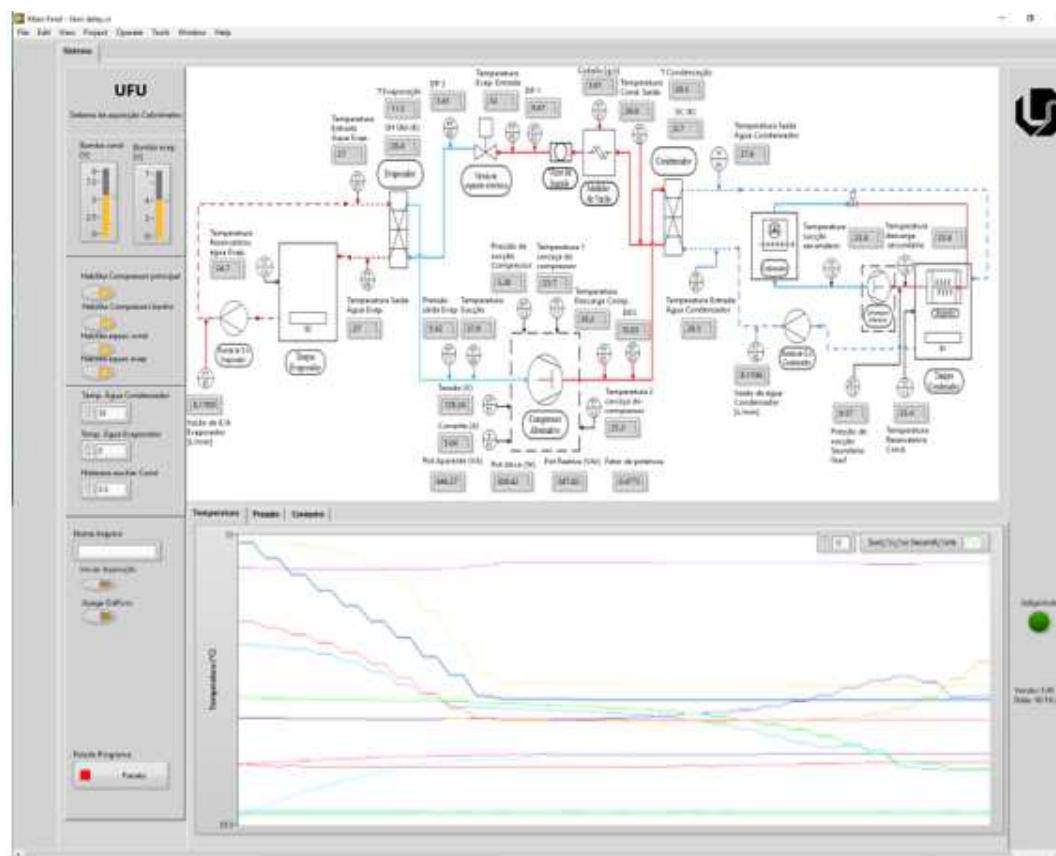


Figura 3.16 – Programa em Labview para controle, monitoramento e aquisição de dados da bancada experimental.

Tabela 3.5 – Tabela de módulos e instrumentos da bancada experimental de refrigeração.

Instrumento	Quantidade	Tipo de módulo	Modelo
PT-100 RTD	8	Resistência	NI 9216
Termopar	2	Voltagem (mV)	NI 9213
Tensão	1	Voltagem (V)	NI 9246
Corrente	1	Corrente (A)	NI 9242
Bombas d'agua	2	Voltagem (V)	NI 9264
Medidor de vazão volumétrico	2	Corrente (mA)	NI 9264
Transmissor de pressão	3	Corrente (mA)	NI 9207
Sensor de pressão - CAREL	2	Voltagem (mV)	NI 9205
Medidor de vazão Coriolis	1	Corrente (mA)	NI 9207
Controle	5	E/S digital	NI 9401

Legenda: E= Entrada; S= Saída.

Montagem foi baseada no CAD 3D, que foi feito na fase de projeto. Para otimizar o processo de montagem utilizaram-se impressões de desenhos em 2D da bancada experimental, que ajudou durante o processo de posicionamento dos componentes e consequentemente na dobra dos tubos de cobre e soldagem dos componentes. Seguindo as recomendações das boas práticas de refrigeração, foi feito teste de vazamento utilizando inicialmente nitrogênio para detecção visual por meio de bolhas. Após esta etapa, foi carregada a bancada com um fluido refrigerante R290 em baixa concentração para identificar por meio do sensor de vazamento da empresa INFICON do modelo GAS-Mate, e após identificar e solucionar todos os vazamentos, foi realizado um teste de estanqueidade na bancada de refrigeração. Finalmente, foram realizados testes com a carga de fluido refrigerante até se encontrar a ideal por meio da utilização do visor de líquido e controle dos parâmetros operacionais para garantir que não retornasse líquido ao compressor.

A montagem do painel elétrico na bancada experimental foi com base no diagrama desenvolvido na fase de projeto, sendo incluídos os dispositivos de segurança como disjuntores termomagnéticos, disjuntor diferencial, fusíveis, pressostato de alto e baixa, botão de emergência de cogumelo, filtros para sistemas com alimentação DC, relés eletrônicos para acionamento por comando e relés de estado sólido para acionamento por comandos. Finalmente foi realizada a montagem completa da bancada de refrigeração e na Fig. 3.17 está sendo demonstrada a bancada experimental de refrigeração.



Figura 3.17 – Bancada experimental de refrigeração construída para o desenvolvimento deste trabalho. a) Vista isométrica. b) Vista frontal.

3.3.3 Avaliação das propriedades do sistema

Na avaliação das propriedades termodinâmicas do fluido de trabalho, foi realizado o desenvolvimento de um programa em Python com uso de módulos suplementares, sendo utilizado como entrada os dados em csv, e consideradas algumas simplificações para sua implementação, como troca de calor entre os componentes da bancada experimental com ambiente, que são consideradas desprezíveis, na válvula de expansão o processo de expansão segue a entalpia constante e foi considerado regime permanente para o sistema.

Capacidade de refrigeração do sistema foi determinada por um balanço de energia entre a entrada e saída do evaporador na linha do fluido refrigerante. Logo, com os dados obtidos com medições da vazão mássica do fluido refrigerante, pressão de evaporação, temperatura de entrada e saída do evaporador, foi possível a determinação da capacidade de refrigeração com a Eq. (3.2).

$$\dot{Q}_{evap} = \dot{m} \cdot (\dot{h}_{sáida}(T, P) - \dot{h}_{entrada}(x, T)) \quad (3.2)$$

Na equação 3.2 temos \dot{Q}_{evap} capacidade de refrigeração medida, \dot{m} vazão mássica do fluido refrigerante, $\dot{h}_{sáida}(T, P)$ entalpia na saída do evaporador com base na temperatura e pressão mediadas, $\dot{h}_{entrada}(T, P)$ entalpia na entrada do evaporador com base na entalpia na entrada da válvula de expansão, por meio da hipótese de isoentálpico na expansão fluido de trabalho na válvula de expansão.

O coeficiente de desempenho (COP) de um ciclo de refrigeração por compressor a vapor convencional tem como definição a razão entre a capacidade de refrigeração (\dot{Q}_{evap}) e a potência do compressor (\dot{W}_{comp}) que foi medida com sistema de aquisição, sendo feito o cálculo do COP com a Eq. 3.3.

$$COP = \frac{\dot{Q}_{evap}}{\dot{W}_{comp}} \quad (3.3)$$

Para avaliar a qualidade dos dados adquiridos e verificação quanto ao fechamento do balanço de energia, foram determinadas as capacidades de troca de calor no evaporador, com fluido refrigerante na Eq. (3.2) e a mistura etanol e água na Eq. (3.4).

$$\dot{Q}_{evap,EA-H_2O} = \dot{m}_{EA-H_2O} \cdot CP_{EA-H_2O}(T_m)(T_{sáida} - T_{entrada}) \quad (3.4)$$

Na equação 3.4 temos, $\dot{Q}_{evap,EA-H_2O}$ capacidade de refrigeração da mistura etanol e água, \dot{m}_{EA-H_2O} vazão mássica da mistura etanol e água, $CP_{EA-H_2O}(T_m)$ calor específico da mistura água e etanol considerando uma temperatura média entre temperatura de saída e entrada do evaporador na linha secundária, $T_{sáida}$ temperatura de saída do evaporador na parte secundária com etanol e água, $T_{entrada}$ temperatura de entrada do evaporador na parte secundária com etanol e água.

Para finalizar, foi feita uma análise do erro, quanto ao balanço de energia com relação da capacidade de refrigeração que foi medida na linha principal com fluido refrigerante e a que foi medida na linha secundária com água e etanol, pela Eq. (3.5).

$$BE = \left(\frac{(\dot{Q}_{evap} - \dot{Q}_{evap,EA-H_2O})}{\dot{Q}_{evap}} \right) \cdot 100\% \quad (3.5)$$

3.3.4 Metodologia dos testes e condições avaliadas

Na avaliação do efeito de nanopartículas de grafeno como aditivo lubrificante em sistemas de refrigeração por compressão a vapor, foram utilizados na bancada experimental, compressores independentes para variação da concentração de nanopartículas, com utilização de 5 compressores aplicando uma concentração em cada (0,0%, 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1%), que garantiu uma análise mais precisa da quantidade de nanopartículas dentro do compressor e independente, por se tratar de um compressor hermético com limitações com manejo óleo interno, limpeza limitada do sistema que pode gerar lubrificantes residuais, conforme foi observado com o trabalho realizado por Yang et al. (2020), que também indica após a troca do compressor a necessidade de novas soldas na sucção e descarga, assim como uma limpeza com nitrogênio de todo o sistema para redução do erro experimental, sendo realizado durante os experimentos.

Os testes foram realizados em regime permanente, variando a concentração de nanopartículas, a temperatura de evaporação, temperatura de condensação, mantendo constantes as vazões volumétricas da mistura de água e etanol do sistema secundário do evaporador, e o grau de superaquecimento do fluido refrigerante na saída do condensador. Na Tabela 3.6 são apresentadas as condições de teste que foram estudadas no presente trabalho.

Para garantir a repetibilidade dos dados, foram realizados três testes para cada condição com aplicação de aleatorização dos testes. No qual, sendo atingida a condição de regime permanente para a condição de teste desejada, foi realizada a aquisição dos dados com uma taxa de amostragem de uma amostra por segundo durante 30 min. Quanto ao valor estimado por variável medida, foi determinado como sendo o valor médio de cada um dos três testes realizados.

Tabela 3.6 – Tabela das condições de testes da bancada experimental.

Condições de teste	
Concentração de nanopartículas (ϕ_m)	0,0%, 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1%
Temperatura de evaporação	-10 a 5 °C com incrementos de 5 °C
Temperatura de condensação	30 a 50 °C com incrementos de 5 °C
Superaquecimento	10 K
Vazão da água-etanol – linha secundária evaporador	7 L/min

Segundo Yang et al. (2020) para iniciar a aquisição de dados, o procedimento experimental deve atingir o regime permanente de modo que seja obtido uma estabilidade do sistema com as condições de teste estabelecidas. Assim, os testes deste trabalho foram conduzidos iniciando-se o experimento com o setpoint nas condições de teste para os sistemas de controle. Após um período de 2 horas, considerou-se que o sistema havia atingido o equilíbrio, adotando-se como critério uma variação máxima de 2% para todas as variáveis medidas, conforme Marcucci Pico et al. (2019). Logo atingida a condição de teste desejada, foi feita aquisição de dados do respectivo ensaio.

3.3.5 Análise da incerteza de medição

Os resultados das medições com relação a cada variável medida foram apresentados de acordo com a Eq. (3.6), sendo que \bar{x} representa o valor médio da variável ao longo dos testes e U a incerteza de medição expandida associada à variável.

$$x = \bar{x} + U \quad (3.6)$$

Na determinação da incerteza de medição expandida das variáveis primárias foi utilizado o método de GUM (INMETRO/CICMA/SEPIN, 2012). Neste método foi proposto a utilização de um modelo matemático que reúna as variáveis de influência conforme Eq. (3.7). Deste modo

as variáveis de influência podem ser efeito de diversas varáveis como à média, repetibilidade das leituras, a resolução do instrumento, incerteza associada à calibração do instrumento, a incerteza associada a temperatura, incerteza associada a não linearidade, incerteza associada a histerese e entre outros.

$$y = f(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3.7)$$

Onde x_1, x_2, \dots, x_n representa as variáveis de influência. Logo determinando um modelo matemático, são calculadas as incertezas-padrão. Para avaliação de todas as fontes de incerteza $u(x_1), u(x_2), \dots, u(x_n)$ que são associadas às variáveis de influência, se utiliza a Eq. (3.8), que determina a incerteza-padrão combinada.

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^n \left(\frac{\partial y}{\partial x_i} \right)^2 \cdot u^2(x_i) \quad (3.8)$$

Após esta etapa, foi calculado o número de graus de liberdade efetivos (v). Depois de ser determinado o fator de abrangência (k), e finalizando, se calcula o valor da incerteza expandida associada à medição (U), sendo assumida uma função de densidade de probabilidade t-student e um intervalo de confiança de 95% conforme Eq. (3.9). Na tabela 3.7 está apresentado os valores da incerteza expandida, que foi determinada pelo procedimento anterior para cada uma das variáveis diretas.

$$U = k \cdot u_c(y) \quad (3.9)$$

Tabela 3.7 – Incertezas associadas às variáveis diretas.

Variável medida	Instrumento	Faixa de medição	Incerteza
$T_{comp}(n)$	Termopar tipo T	-200 – 350 °C	±0,5 °C
$T(n)$	RTD-PT-100	-50 a 150 °C	±0,3 °C
$P_{Evap_{ent}}$	Transmissor de pressão	0 – 13 bar	± 0,18 bar
$P_{Evap_{saí}}$	Transmissor de pressão	0 – 250 bar*	± 0,075%
$P_{Cond_{ent}}$	Transmissor de pressão	0 – 250 bar*	± 0,075%
$P_{Cond_{saí}}$	Transmissor de pressão	0 – 250 bar*	± 0,075%
$P_{Comp_{sucção}}$	Transmissor de pressão	0 – 25 bar	± 0,25 bar

\dot{m}	Medidor de vazão mássica Coriolis	0,2 – 20 g/s	$\pm 0,15\%$
$\dot{m}_{H_2O-Etanol}$	Medidor de vazão volumétrica de pá	1 – 60 L/min*	$\pm 3\%$
Corrente	Módulo - NI 9246	0 – 15 A*	$\pm 0,1\%$
Tensão	Módulo - NI 9242	0 – 500 V*	$\pm 0,1\%$

Legenda: * = Conforme fabricante; T_{comp} = Temperatura do compressor; $P_{Evap_{ent}}$ = Pressão do evaporado na entrada; $P_{Evap_{sai}}$ = Pressão do evaporado na saída; $P_{Cond_{ent}}$ = Pressão do condensador na entrada; $P_{Cond_{sai}}$ = Pressão do condensador na saída; \dot{m} = Vazão mássica no Coriolis; $\dot{m}_{H_2O-Etanol}$ = Vazão volumétrica mistura água e etanol.

Nas variáveis calculadas que são derivadas de valores medidos experimentalmente, a incerteza foi determinada utilizando o software EES® (Engineering Equation Solver). Esse software dispõe de um módulo específico para a propagação de incertezas, que segue a norma técnica 1297, proposta pelo NIST em 1994. As incertezas calculadas são apresentadas na Tabela 3.7.

Tabela 3.8 – Incertezas associadas às variáveis calculadas.

Parâmetro	Incerteza
T_{Evap}	$\pm 0,5 \text{ }^{\circ}\text{C}$
\dot{Q}_{Evap}	$\pm 3\%$
\dot{W}_{Comp}	$\pm 3,5\%$
COP	$\pm 5\%$

Legenda: T_{Evap} = Temperatura de evaporação; \dot{Q}_{Evap} = Capacidade de refrigeração;
 \dot{W}_{Comp} = Potência consumida pelo compressor; COP = Coeficiente de desempenho.

CAPÍTULO IV

ANÁLISE DOS RESULTADOS

No capítulo será abordada a análise e discussão dos resultados. A sequência seguirá a mesma ordem desenvolvida no capítulo III, que abordou a metodologia experimental. Inicialmente, aborda-se a estabilidade dos nanolubrificantes. Na sequência, são mostradas as características das propriedades termofísicas: massa específica, viscosidade e condutividade térmica dos nanolubrificantes de óleo POE e nanopartículas de grafeno. Na última parte, são apresentados os resultados obtidos dos testes de nanolubrificantes de grafeno aplicados na bancada de refrigeração experimental com R290.

Deve-se destacar que todos os incrementos relativos a cada propriedade apresentadas dos nanolubrificantes em relação ao fluido base são calculados por meio da Eq. (4.1).

$$I[\%] = \frac{X_{nf}}{X_{fb}} \quad (4.1)$$

Onde X_{nf} e X_{fb} são as propriedades do nanolubrificante e do fluido base.

4.1 Análise de estabilidade dos nanolubrificantes

Neste trabalho, para analisar a estabilidade, foi utilizado o método de absorbância 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, para medição deste pico de absorção com a variação do tempo (CHAKRABORTY; PANIGRAHI, 2020). Para analisar a estabilidade dos três tipos de nanopartículas que foram estudadas e apresentadas no capítulo III, foram utilizados o desenvolvimento de gráficos que utilizam a variação do pico de absorção com a variação pelo tempo, num período inicial de 20 dias com variação diária e depois gráficos num período de 6 meses com variação a cada dez dias, e também para complementar foram apresentadas as fotos

das amostras no primeiro dia, décimo dia, vigésimo dia e mensal até completar 6 meses e finalmente gráficos de comparação entre cada concentração e tipo de nanolubrificante.

Os resultados obtidos para as amostras do tipo 1 com concentrações de 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1%. Foi apresentado na Fig. 4.1(a) mostrando o gráfico da variação do pico de absorbância pelo período de 20 dias e na Fig. 4.1(b) foi apresentado para um período de 6 meses, no qual uma análise de curto período como 20 dias mostra que as amostras de baixas concentrações (0,005% e 0,01%) apresentam boa estabilidade com até 60% em relação à concentração inicial, e as amostras com concentrações mais altas (0,05% e 0,1%) demonstram baixa estabilidade em até 30% com relação concentração inicial, porém com uma análise a longo prazo como na Fig. 4.1(b), foi demonstrado que apenas a menor concentração (0,005%) apresenta estabilidade com até 40% em relação à concentração inicial e todas as outras encontram-se abaixo de 30%. Na Fig. 4.2 foram apresentadas as fotos do primeiro, décimo e vigésimo dia e as fotos mensais de cada amostra, que demonstram que após o primeiro mês não se consegue visualizar uma distinção de comportamento, reforçando a importância de um método quantitativo para análise.

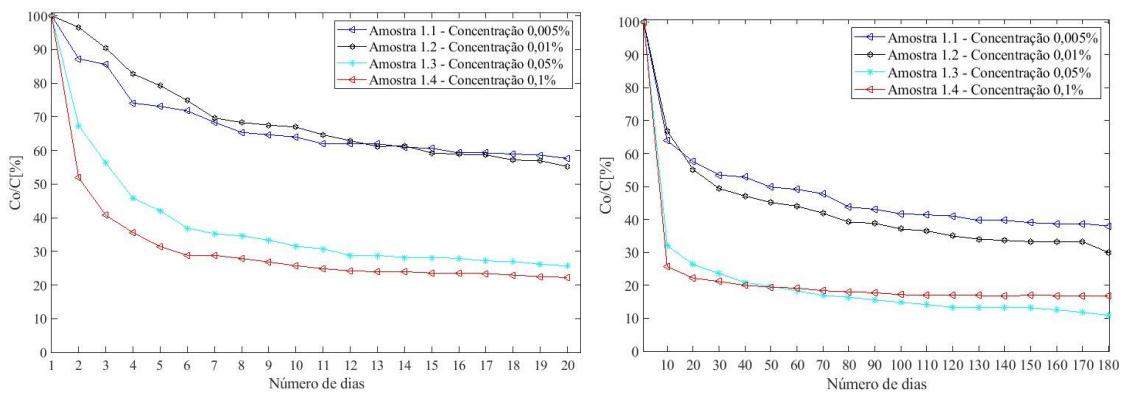


Figura 4.1 – Gráficos da variação do pico de absorbância pelo tempo de nanopartícula do tipo 1. a) Durante 20 dias com variação a cada um dia. b) Durante 6 meses com variação a cada 10 dias.

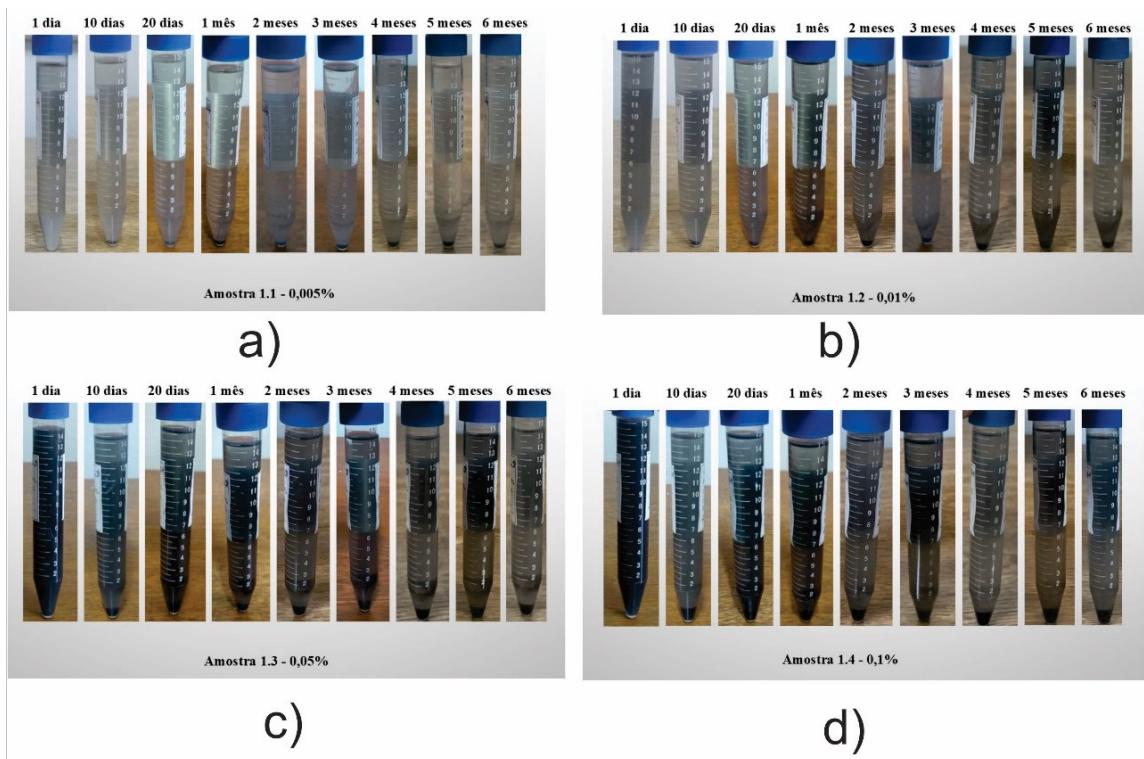


Figura 4.2 – Sedimentação do Grafeno com o Tempo de nanopartículas do Tipo 1. a) Amostra 1.1 com concentração de 0,005%. b) Amostra 1.2 com concentração de 0,01%. c) Amostra 1.3 com concentração de 0,05%. d) Amostra 1.4 com concentração de 0,1%.

Quanto aos resultados das amostras do tipo 2, foi realizado o mesmo processo anterior e feitos os gráficos na Fig. 4.3 e as fotos das amostras na Fig. 4.4. No qual, novamente, uma análise com um curto período pode induzir a comportamento diferente do que em longo prazo, logo na Fig. 4.3(a) observa-se que as amostras com baixas concentrações (0,005% e 0,01%) têm estabilidade com até 60% e 50% com relação à concentração inicial, enquanto concentrações mais altas (0,05% e 0,01%) apresentam baixa estabilidade com até 30% e 10% com relação a concentração inicial, mas ao observar a Fig. 4.3(b) apenas a menor concentração (0,005%) apresenta estabilidade com até 45% com relação à concentração inicial, enquanto todas as outras concentrações apresentam no máximo 25% com relação a concentração inicial. Isto pode ser devido ao aumento da concentração causar uma aglomeração das nanopartículas e aumentar a sedimentação das nanopartículas, no qual estes efeitos diretos podem ser vistos na Fig. 4-4, e a maior concentração na Fig. 4.4(d), que tem a mais baixa estabilidade, demonstra já no décimo dia o comportamento observado nos gráficos, reforçando a importância de dados quantitativos para análise.

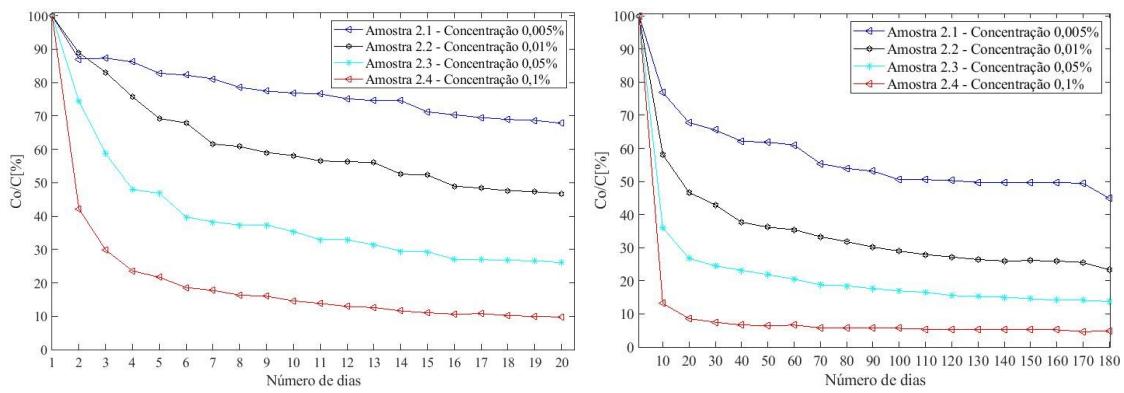


Figura 4.3 – Gráficos da variação do pico de absorbância pelo tempo de nanopartícula do Tipo 2. a) Durante 20 dias com variação a cada um dia. b) Durante 6 meses com variação a cada 10 dias.

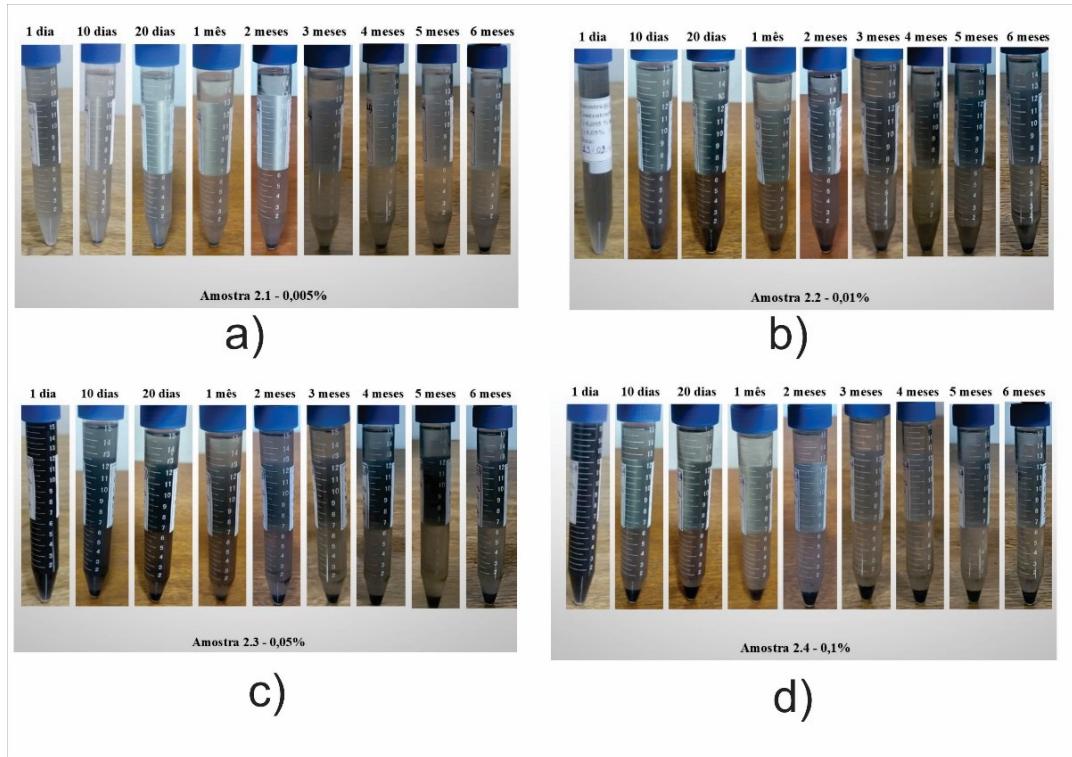


Figura 4.4 – Sedimentação do Grafeno com o Tempo de nanopartículas do Tipo 2. a) Amostra 2.1 com concentração de 0,005%. b) Amostra 2.2 com concentração de 0,01%. c) Amostra 2.3 com concentração de 0,05%. d) Amostra 2.4 com concentração de 0,1%.

Na análise das concentrações com nanopartículas do tipo 3, foram seguidos os mesmos procedimentos anteriores, logo na Fig. 4.5 são apresentados os gráficos dos comportamentos dos nanolubrificantes com suas concentrações ao longo do tempo. Foi apresentado na Fig. 4.6 fotos do comportamento dos nanolubrificantes. Este nanolubrificante quando observados os

efeitos anteriores, apresenta uma estabilidade em todas as concentrações na Fig. 4.5(a) com valor de até 60% com relação à concentração inicial, e mesmo quando observado a longo prazo na Fig. 4.5b se tem uma estabilidade para baixas concentrações (0,005% e 0,01%) com até 40% com relação à contração inicial e baixa estabilidade com altas concentrações (0,05% e 0,1) em até 30% com relação à contração inicial. Nas amostras com baixa concentração (0,005% e 0,01%) mostradas na Fig. 4.6(a) e Fig. 4.6(b), pode-se observar uma menor sedimentação, reforçando uma maior estabilidade, mas não sendo possível uma análise sem método quantitativo, enquanto nas amostras com maior concentração (0,05% e 0,1%) na Fig. 4.6(c) e Fig. 4.6(d) mostra o efeito da prevenção na formação de grandes aglomerados que, mesmo com o período de longo prazo, a sedimentação foi menos acentuada que em todas as outras amostras estudadas nas mesmas concentrações.

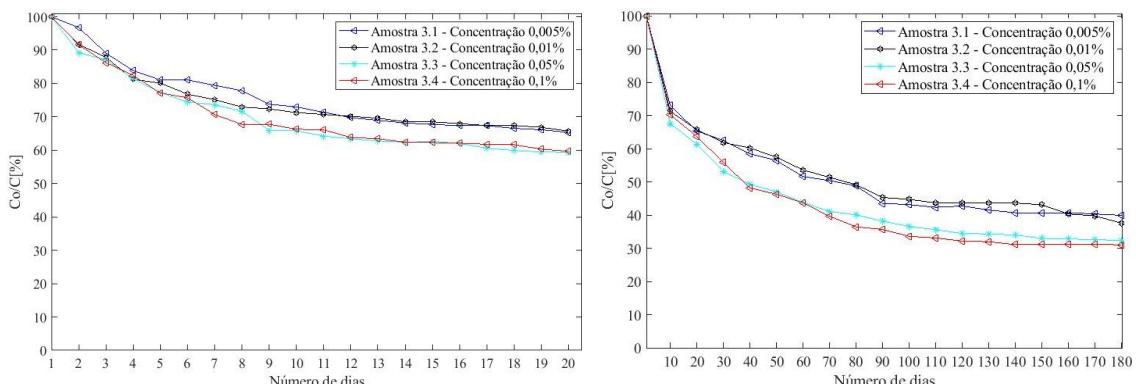


Figura 4.5 – Gráficos da variação do pico de absorbância pelo tempo de nanopartícula do Tipo 3. a) Durante 20 dias com variação a cada um dia. b) Durante 6 meses com variação a cada 10 dias.

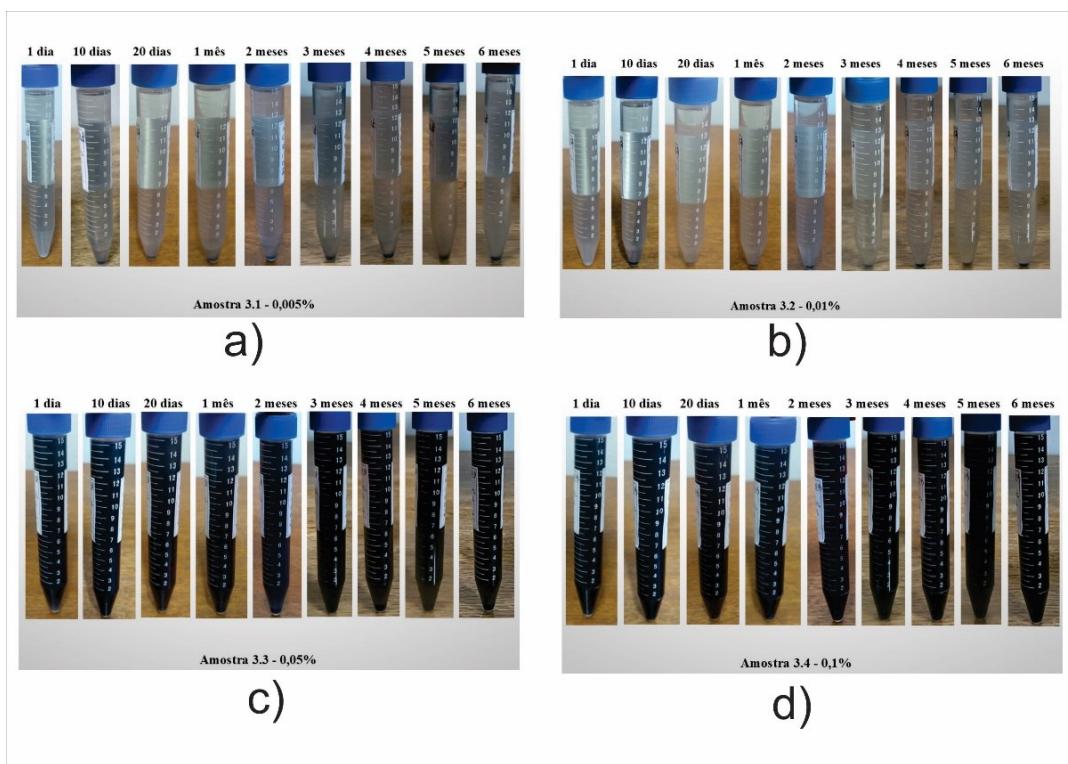


Figura 4.6 – Sedimentação do Grafeno com o Tempo de nanopartículas do Tipo 3. a) Amostra 3.1 com concentração de 0,005%. b) Amostra 3.2 com concentração de 0,01%. c) Amostra 3.3 com concentração de 0,05%. d) Amostra 3.4 com concentração de 0,1%.

A estabilidade dos nanolubrificantes possui 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 a estabilidade (AL-JANABI; HUSSIN; ABDULLAH, 2021). Assim na Fig. 4.7 foi feito um comparativo das concentrações com os diferentes tipos de nanopartículas utilizadas, reforçando que as nanopartículas do Tipo 3 apresentaram a melhor estabilidade dentre todos os Tipos de nanopartículas, pois na Fig. 4.7(a) mesmo tendo um desempenho abaixo de um dos tipos, demonstraram um padrão aproximadamente linear na etapa final (140 – 180 dias), na Fig. 4.7(b) foi observado que, com o aumento da concentração, o tipo 3 teve um comportamento de estabilidade melhor quando comparado aos outros dois tipos, e na Fig. 4.7(c) e Fig. 4.7(d) demonstra que a funcionalização realizada para o tipo 3 preveniu os aglomerados e a redução na taxa de sedimentação das nanopartículas, assim reforçando o que foi avaliado no estudo 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.

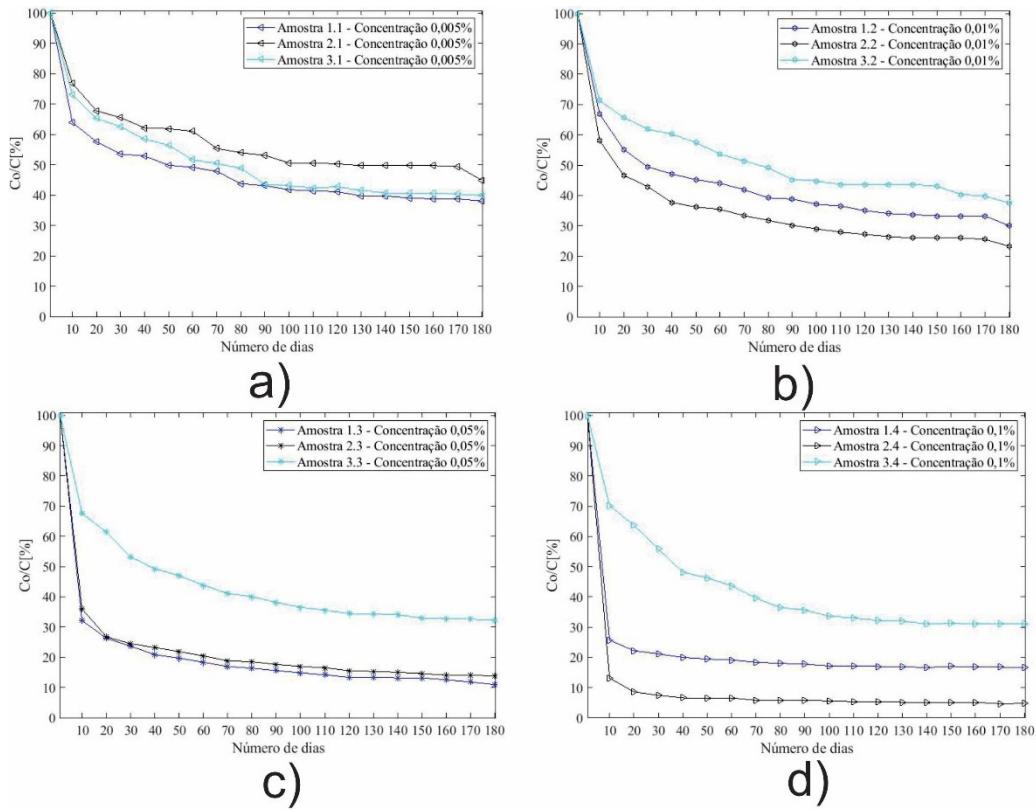


Figura 4.7 – Gráficos comparativos da estabilidade dos nanolubrificantes. a) Amostras com concentração de 0,005%. b) Amostras com concentração de 0,01%. c) Amostras com concentração de 0,05%. d) Amostra com concentração de 0,1%.

4.2 Propriedades termofísicas de nanolubrificantes

4.2.1 Massa específica

Os dados obtidos foram baseados na norma ASTM D7042 para aquisição da massa específica das amostras. Foi desenvolvido na Fig. 4.8, os gráficos do comportamento da massa específica dos nanolubrificantes, pode-se observar que a massa específica, não teve aumentos significativos quando comparados ao fluido base. Este efeito foi causado por conta da escolha de baixas concentrações de nanopartículas funcionalizadas para as amostras, que foi graças ao levantamento realizado pela revisão bibliográfica. Além disso, outro comportamento, também foi observado o incremento da temperatura, gera uma redução da massa específica tanto para o

fluido base quanto para os nanolubrificantes para todos os tipos e concentrações de nanopartícula utilizada.

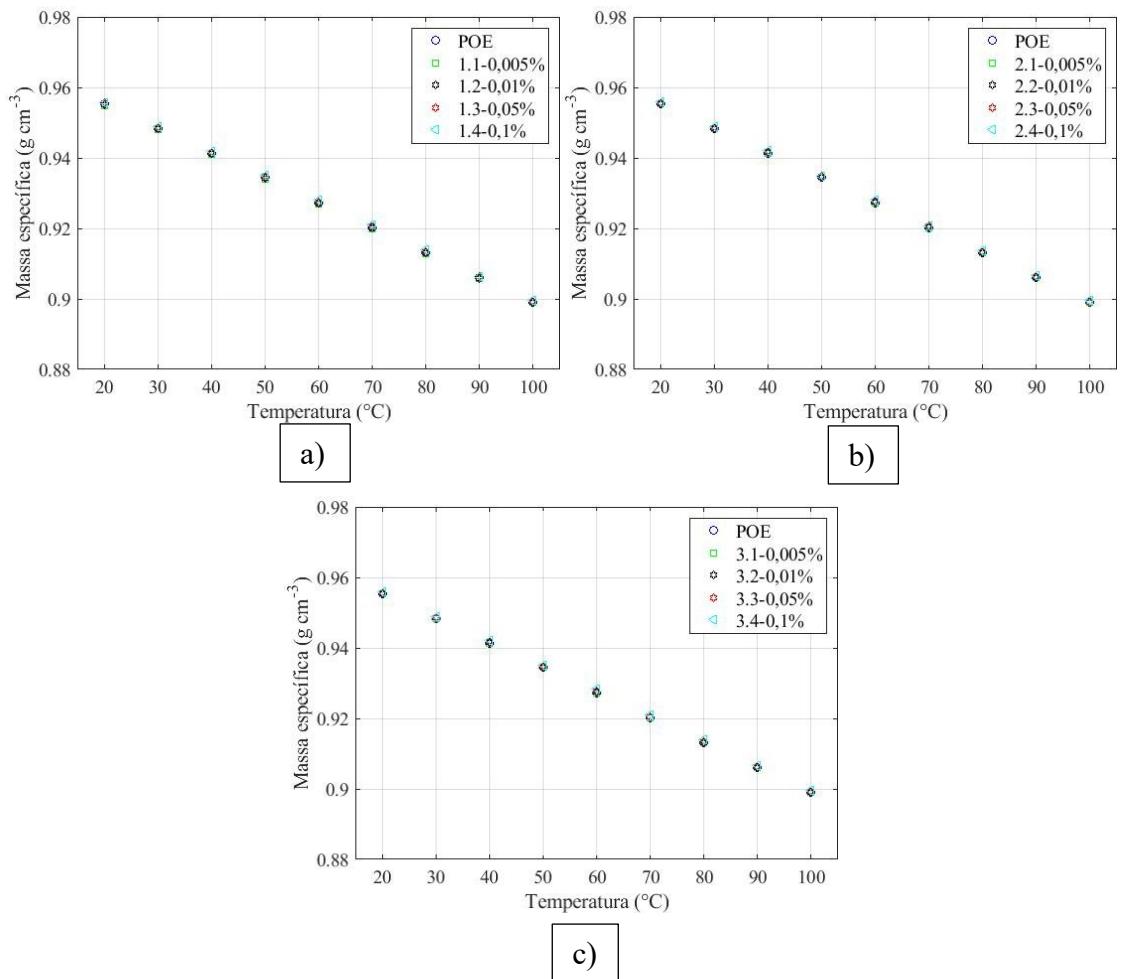


Figura 4.8 – Gráficos da massa específica dos nanolubrificantes. a) Amostras com nanopartículas do Tipo 1. b) Amostras com nanopartículas do Tipo 2. c) Amostras com nanopartículas do Tipo 3.

Este comportamento de não ter aumentos significativos, também foi observado no estudo realizado por Beheshti, Shanbedi e Heris (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, que pode influenciar de forma positiva a transferência de calor.

4.2.2 Viscosidade

Os testes realizados e dados que foram levantados para este trabalho foram baseados na norma ASTMD 7042. Na Fig. 4.9 estão apresentados os resultados da viscosidade dinâmica dos nanolubrificantes para todos os tipos de amostras e nas concentrações mássicas de 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1%. Foi observado que o incremento da temperatura (10 a 100 °C) tem um efeito direto na redução da viscosidade do óleo base e dos nanolubrificantes, independentemente do tipo ou concentração aplicada de nanopartículas, chegando a uma redução de até 94,5%. Este efeito nos nanolubrificantes, pode ser explicado pelo fato de que as forças de atrito interno entre várias camadas do líquido a medida que a temperatura aumenta as forças de Vander Walls de atração e ligações intermoleculares secundárias podem ser sobrepostas pelo movimento browniano que, por conta do aumento da energia, causa uma quebra nos aglomerados que foram formados reduzindo a viscosidade (LINEIRA DEL RÍO et al., 2019).

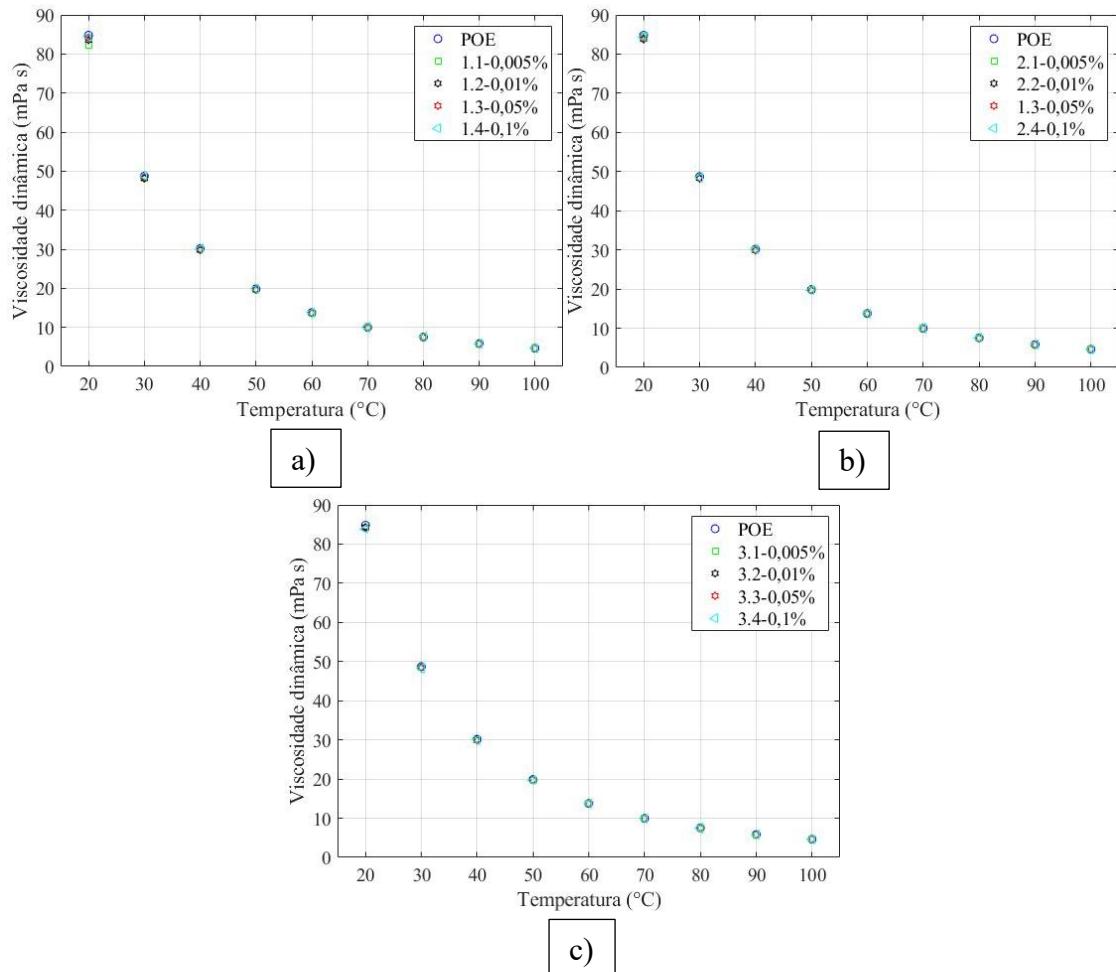


Figura 4.9 – Gráficos da viscosidade dinâmica dos nanolubrificantes. a) Amostras com nanopartículas do Tipo 1. b) Amostras com nanopartículas do Tipo 2. c) Amostras com nanopartículas do Tipo 3.

No estudo realizado por Narayanasarma e Kuzhiveli (2019) também foi observado o mesmo efeito, quando trabalharam com óleo do tipo POE na faixa de temperatura de 25 °C a 100 °C com incrementos de 15 °C por medição, demonstrou 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%.

Aljuwayhel et al. (2023) observaram novamente este efeito da redução na viscosidade com incremento da temperatura, quando utilizaram óleo base POE na faixa de temperatura de 10 °C a 100 °C com incrementos de 10 °C com nanolubrificantes de POE com nanopartículas de diamante com concentração em volume de 0,05% a 0,5%.

Na Fig. 4.9 está ilustrado que a viscosidade não teve um aumento significativo com relação ao fluido base com a adição de nanopartículas. Este comportamento novamente pode ser explicado por conta da baixa concentração de nanopartículas funcionalizadas empregadas.

Beheshti et al. (2014) apontam que um baixo valor de viscosidade indica uma baixa resistência ao fluxo, que aumenta a fluidez, podendo melhorar o resfriamento, reduzir o desgaste dos componentes, reduzir o atrito e aumentar a eficiência dos compressores.

Para reforçar os padrões dos testes realizados, temos que de acordo com a norma ASTM D-2422 – 97, os valores da viscosidade cinética de lubrificantes com grau de viscosidade ISO 32 a 40 °C devem ser de 32 mm²/s para valor central, 28,8 e 35,2 para limites inferiores e superiores. Logo foi desenvolvida a Tabela 4.1 que apresenta os dados e os desvios da viscosidade cinemática de todas as amostras de óleo base e de nanolubrificantes. Sendo demonstrado na Tabela 4.1, que mesmo após a aplicação dos tipos de nanopartículas e as concentrações empregadas, todas as amostras estão dentro da faixa da norma, tendo um desvio máximo de 1,2%, assim validando os dados obtidos.

Tabela 4.1 – Tabela das viscosidades cinemáticas dos testes para validação pela norma ASTM D-2422 – 97.

Nanopartículas	Amostra	Concentração (w.t.%)	Viscosidade cinemática (mm ² /s)	ASTM D-2422 – 97
				Desvio [%]
POE	-	-	32,0390	0,12188
Tipo 1	1.1	0,005	31,7580	0,75625

	1.2	0,01	31,6600	1,06250
	1.3	0,05	31,8510	0,46563
	1.4	0,1	32,019	0,05937
Tipo 2	2.1	0,005	31,9310	0,21562
	2.2	0,01	31,7370	0,82188
	2.3	0,05	31,6220	1,18125
	2.4	0,1	31,967	0,10313
Tipo 3	3.1	0,005	31,8930	0,33437
	3.2	0,01	31,8680	0,41250
	3.3	0,05	31,7330	0,83437
	3.4	0,1	31,798	0,63125

4.2.3 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos lubrificantes de óleo POE ISO 32, não pode ser encontrada tabelada, logo, para validação dos testes realizados com amostras do óleo base POE, foram utilizados os resultados experimentais de Marcucci Pico et al. (2020) com POE ISO 32. Na Fig. 4.10 está apresentado o comportamento dos dados do presente trabalho que, com relação aos dados tomados da literatura, apresenta um desvio máximo de 4,5%.

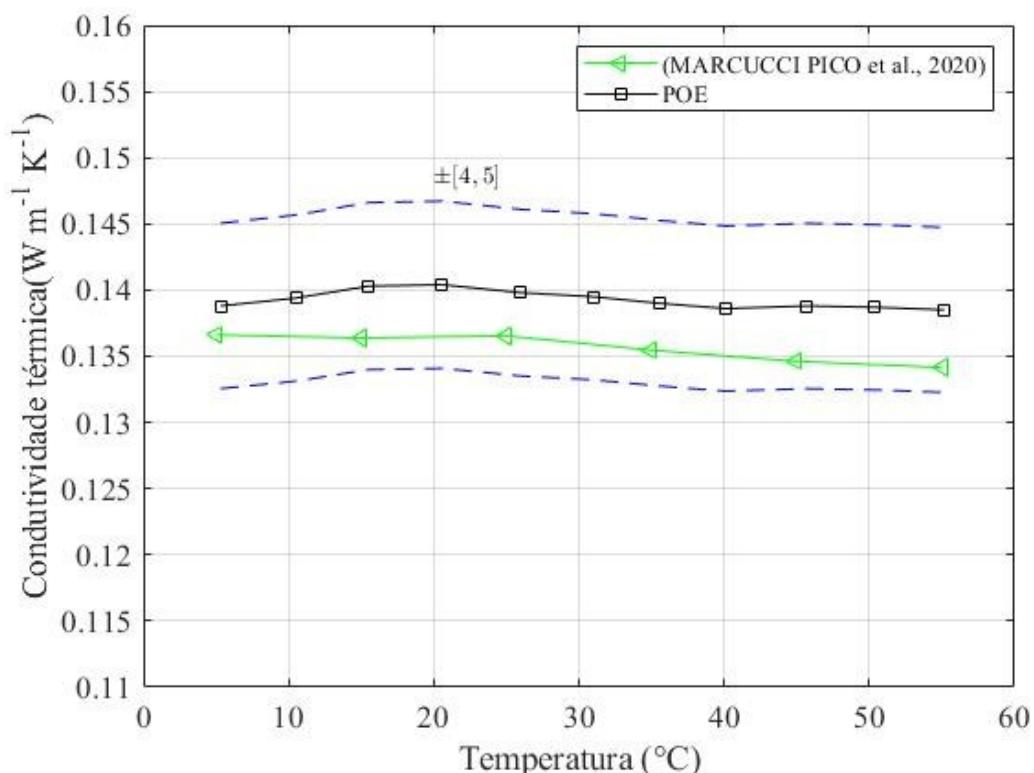


Figura 4.10 – Gráficos da validação dos dados da condutividade térmica do óleo base POE.

O efeito não convencional observado na Fig. 4.10, que mostra uma redução da condutividade térmica com a temperatura, mostra que não é um padrão linear, já foi apresentado este efeito na literatura bibliográfica. Aljuwayhel et al. (2023) observaram uma redução da condutividade térmica com o aumento da temperatura para o lubrificante POE, na mesma faixa de temperatura observada no presente trabalho (20-40) °C, e afirmaram que este efeito se deve ao fato de que, conforme o aumento da temperatura, o fluido se expande, fazendo com que suas moléculas se afastem uma das outras e causando uma redução na condutividade térmica, e também ser um comportamento comum para líquidos de base orgânica.

Conforme foi discutido na metodologia do capítulo III, apenas as amostras dos nanolubrificantes do Tipo 3 foram selecionadas para participar dos testes de condutividade térmica, por conta de terem o melhor resultado para estabilidade entre todas. Foi realizada a medição dos nanolubrificantes na faixa de temperatura de 5 a 55 °C nas concentrações em massa de 0,005%, 0,01%, 0,05% e 0,1%, conforme apresentado na Fig. 4.11. O incremento máximo encontrado foi de 2,20% para o nanolubrificante com concentração em massa de 0,1% na temperatura de 15 °C. Para outras concentrações tiveram-se modestos incrementos, e em temperaturas mais altas os incrementos obtidos foram inferiores a 1% conforme pode-se observar na temperatura de 55 °C. Além disso deve-se destacar que não há uma tendência linear para condutividade térmica relativa com relação à temperatura e concentração.

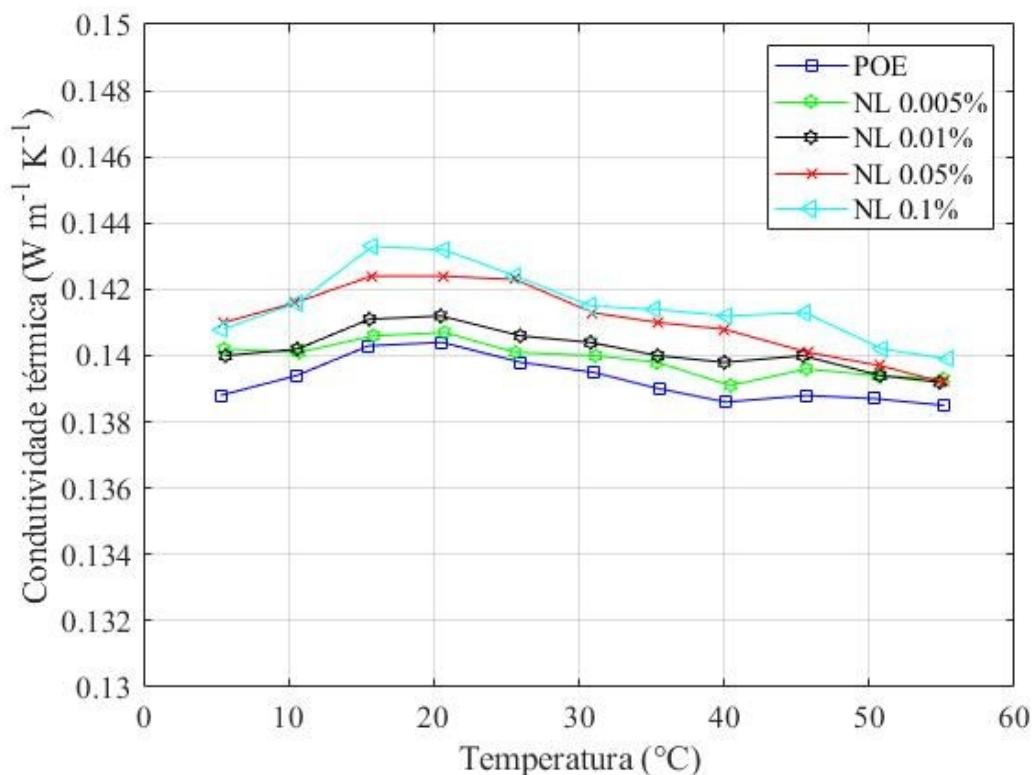


Figura 4.11 – Gráficos da condutividade térmica do óleo base POE e os nanolubrificantes.

4.3 Testes da aplicação de nanolubrificantes na bancada de refrigeração

Nesta seção serão mostrados os resultados obtidos da aplicação de nanolubrificantes de grafeno na bancada de refrigeração nas condições descritas na Tabela 3.6. Inicialmente, foram apresentados os resultados obtidos com a bancada experimental com fluido refrigerante R290, operando apenas com o lubrificante base POE, para que seja possível se obter uma referência para comparação e validação da bancada experimental. Após foram apresentados os resultados dos testes de nanolubrificantes com a menor concentração em massa de até 0,1%. Os testes foram realizados apenas para o nanolubrificantes das amostras do Tipo 3 por apresentarem os melhores resultados de estabilidade e nas propriedades termofísicas apresentarem comportamentos promissores.

4.3.1 Teste da bancada experimental com R290 e lubrificante POE

Conforme foi observado na revisão bibliográfica mostrada na Tabela 2.5, se tem a aplicação de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração que podem proporcionar melhorias nas propriedades operacionais do sistema de refrigeração, assim como incremento da capacidade de refrigeração, redução da potência consumida, melhora do coeficiente de desempenho, redução da temperatura superficial em compressores herméticos, redução da pressão de descarga e, entre outros. Assim baseado nesses efeitos observados nos sistemas de refrigeração, foram analisados experimentalmente os seguintes parâmetros:

- Vazão mássica
- Capacidade de refrigeração
- Potência consumida no compressor
- Coeficiente de desempenho
- Temperatura superficial e descarga do compressor

Deve-se considerar que nos testes realizados, foi possível variar a temperatura de evaporação, e assim como a temperatura de condensação com um valor de superaquecimento de 10 K. Na Fig. 4.12 demonstra a vazão mássica da bancada experimental com fluido refrigerante R290 sem adição de nanopartículas, apenas com o fluido base óleo POE nas diferentes condições de operações da temperatura de evaporação e condensação. Sendo possível observar que conforme aumenta a temperatura de evaporação se tem um aumento da vazão mássica do sistema que acontece por conta da abertura da válvula de expansão que causa uma

queda de pressão proporcional para atingir a pressão requerida à temperatura de evaporação, e também conforme se tem incremento da temperatura de condensação se tem uma redução da vazão mássica do sistema por conta da redução da abertura da válvula de expansão que causa uma queda de pressão proporcional maior para atingir a temperatura de condensação desejada para a mesma temperatura de evaporação, causando uma redução da vazão mássica do sistema.

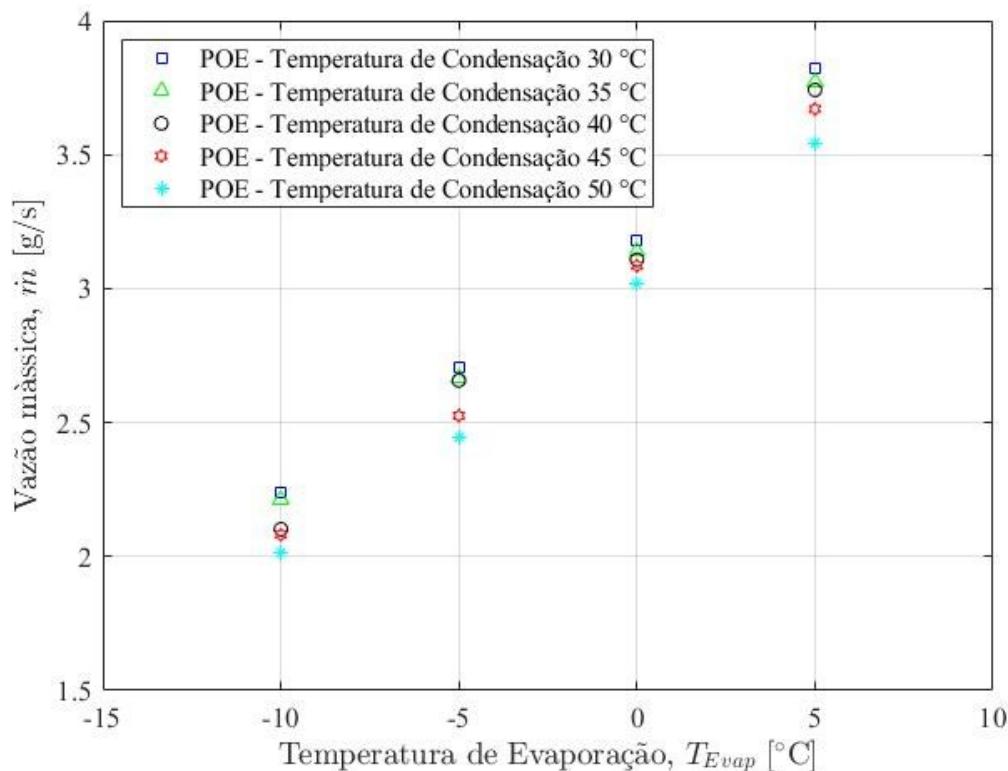


Figura 4.12 – Gráficos da vazão mássica da bancada de experimental de refrigeração com R290 operando apenas com óleo base POE.

Para Fig. 4.13 está sendo demonstrado a capacidade de refrigeração do sistema com a variação da temperatura de evaporação e condensação. Na Fig. 4.13 pode ser observado que com incremento da temperatura de evaporação se tem um aumento da capacidade de refrigeração do sistema e que com o aumento da temperatura de condensação se tem uma redução da capacidade de refrigeração do sistema. Pode se observar a mesma tendência observada com a vazão mássica apresentada na Fig. 4.12 que indica experimentalmente uma estreita relação entre as variáveis, tendo uma concordância com a teoria que capacidade de refrigeração do sistema será reduzida conforme a diferença da temperatura de evaporação e condensação aumenta, que causa um efeito de aumento do título do refrigerante na entrada do

evaporador, onde aplicando na Eq. (2.3) a diferença de entalpia é diminuída, consequentemente reduz a capacidade do sistema.

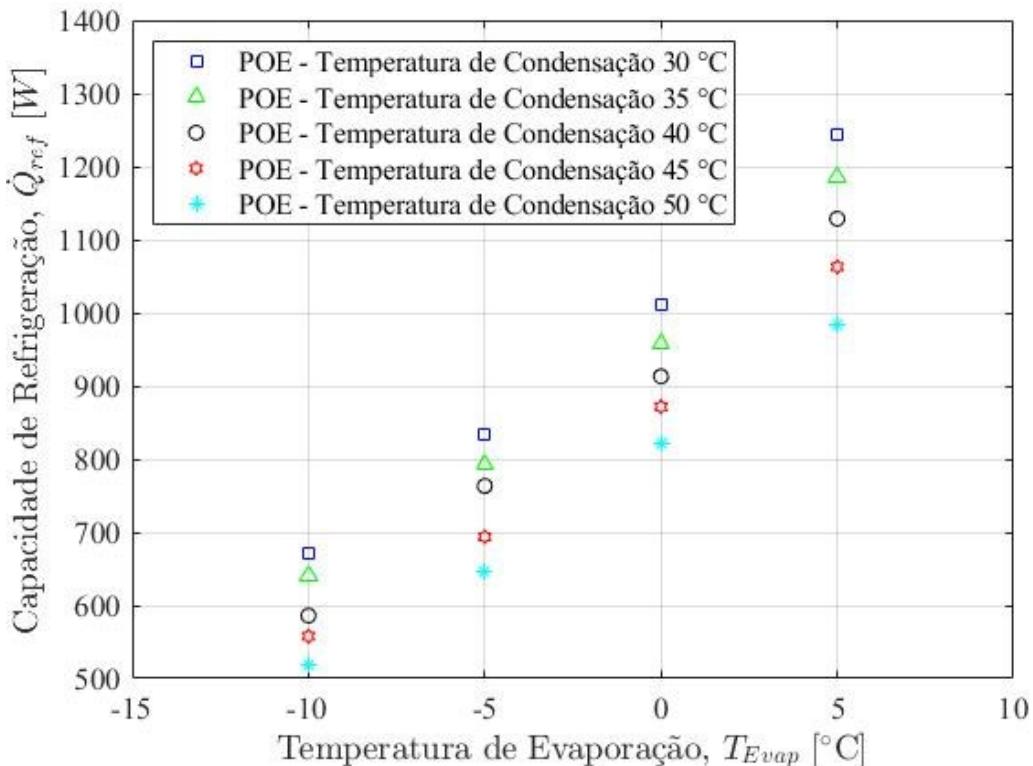


Figura 4.13 – Gráficos da Capacidade de refrigeração pela temperatura de evaporação.

A análise do fechamento do balanço de energia do sistema foi feita com o evaporador, apresentado na Fig. 4.14 com intuito da validação da bancada de experimental.

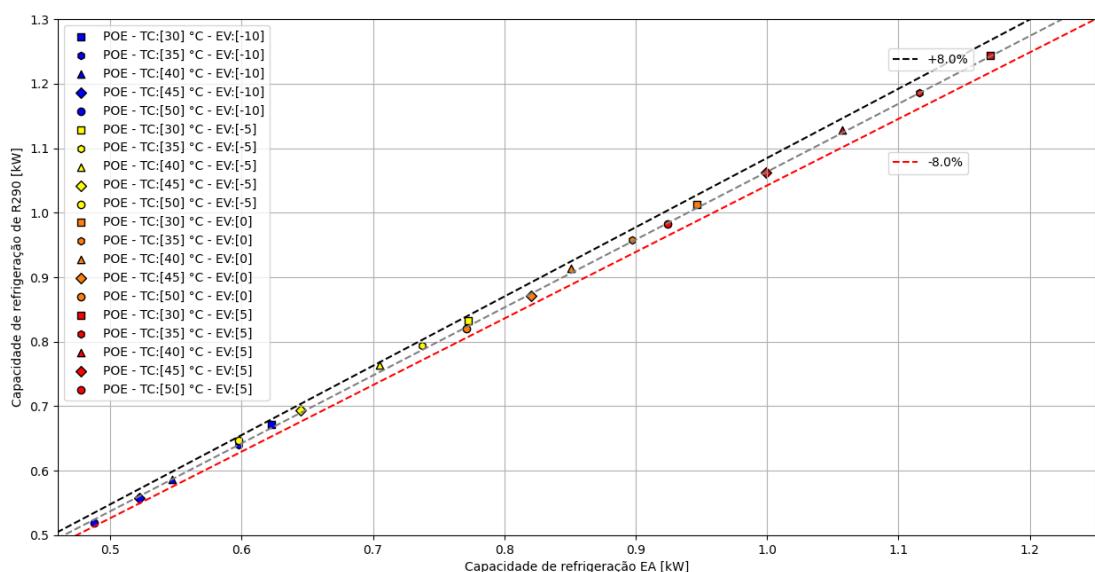


Figura 4.14 – Gráficos da capacidade de refrigeração do fluido refrigerante R290 medida com relação a capacidade de refrigeração do na linha da mistura de etanol e água.

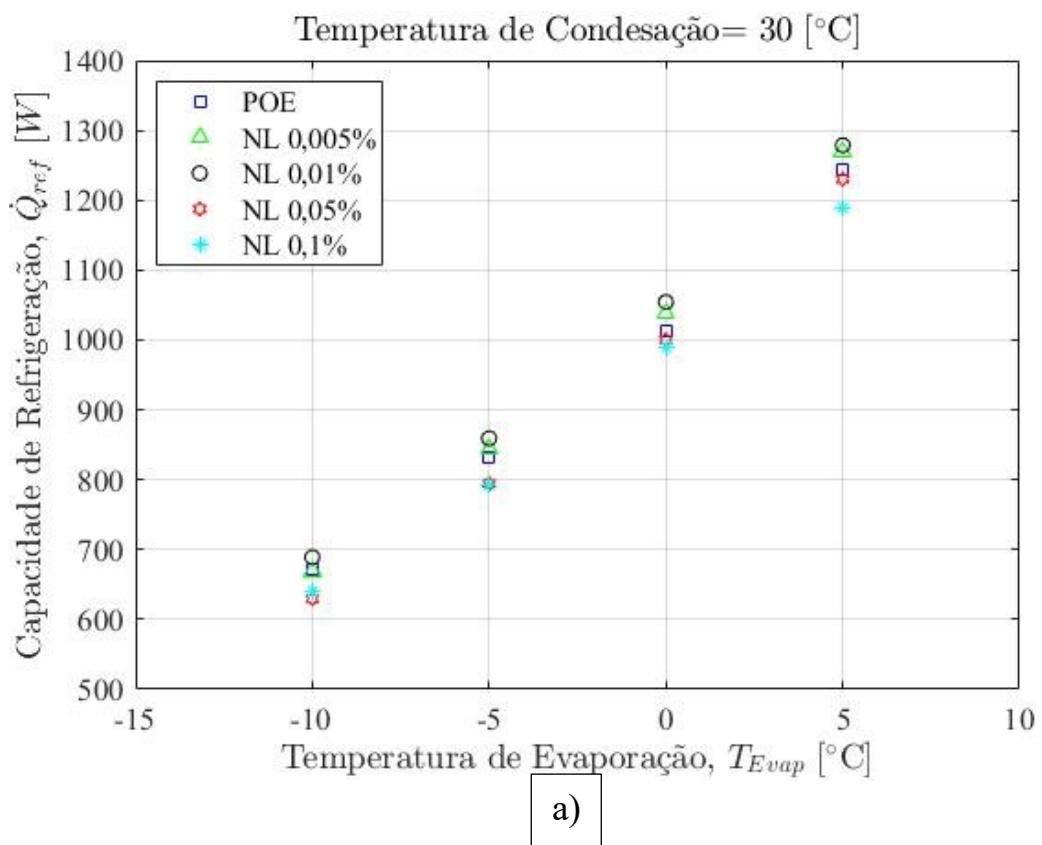
O gráfico apresentado na Fig. 4.14 mostra no eixo das ordenadas a capacidade de refrigeração do fluido refrigerante R290 que foi calculada com a Eq. (3.2) e no eixo das abscissas a capacidade de refrigeração do sistema secundário da mistura de etanol com água que foi calculada com a Eq. (3.4). Foi possível observar com os resultados experimentais com R290 e óleo base POE apresentaram um desvio máximo de 8%. Portanto, este desvio aponta perdas mínimas com relação às perdas relacionadas ao ambiente que garante um fechamento do balanço de energia do sistema, e com isso garantindo uma validação da bancada experimental para realização de testes com os nanolubrificantes.

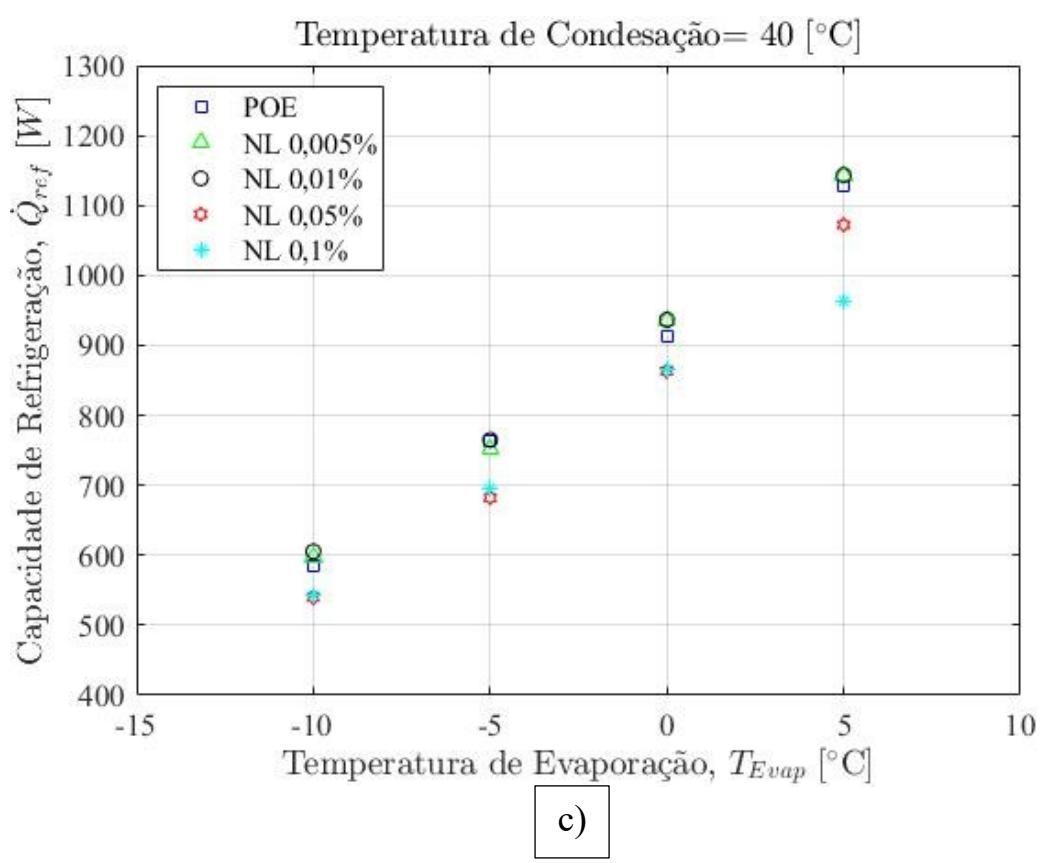
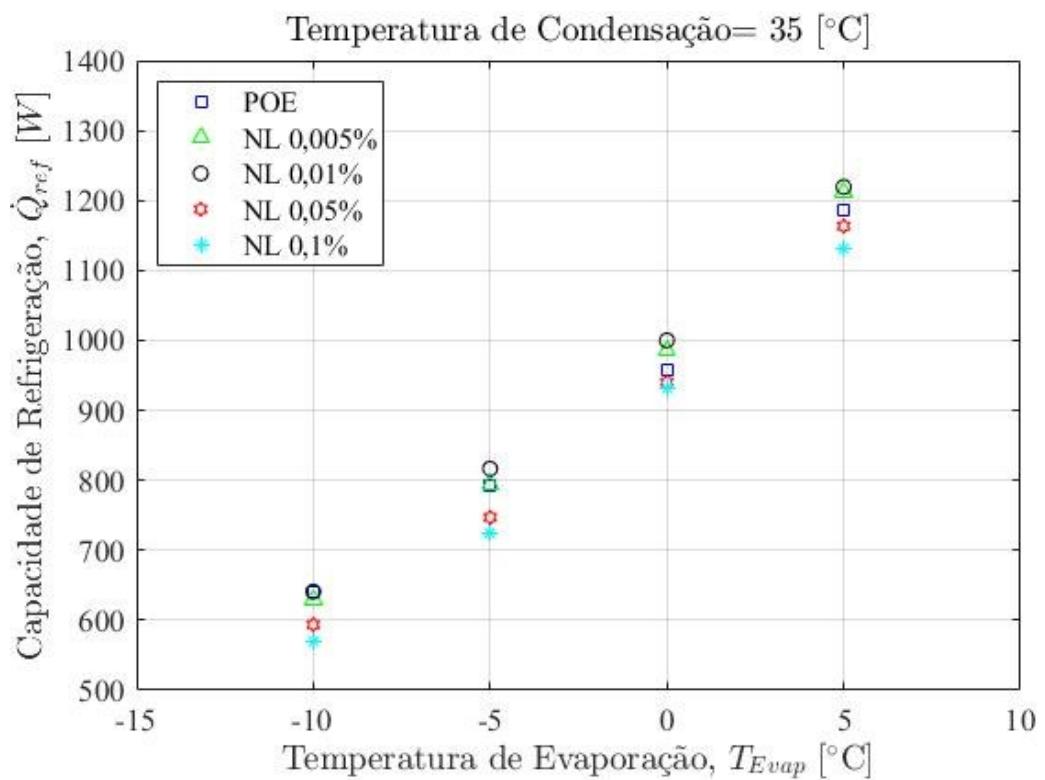
4.3.2 Teste da bancada experimental com R290 e nanolubrificantes

A Fig. 4.15 mostra os gráficos da capacidade de refrigeração do sistema para amostras de óleo POE e os nanolubrificantes pela temperatura de evaporação com a temperatura de condensação. Na Fig. 4.15(a) está apresentado a capacidade de refrigeração com temperatura de condensação de 30 °C e variando a temperatura de evaporação em que pode se observar que apenas as amostras com baixa concentração (0,005% e 0,01%) apresentaram um comportamento de incrementos, tendo um valor máximo de 2,7% para concentração de 0,005% na temperatura de evaporação de 0 °C e um valor máximo de 4,2% para concentração de 0,01% na mesma temperatura de evaporação. Para Fig. 4.15(b) na temperatura de condensação de 35 °C foi observado incrementos apenas para baixas concentrações (0,005% e 0,01%), tendo valores máximos de 3% e 4,4% na temperatura de evaporação de 0 °C. Quanto a Fig. 4.15(c) na temperatura de condensação de 40 °C novamente foi observado incrementos apenas para as baixas concentrações (0,005% e 0,01%) com valor máximo de 2,3% para concentração de 0,005% na temperatura de evaporação de 0 °C e de 3,3% na temperatura de evaporação de -10 °C. No gráfico da Fig. 4.15(d) para temperatura de condensação de 45 °C, pode se observar incrementos apenas nas baixas concentrações (0,005% e 0,01%) com valores máximos de 2,8% e 1,3% para temperatura de evaporação de -5 °C. Finalmente na Fig. 4.15(e) o comportamento foi análogo aos anteriores de incrementos em baixas concentração com valores máximos de 2,8% para concentração de 0,005% com temperatura de evaporação de -10 °C, e de 1,2% para concentração de 0,01% na temperatura de evaporação de 5 °C. Os valores encontrados de

incrementos na capacidade de refrigeração demonstram uma concordância com os valores encontrados na literatura apresentados na Tabela 2.5.

Pode se verificar com os dados experimentais que os incrementos dos nanolubrificantes de baixas concentrações (0,005% e 0,01%) tiveram uma variação entre ~2-4,4% até a temperatura de condensação de 40 °C com diferentes temperaturas de evaporação e acima dela os incrementos tiveram variação entre ~1-3% demonstrando que com o aumento da temperatura de condensação o comportamento dos nanolubrificantes de baixa concentração, tiveram incrementos aproximadamente similares, mas quando a temperatura de condensação foi superior aos 40 °C aconteceu um efeito de redução do incremento da capacidade de refrigeração, que pode ser explicado por conta do efeito observado da redução da condutividade térmica dos nanolubrificantes com aumento da temperatura (ALJUWAYHEL et al., 2023). Além disso conforme dados apresentados a concentração que apresentou os maiores incrementos na capacidade de refrigeração foi a concentração de 0,01%, demonstrando ser uma concentração promissora para aplicação.





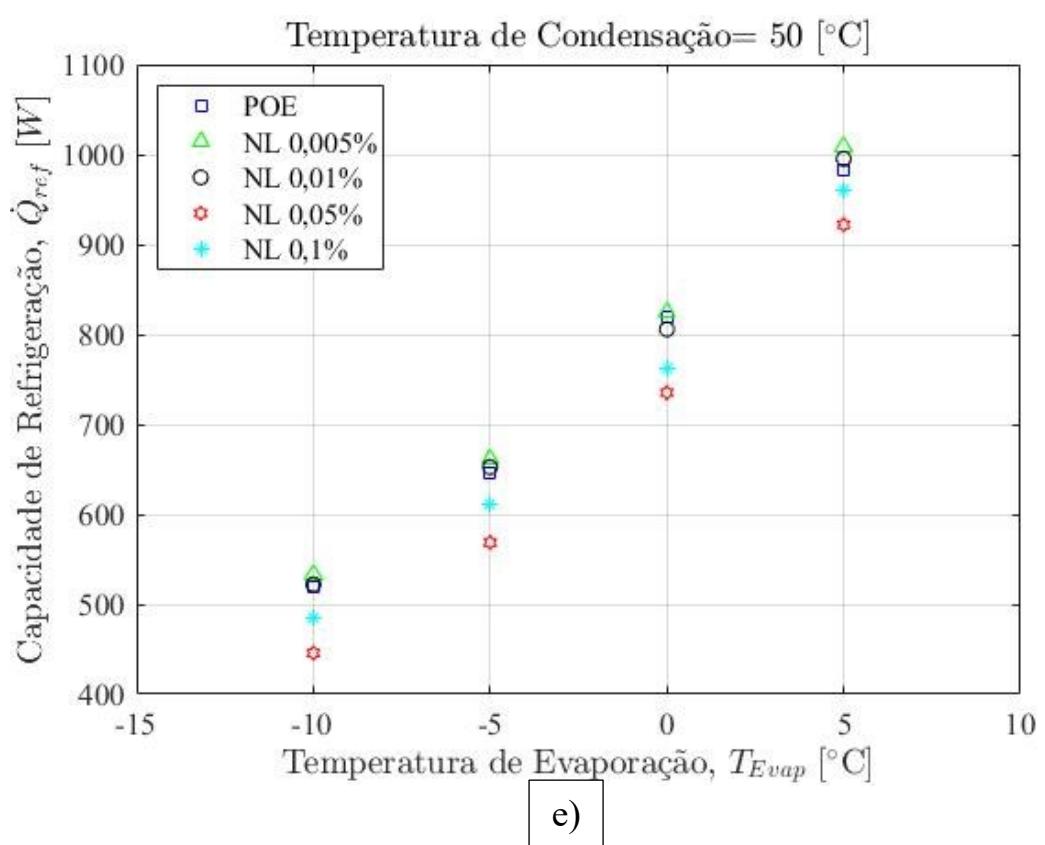
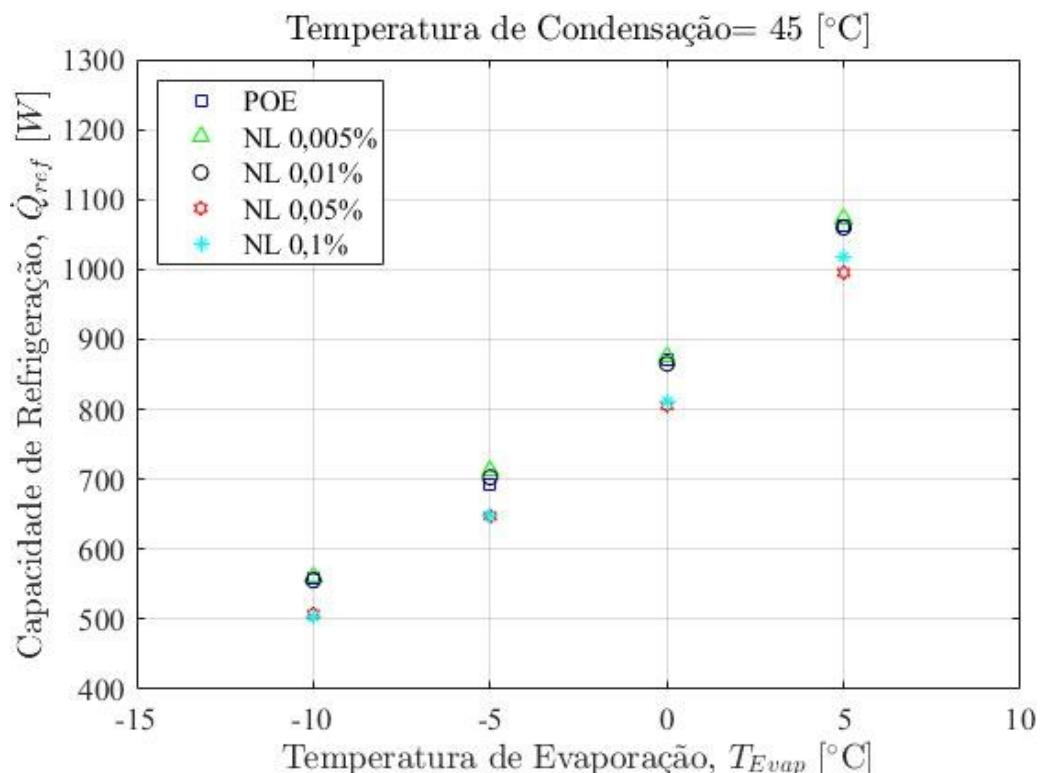
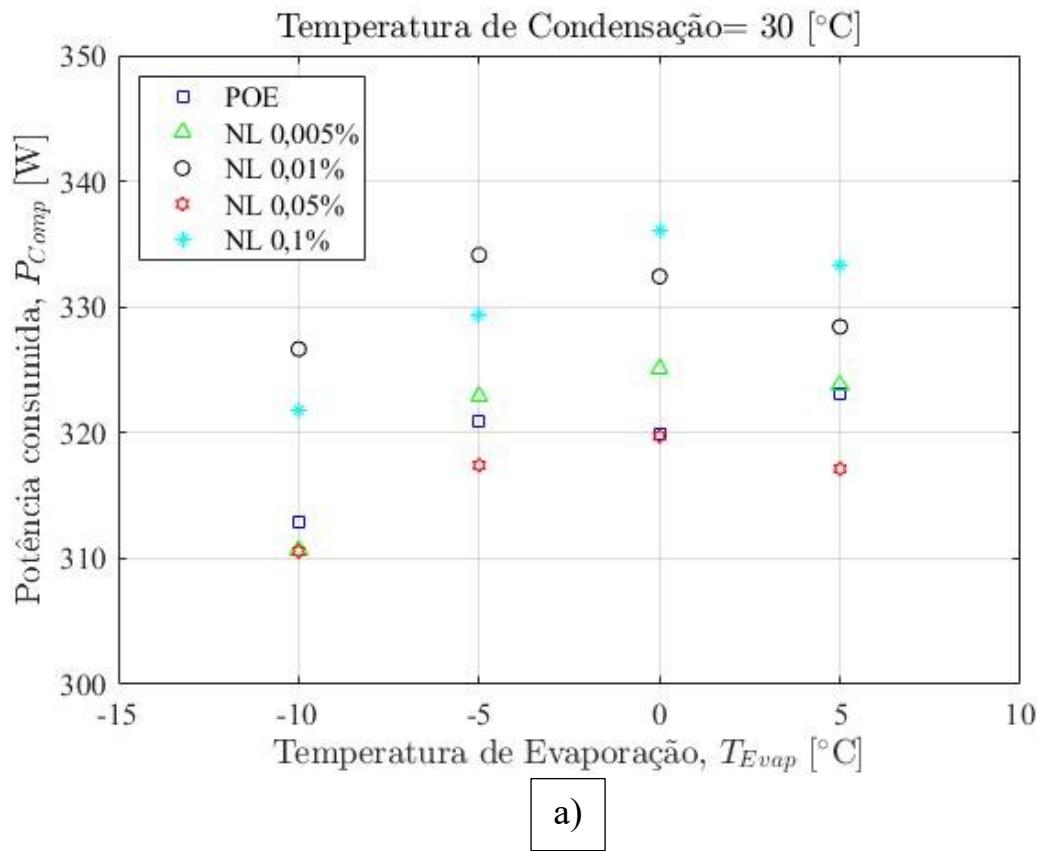


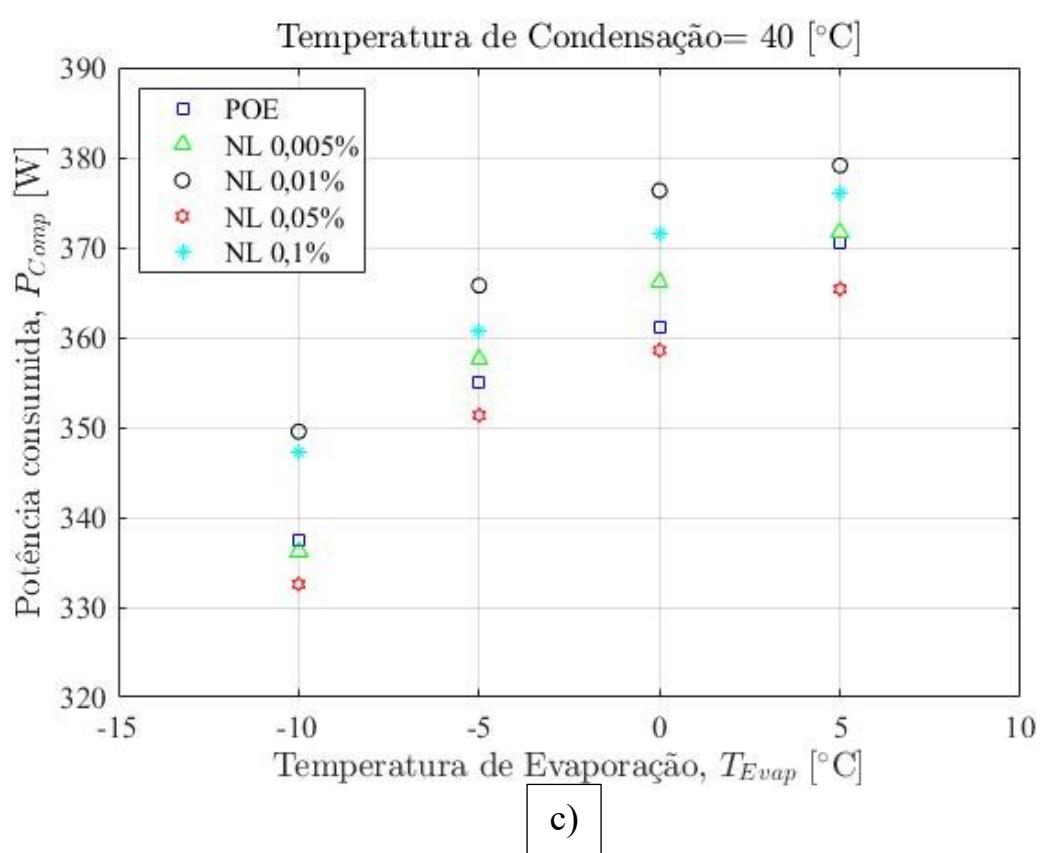
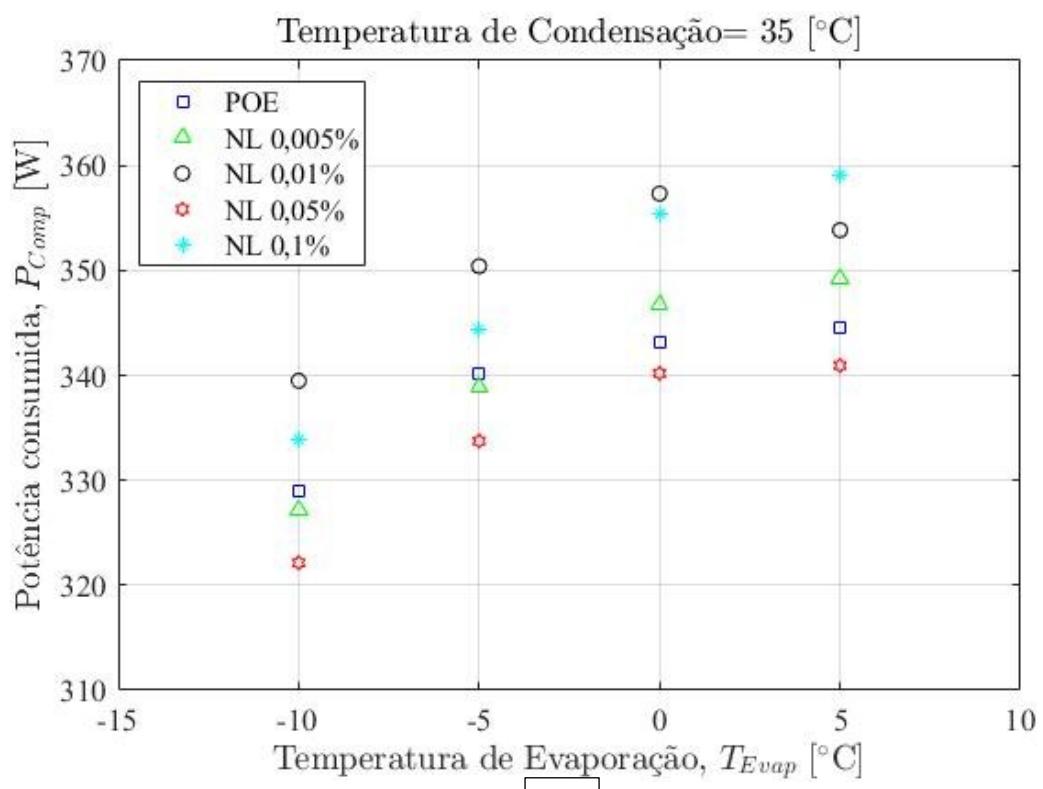
Figura 4.15 – Capacidade de refrigeração com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.

Na Fig. 4.16 foi feito os gráficos do comportamento do sistema de refrigeração para potência consumida quando foi variado a temperatura de evaporação e condensação com aplicação de diferentes concentrações de nanolubrificantes. Pode se observar de forma geral que um nanolubrificante em aproximadamente todas as condições obteve uma redução na potência consumida e alguns nanolubrificantes obtiveram em determinadas condições de operação reduções na potência consumida. Logo na Fig. 4.16(a) para temperatura de condensação de 30 °C, pode se observar que o nanolubrificante com concentração de 0,005% apenas na condição de -10 °C na temperatura de evaporação tem valor de redução de 0,7%, mas para concentração de 0,05% apresenta para aproximadamente todas as condições reduções na potência consumida obtendo um valor máximo de redução de 1,8% na temperatura de evaporação de 5 °C. Para Fig. 4.16(b) na temperatura de condensação de 35 °C está demonstrado que as mesmas duas concentrações (0,005% e 0,05%) apresentam efeitos de redução na potência consumida, em que a concentração 0,005% apresentam reduções em duas condições tendo um valor máximo de redução de 0,5% na temperatura de evaporação de -5 °C, enquanto a concentração de 0,05% tem novamente para todas as condições redução da potência consumida com um valor máximo de 2,1% na mesma temperatura de evaporação. Na Fig. 4.16(c) na temperatura de condensação de 40 °C, nas mesmas concentrações (0,005% e 0,05%) foi observado reduções, tendo para 0,005% no valor máxima de 0,38% na temperatura de evaporação de -10 °C, e para 0,05% no valor máximo 2,3% na temperatura de -5°C. Quanto a Fig. 4.16(d) na temperatura de condensação de 45 °C, foi observado que apenas a concentração de 0,05% apresentava redução na potência consumida em as condições de testes, com um valor máximo de 2,5% na temperatura de evaporação de 0 °C. Na última Fig. 4.16(e) pode ser visto o mesmo efeito anterior que apenas o nanolubrificante com concentração de 0,05% tem redução da potência consumida com valor máximo de 2,7% na temperatura de evaporação de -10°C.

Esses resultados demonstram que as nanopartículas com concentrações de 0,05% apresentam um potencial para utilização na redução de energia elétrica utilizada seja qual for a condição aplicada, e que a menor concentração teve reduções com baixa significância com poucos pontos de aplicação.

Deste modo os resultados indicam boa concordância com os estudos apresentados na revisão bibliográfica e que este efeito de redução da potência consumida observado, pode ser explicado como melhora da lubrificação do compressor na câmera de compressão (par cilindro-pistão) que incrementa a autorreparação e leva a redução de forma significativa da potência de entrada (XING; WANG; YU, 2014).





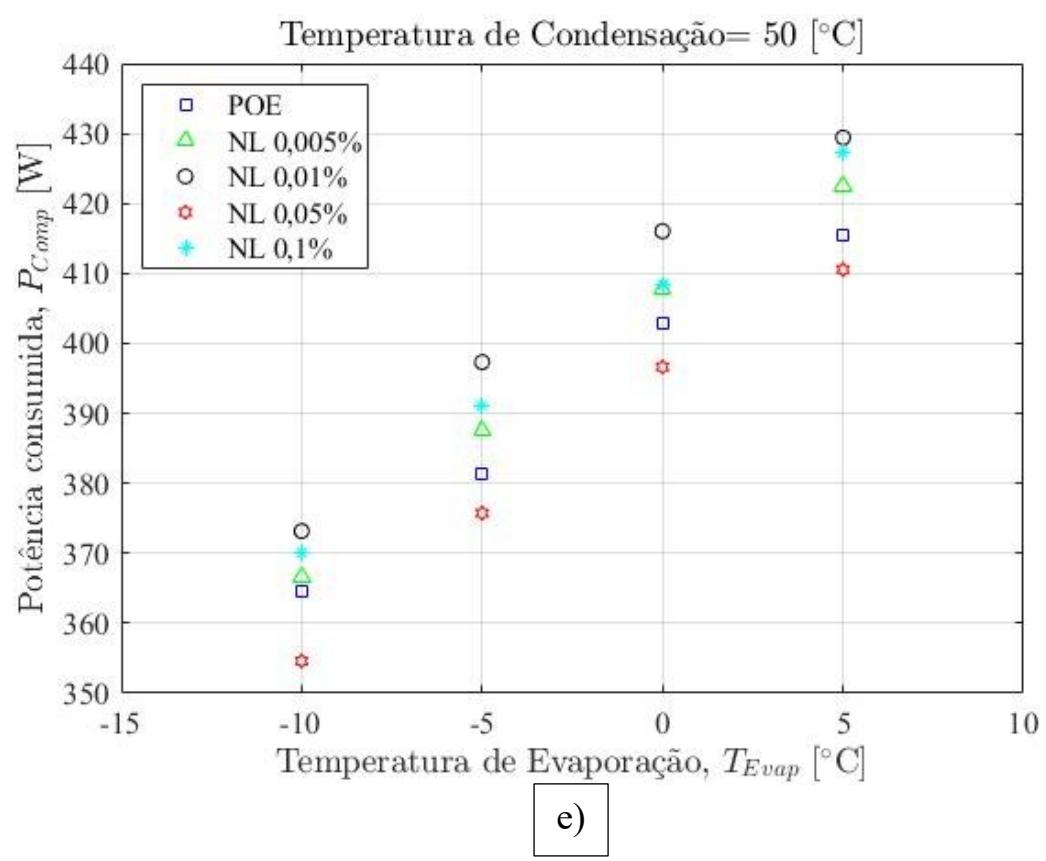
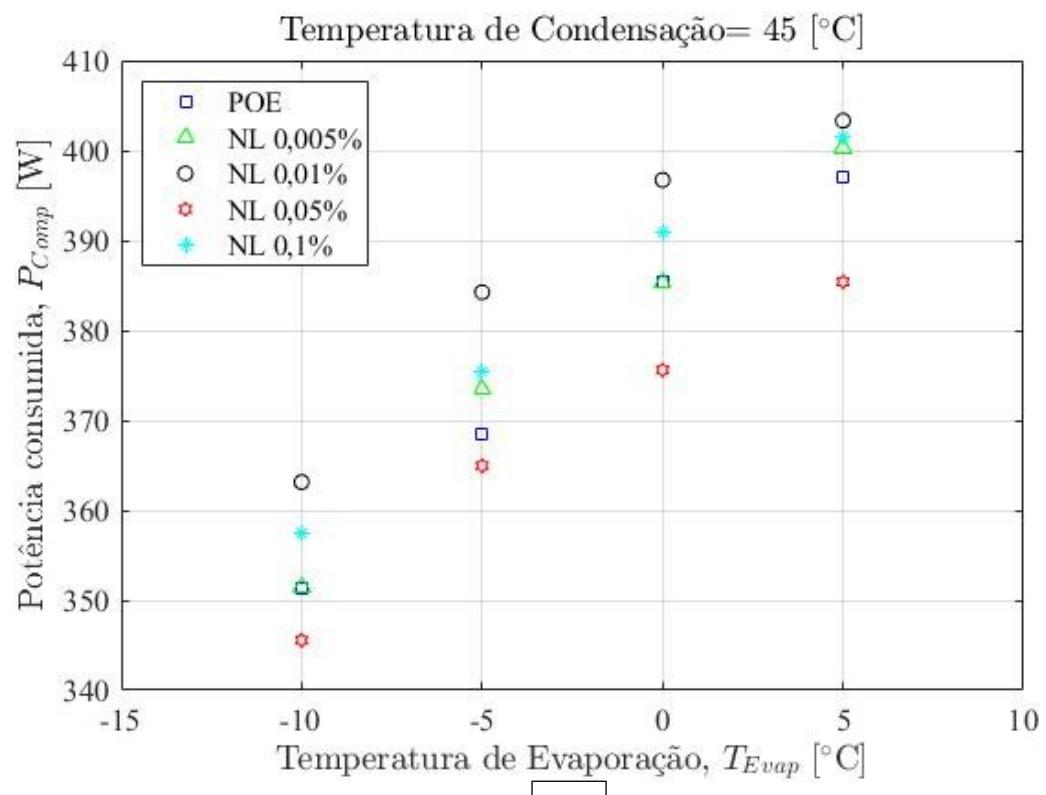
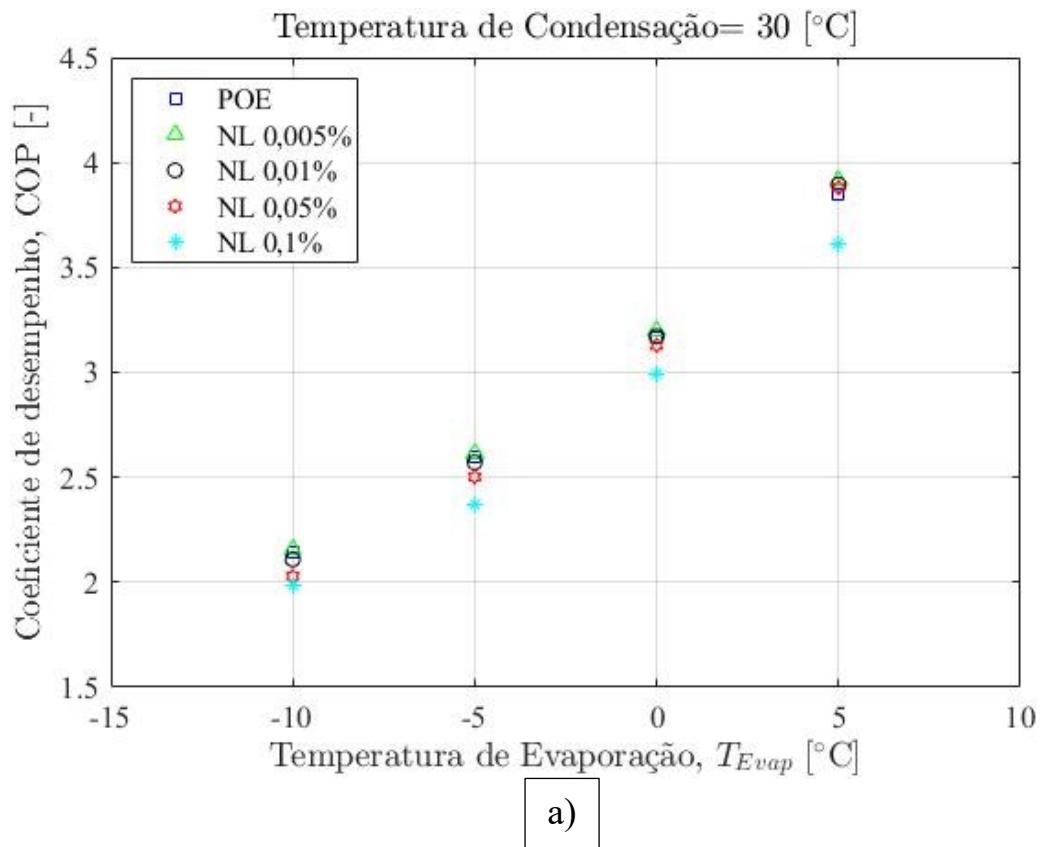
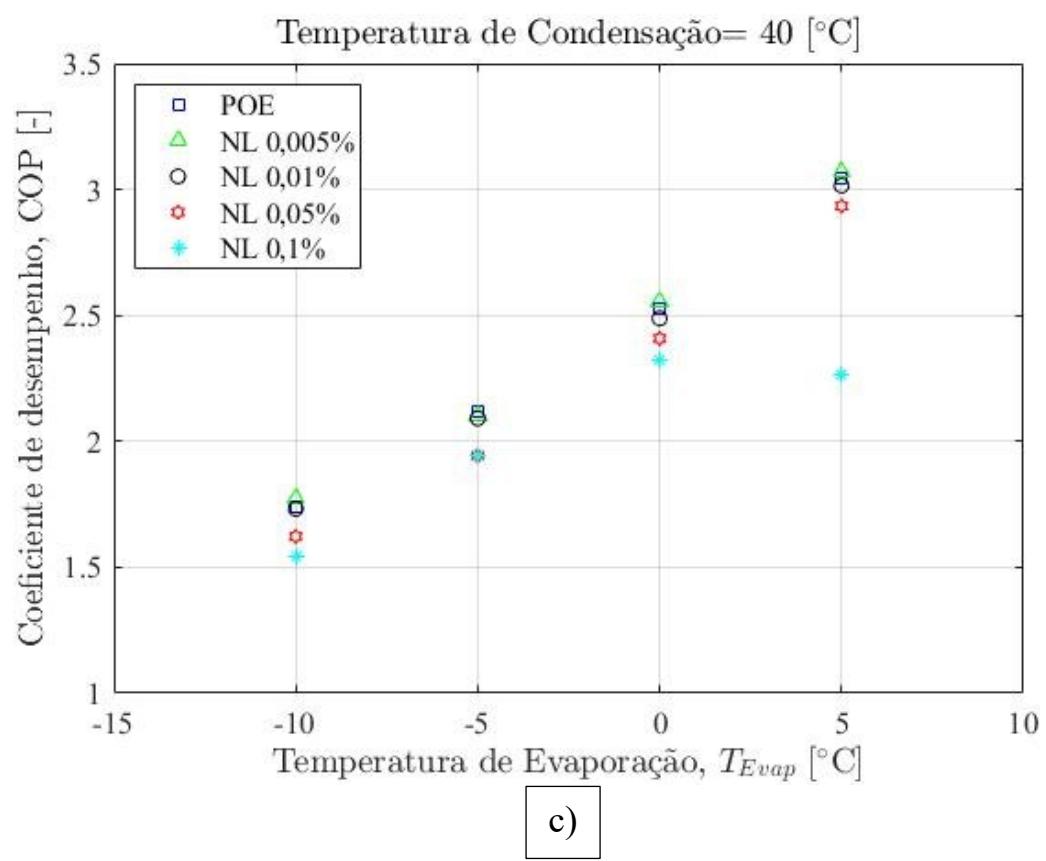
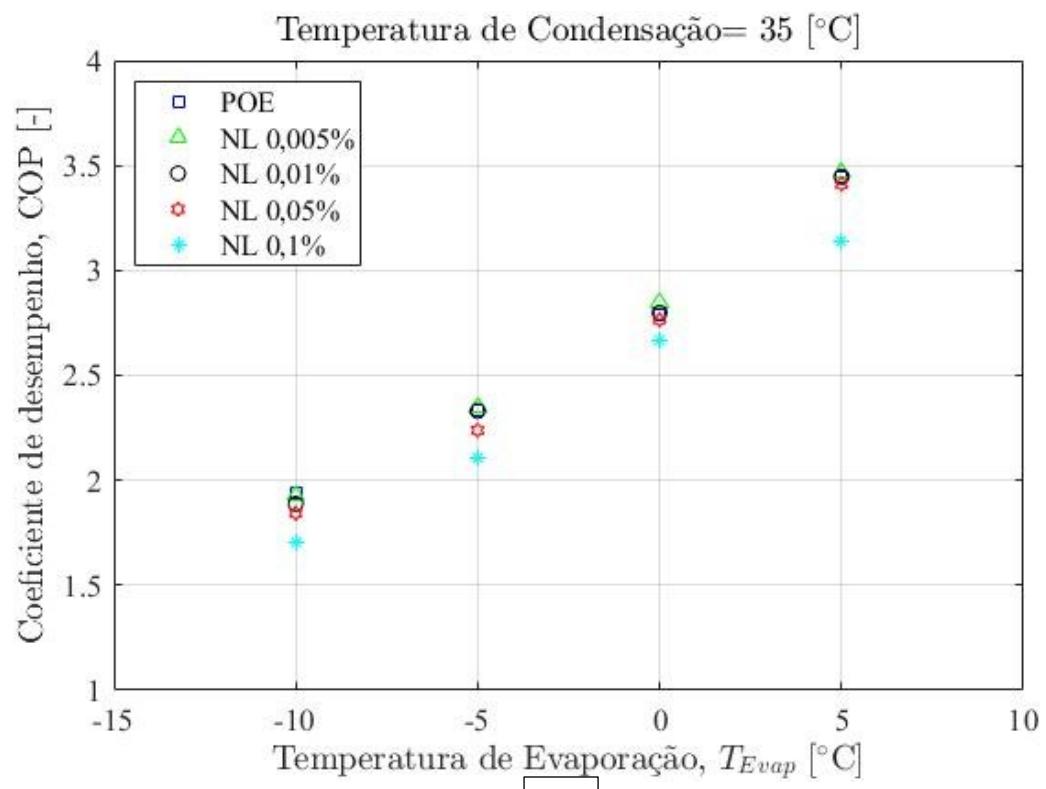


Figura 4.16 – Potência consumida do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.

Assim, tendo calculado a capacidade de refrigeração e com a potência consumida pelo compressor, foi possível obter os gráficos da Fig. 4.17 do coeficiente de desempenho (COP) com relação a temperatura de evaporação em cada temperatura de condensação para o fluido base e os nanolubrificantes.





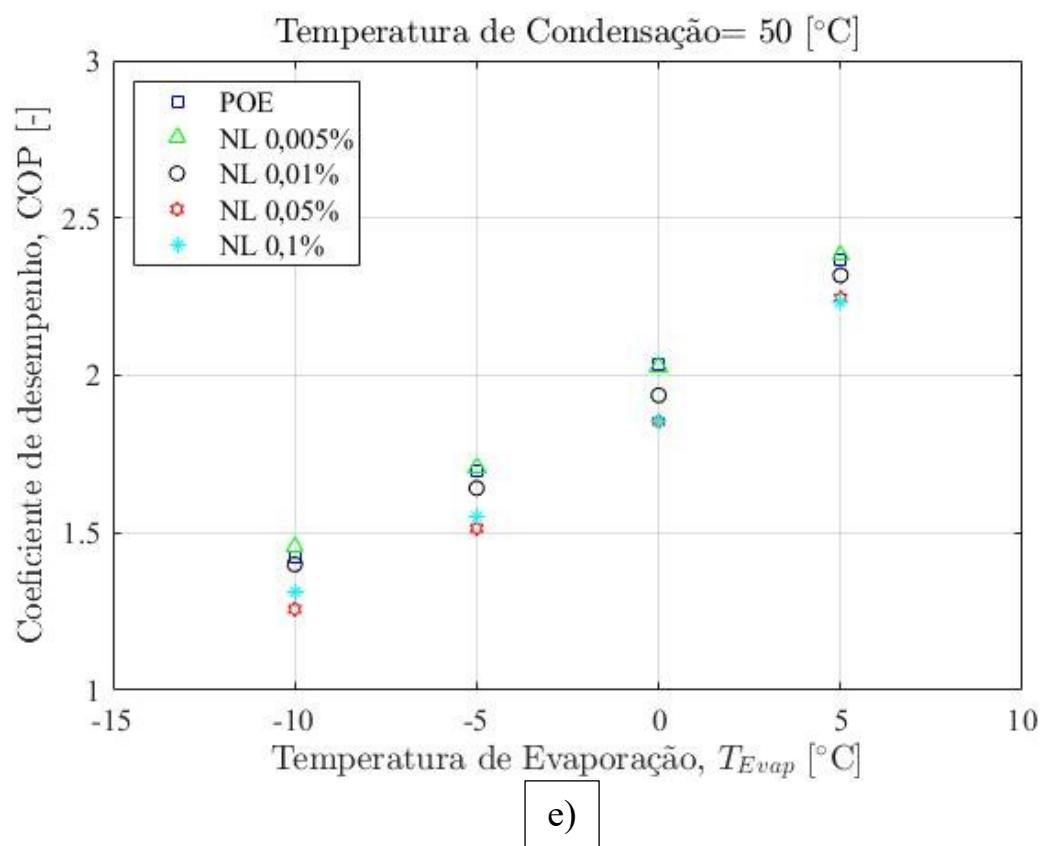
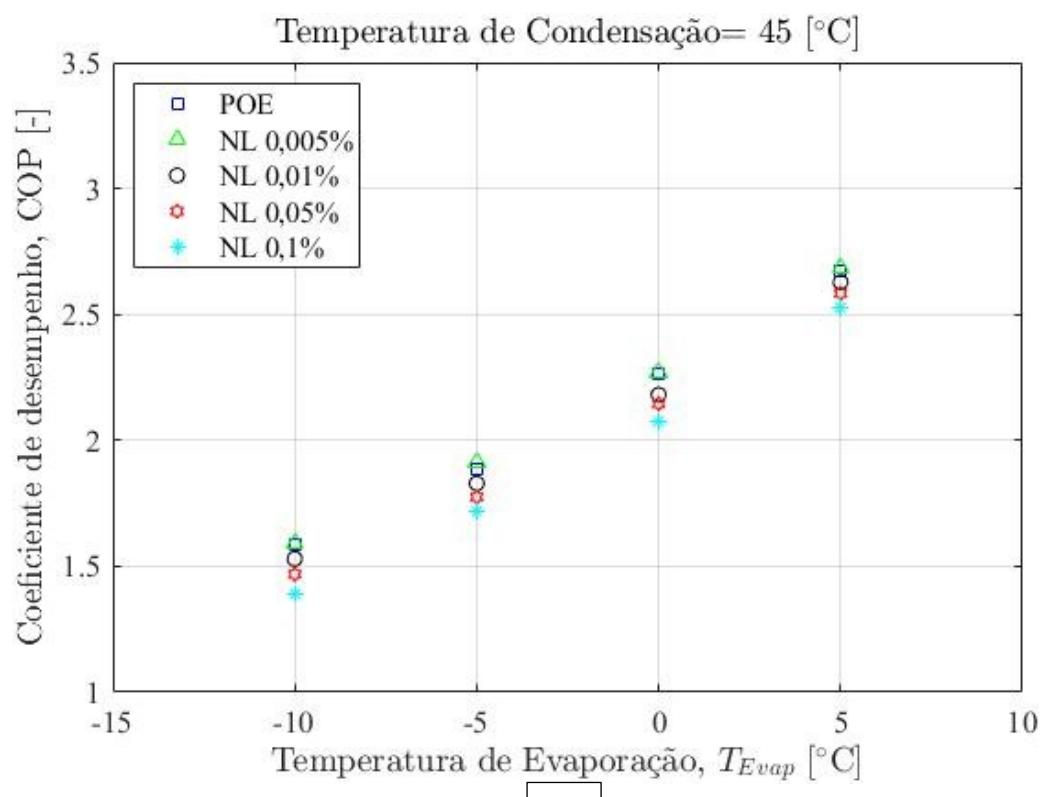


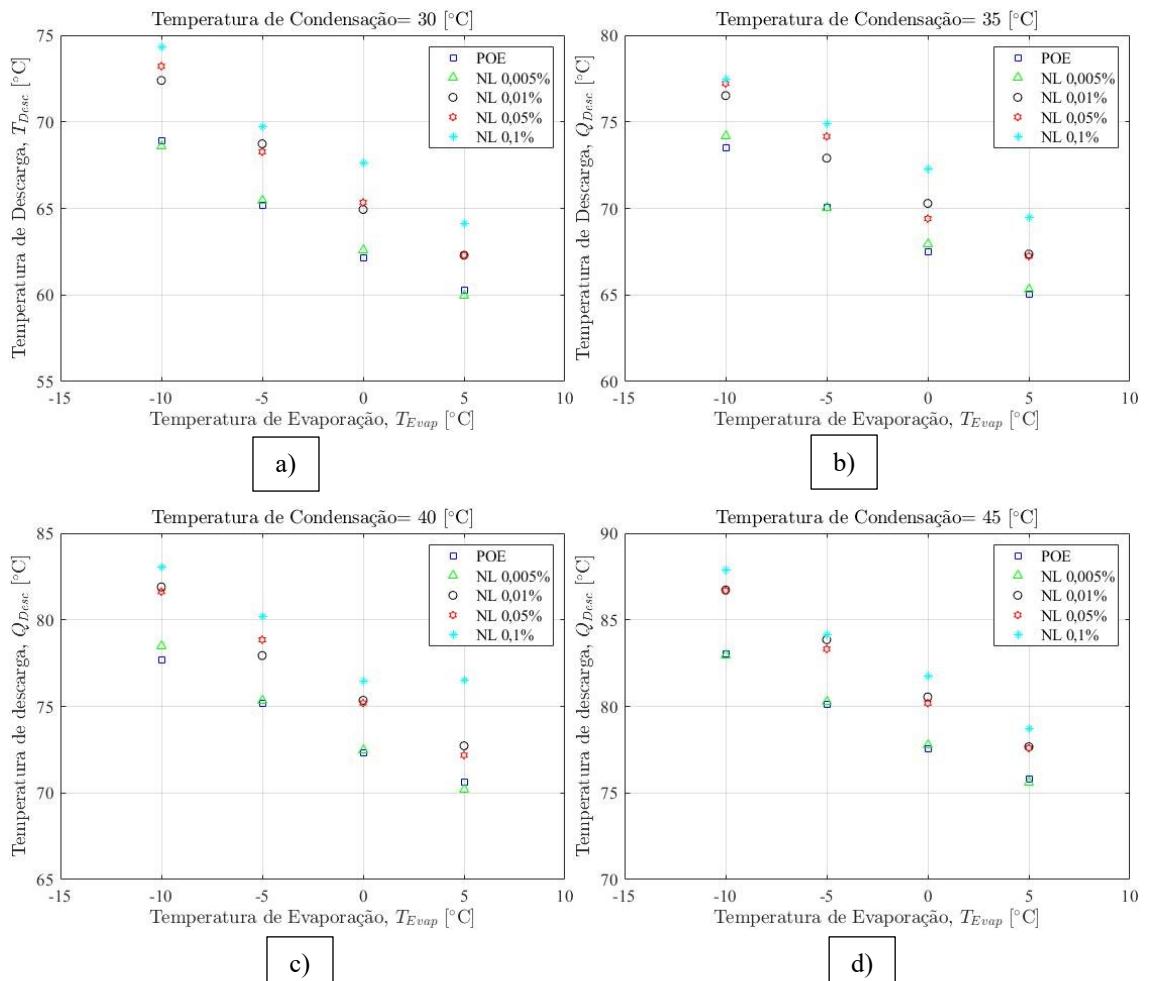
Figura 4.17 – Coeficiente de desempenho (COP) com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.

A Fig. 4.17 demonstra que nos testes com apenas lubrificante com óleo POE puro, conforme teoria com o aumento da temperatura de evaporação ou condensação se tem um aumento do coeficiente de desempenho, isso é devido a redução da diferença de pressões, entre a evaporação e a condensação. Na Fig. 4.17(a) na temperatura de condensação de 30 °C, pode se observar que apenas as baixas concentrações (0,005% e 0,01%) apresentaram um incremento, com valores máximos de 1,7% e 1,1% na temperatura de evaporação de 5 °C. Para Fig. 4.17(b) na temperatura de condensação de 35 °C apenas a concentração de 0,005% apresentou um incremento significativo com valor máximo de 1,9% na temperatura de evaporação de 0 °C. Quanto a Fig. 4.17(c) na temperatura de condensação de 40 °C apenas a menor concentração (0,005%) apresentou incremento de 2,2% na temperatura de evaporação de -10 °C. A Fig. 4.17(d) para temperatura de condensação de 45 °C novamente apresentou apenas a menor concentração com incremento de 1,5% na temperatura de evaporação de -5 °C. No último gráfico na Fig. 4.17(e) na temperatura de condensação de 50°C, igual aos anteriores apenas a menor concentração apresentou incremento no valor máximo de 2,2%.

Ao analisar de forma sucinta a Tabela 2.5, podem ser vistos alguns incrementos sucintos e outros com valores bem elevados aos encontrados no presente trabalho como valores de 38% e 45% correspondente aos trabalho de Jong et al. (2021) e Madyira; Babarinde; Mashinini (2022). Estes aumentos encontrados foram por conta dos altos incrementos encontrados pelos autores na capacidade de refrigeração e reduções expressivas na potência consumida pelo compressor causando um impacto direto nos aumentos observados.

Porém no presente trabalho os incrementos encontrados na capacidade refrigeração foram modestos e assemelham-se a alguns trabalhos referenciados na bibliografia ((ADELEKAN et al., 2019; MARCUCCI PICO et al., 2020; XING; WANG; YU, 2014)), logo os incrementos do coeficiente de desempenho encontrados não foram tão altos por conta que as reduções de potência consumida encontradas no presente trabalho não apresentaram impactos diretos para o incremento. Assim os incrementos observados no COP foram por conta apenas da capacidade de refrigeração que pode ser por conta da redução da resistência térmica com a aplicação de um nanolubrificante com a condutividade térmica maior que o óleo base.

A temperatura de descarga do compressor com relação a temperatura de evaporação e variando a temperatura de condensação pode ser observado na Fig. 4.18. Em todas as condições tiveram aumentos na temperatura de descarga. Na Fig. 18(a) na temperatura de condensação de 30 °C o incremento médio dos nanolubrificantes foi de ~2,7 °C. Para Fig. 18(b) na temperatura de condensação de 35 °C, com incremento médio dos nanolubrificantes de ~2,6 °C. A Fig. 18(c) na temporada de condensação de 40 °C, com incremento médio dos nanolubrificantes de ~2,8 °C. Na Fig. 18(d) na temperatura de condensação de 45 °C, com incremento médio de ~2,5 °C. Na última a Fig. 18(e) na temperatura de condensação de 50 °C, com incremento médio de ~2,8 °C. Foi observado que conforme se aumentava a temperatura de evaporação se tinha uma redução da temperatura de descarga, e que com o aumento da temperatura de condensação se tinha um aumento da temperatura de descarga conforme esperado pela teoria. Pode se observar o incremento da temperatura de descarga com o aumento da concentração de nanopartículas nos nanolubrificantes, este efeito e os dados estão em concordância com os resultados encontrado por Xing; Wang; Yu (2014).



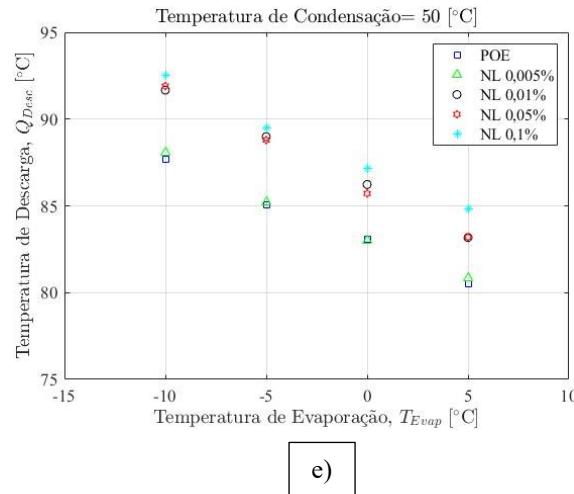
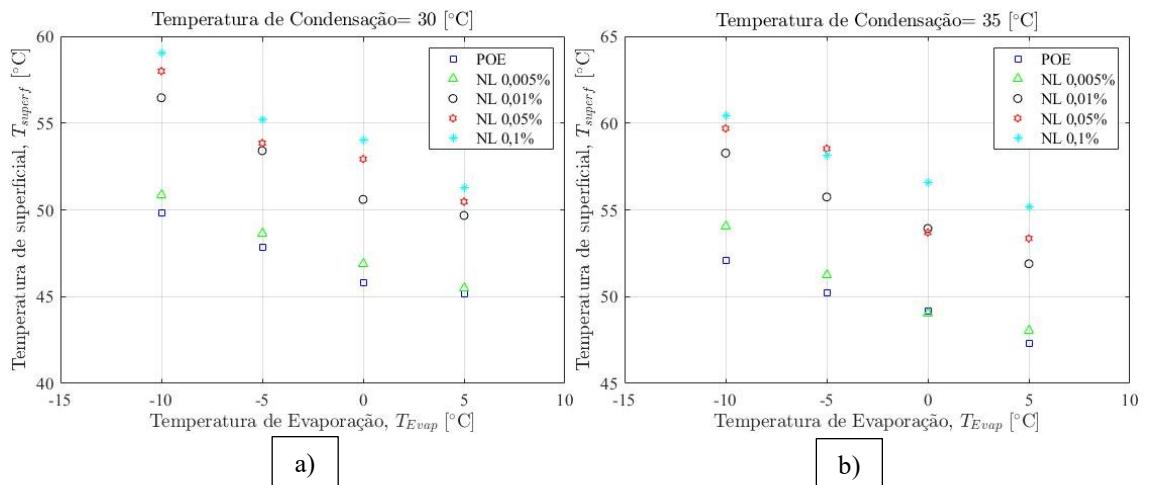


Figura 4.18 – Temperatura de descarga do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.

Na Fig. 4.19 foi mostrado a temperatura superficial do compressor com relação a temperatura de evaporação com temperatura de condensação, conforme se aumentava a concentração de nanopartículas nos nanolubrificantes se teve um aumento da temperatura superficial, assim como a temperatura de descarga com o aumento da temperatura de evaporação se teve uma redução na temperatura superficial do compressor e com o aumento da temperatura de condensação se teve um aumento da temperatura superficial. O aumento médio de temperatura superficial foi na Fig. 4.19(a) foi de ~5 °C, na Fig. 4.19(b) foi de ~5 °C, na Fig. 4.19(c) foi de ~6 °C, na Fig. 4.19(d) foi de ~6 °C e na Fig. 4.19(e) foi de ~7 °C.



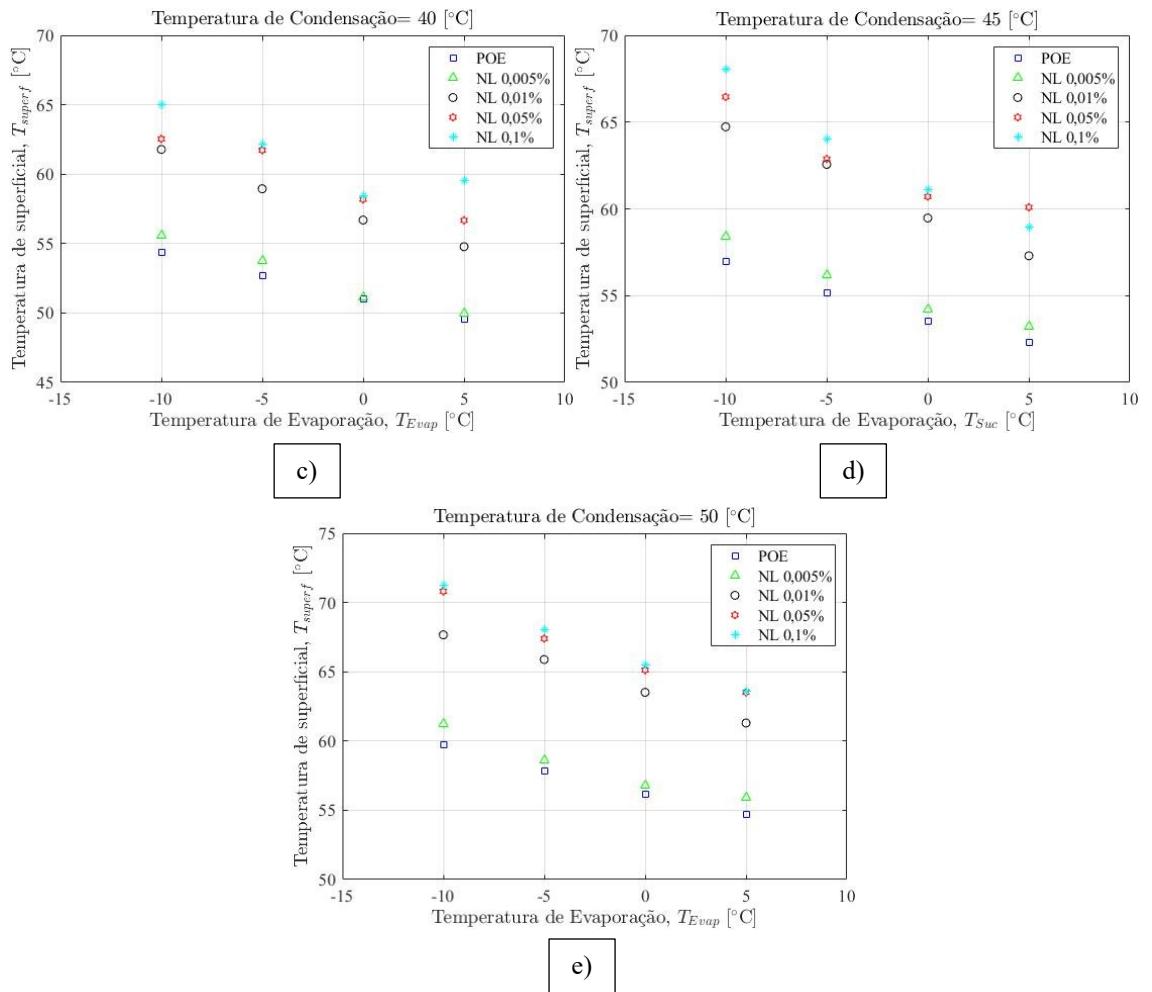


Figura 4.19 – Temperatura superficial do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.

A temperatura de cárter do compressor foi medida com o termopar da Fig. 3.15, sendo feito um gráfico na Fig. 4.20 com relação a temperatura de evaporação e comportamento com a mudança da temperatura de condensação. Conforme observado com a capacidade de refrigeração por conta do efeito de aumento da condutividade térmica do nanolubrificante, foi possível observar na Fig. 4.20 uma redução na temperatura do cárter do compressor para concentração mássica de 0,005%, em todas as condições operacionais de temperatura de evaporação e condensação, obtendo reduções médias de ~4 °C.

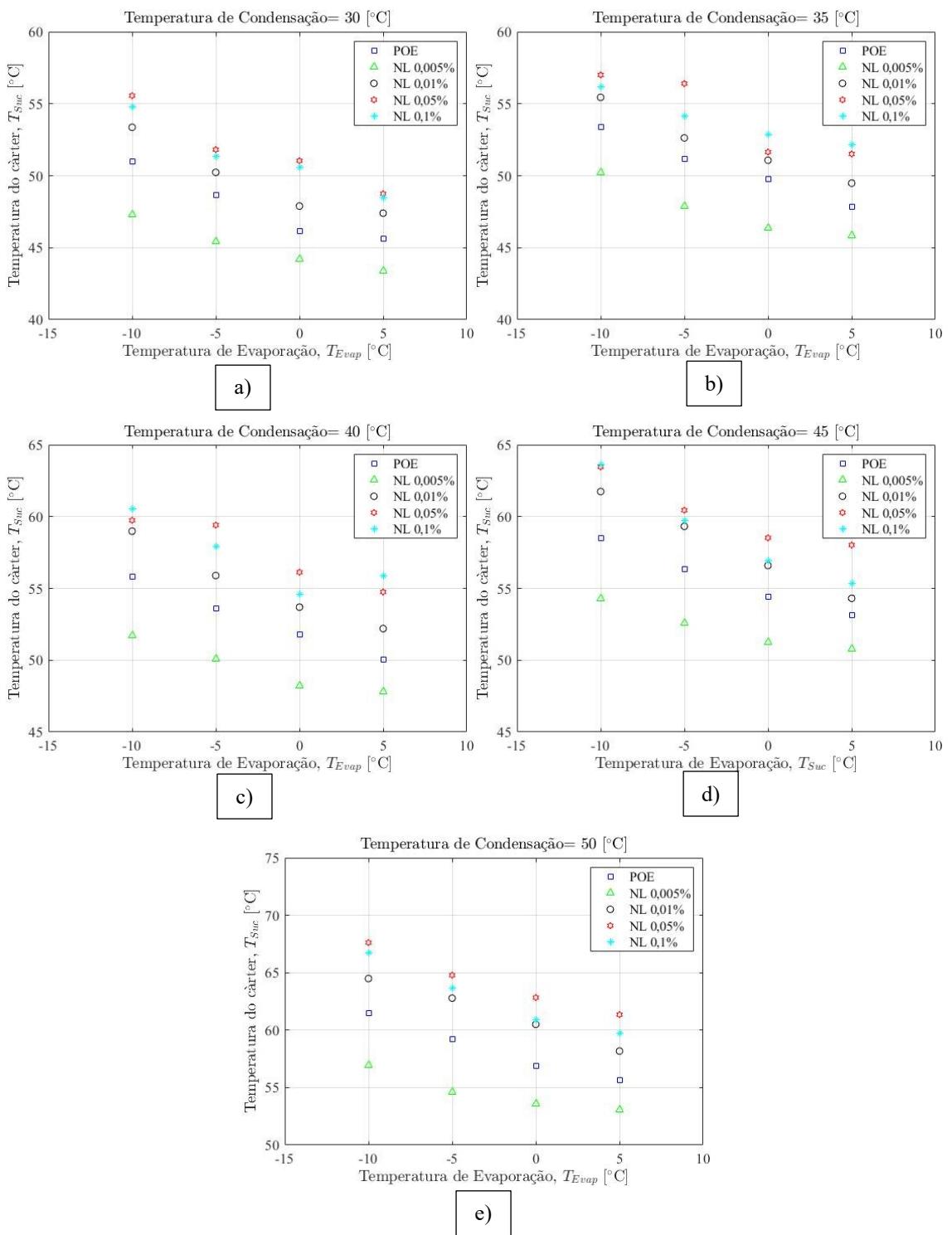


Figura 4.20 – Temperatura de cárter do compressor com relação a temperatura de evaporação para os nanolubrificantes. a) Temperatura de condensação 30 °C; b) Temperatura de condensação 35 °C; c) Temperatura de condensação 40 °C; d) Temperatura de condensação 45 °C; e) Temperatura de condensação 50 °C.

Como conclusão desta seção temos que a capacidade de refrigeração para as menores concentrações (0,005% e 0,01%) apresentaram os melhores incrementos, para a potência consumida foram observados incrementos significativos apenas para a concentração de 0,05%, enquanto o coeficiente de desempenho apresentou incrementos significativos apenas para menor concentração (0,005%), e nas temperaturas de descarga e superficial foram encontrados apenas incrementos, porém na temperatura de cárter do compressor foram observadas reduções de temperatura para menor concentração.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES E PERPECTIVAS FUTURAS

O desenvolvimento deste trabalho teve como objetivo a avaliação do comportamento de nanolubrificantes com óleo base POE e nanopartículas de grafeno em um sistema de refrigeração, o desenvolvimento partiu inicialmente de uma revisão bibliográfica quanto os métodos produção e síntese, propriedades termofísicas, e a aplicação de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração. Foi desenvolvido os métodos e aplicado equipamentos para análise das propriedades avaliadas. No qual foi realizado a medição quanto a estabilidade, medição das propriedades termofísicas como massa específica, viscosidade e condutividade térmica para avaliar o comportamento dos nanolubrificantes. Finalmente foi aplicado os nanolubrificantes na bancada experimental de refrigeração para medição e avaliação das propriedades como capacidade de refrigeração, potência consumida, coeficiente de desempenho, temperatura de descagar, temperatura superficial e de cárter do compressor. Desta forma este trabalho contribuiu para levantamento de dados experimentais que contribuem para o melhor entendimento da aplicação de nanopartículas de grafeno como aditivo lubrificante em sistemas de refrigeração.

Assim será apresentado conclusões finais quanto aos resultados obtidos com o desenvolvimento do presente trabalho de pesquisa e, como encerramento recomendações de trabalhos futuros.

- Na estabilidade foi observado que conforme se aumenta a concentração de nanopartículas no nanolubrificante se tem uma redução na estabilidade, e a aplicação de diferentes funcionalizações pode impactar de forma significativa na estabilidade. Logo as nanopartículas de grafeno do Tipo 3 apresentaram em todas as concentrações estabilidade quando avaliadas num período de 6 meses, demonstrando que a funcionalização realizada para o tipo 3 previou os aglomerados e a redução na taxa de sedimentação das nanopartículas, assim concordando com comportamento observado no estudo de Bordignon et al. (2018).

- A massa específica dos nanolubrificantes independente do tipo de nanopartícula de grafeno aplicada não teve incrementos significativos, isso por conta das baixas concentrações de nanopartículas funcionalizadas aplicadas nos nanolubrificantes, que está em concordância com o trabalho de Beheshti, Shanbedi e Heris (2014) que aplicou nanopartículas de nanotubos de carbono de paredes múltiplas com concentrações em massa de 0,001% a 0,01%. Além disso com o aumento da temperatura se observava uma redução da massa específica tanto para fluido base quanto para os nanolubrificantes, independente do tipo de nanopartícula aplicada.

- A viscosidade tanto do fluido base quanto dos nanolubrificantes independente do tipo ou concentração aplicada de nanopartículas, teve redução com o aumento da temperatura, chegando a uma redução de 94,5% para temperatura máxima e mínima avaliada, também não foram observados incrementos ou decrementos significativos entre o fluido base e os nanolubrificantes. Os testes foram validados pela norma ASTM D-2422-97 com desvio máximo de 1,2% com relação ao valor médio definido.

- A condutividade térmica dos nanolubrificantes, teve incrementos máximo de 2,2% para o nanolubrificante com concentração em massa de 0,1% na temperatura de 15 °C, para outras concentrações foram encontrados modestos incrementos, e em temperaturas mais altas incrementos obtidos foram inferiores a 1% como na temperatura de 55 °C. Além disso não foi possível observar uma tendência linear entre o comportamento da condutividade térmica e a concentração de nanopartículas.

- Na capacidade de refrigeração os nanolubrificantes apenas apresentaram incrementos para baixas concentrações mássicas (0,005% e 0,01%), foi observado que o aumento da temperatura de condensação até 40 °C aplicou incrementos similares de ~2-4,4%, porém acima desta temperatura os incrementos foram mais sucintos ~1-3%, tendo valores máximos de 3% para concentração de 0,005% e 4,4% na concentração de 0,01% na temperatura de evaporação de 0 °C e temperatura de condensação de 35 °C.

- Na potência consumida no compressor foi observado reduções em apenas duas concentrações 0,005% e 0,05%, no qual para a concentração de 0,005% teve um valor máximo de 0,7% na temperatura de condensação de 30 °C e temperatura de evaporação de -10 °C,

enquanto a concentração de 0,05% apresentou um valor máximo de 2,7% com temperatura de condensação de 50 °C e na mesma temperatura de evaporação. Os nanolubrificantes com nanopartículas com concentração de 0,05% apresentaram reduções em todas as faixas de operação, enquanto a concentração de 0,005% apresentou em alguns pontos com valores não significativos.

- O coeficiente de desempenho do sistema mostrou incrementos apenas em baixas concentrações (0,005% e 0,01%) com o aumento da temperatura de condensação apenas a menor concentração apresentou incrementos, tendo incremento máximo no valor de 2,2% para concentração de 0,005% na temperatura de condensação de 40 °C e temperatura de evaporação de -10 °C, e apenas na temperatura de condensação de 30 °C foi observado incrementos para concentração de 0,01% com valor máximo de 1,1% na temperatura de evaporação de 5 °C.
- Temperatura de descarga apresentou aumentos em todas as condições de operação para todas as concentrações mássicas testadas, tendo um valor máximo médio de ~2,8 °C na temperatura de 50 °C. Foi observado um aumento da temperatura de descarga com o aumento da concentração mássica, mas quando se aumentava a temperatura de evaporação se reduzia a temperatura de descarga.
- Na temperatura superficial teve incrementos conforme se tinha um aumento da concentração de nanopartículas nos nanolubrificantes, e também com aumento da temperatura de condensação, sendo observado um valor máximo médio de ~7 °C. Além disso tinha decremento da temperatura superficial com o aumento da temperatura de evaporação.
- A temperatura do cárter teve redução apenas na menor concentração de nanopartículas de 0,005%, sendo observado reduções em todas as condições operacionais de temperatura de evaporação e condensação, obtendo reduções médias de ~4 °C, isso pelo fato do aumento da condutividade térmica do nanolubrificante.
- Analisando os incrementos causados pela adição de nanopartículas de grafeno em nanolubrificantes aplicados em um sistema de refrigeração, foi possível observar que os impactos da sua utilização como aditivo, sofreram influência direta quanto as condições de operação que podem favorecer ou dificultar o incremento das propriedades, porém apenas a

menor concentração apresentou resultados promissores neste trabalho, mesmo apresentando pequenos decrementos na potência consumida, por conseguir incrementos significativos na capacidade de refrigeração pode proporcionar uma melhoria do coeficiente de desempenho em diversas condições de operação e também proporcionar uma redução da temperatura do cárter.

Como recomendações para trabalhos futuros temos:

- Estudo aprofundado sobre a funcionalização das nanopartículas e seus impactos a longo prazo em nanolubrificantes e nas propriedades termofísicas.
- Melhoria das técnicas de dispersão de nanopartículas em óleos lubrificantes, tendo como objetivo aquisição de nanolubrificantes estáveis a longo prazo em altas temperaturas.
- Aplicação de testes tribológicos que possam descrever o comportamento real dos nanolubrificantes no sistema cilindro-pistão.
- Estudo das superfícies interiores dos compressores, antes e depois da aplicação do nanolubrificantes com objetivo aquisição de dados dos impactos causados, podendo gerar dados para explicações mais concisas da deposição de nanopartículas, e do comportamento real da lubrificação e desgaste do sistema.
- Modificação da bancada experimental para realização de testes comparativos com diferentes tipos de fluidos refrigerantes naturais para observar os efeitos dos nanolubrificantes.
- Aplicação de nanolubrificantes em refrigeradores residenciais para avaliação de comportamento e métricas quantitativas de ganhos na eficiência elétrica ao longo do tempo.

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, p. 100166, 1 dez. 2020.

ADELEKAN, D. S. et al. Experimental performance of LPG refrigerant charges with varied concentration of TiO₂ nano-lubricants in a domestic refrigerator. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 9, n. December 2016, p. 55–61, 2017.

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

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, 1 mar. 2022.

AKTAS, M. et al. A Theoretical Comparative Study on Nanorefrigerant Performance in a Single-Stage Vapor-Compression Refrigeration Cycle. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 7, n. 1, 2015.

AL-JANABI, A. S. et al. 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**, v. 648, n. April, p. 129275, set. 2022.

AL-JANABI, A. S. et al. Experimental investigation on the tribological and rheological properties of graphene and FMWCNT based nanolubricants with CTAB surfactants. **Synthetic Metals**, v. 308, p. 117726, 1 nov. 2024.

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, p. 101607, 1 dez. 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, jan. 2023.

ANISH, M. et al. Performance study of a domestic refrigerator using CuO/AL2O3-R22

nanorefrigerant as a working fluid. **International Journal of Ambient Energy**, v. 41, n. 2, p. 152–156, 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.

BABU, A. M.; NALLUSAMY, S.; RAJAN, K. EXPERIMENTAL ANALYSIS ON VAPOUR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEM USING NANOLUBRICANT WITH HFC-134a REFRIGERANT. v. 9, p. 33–43, 2016.

BANDGAR, M. S. An experimental investigation of VCRS using R134a / POE oil / mineral oil / nano-SiO₂ as working fluid. v. 3, n. 7, p. 4–9, 2016.

BEHESHTI, A.; SHANBEDI, M.; HERIS, S. Z. Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 118, n. 3, p. 1451–1460, 26 dez. 2014.

BONDRE, D. et al. Experimental performance and analysis of domestic refrigeration system using nano-refrigerants. **Lecture Notes in Mechanical Engineering**, p. 389–399, 2019.

BORDIGNON, R. et al. Tribological Behaviour of Plasma-Functionalized Graphene as Low-Viscosity Oil Additive. **Tribology Letters**, v. 66, n. 3, p. 114, 2 set. 2018.

BRASIL; MMA, M. DO M. A. **PROGRAMA BRASILEIRO DE ELIMINAÇÃO DOS HCFCs-PBH: Fluidos Frigoríficos Naturais em Sistemas de Refrigeração Comercial**. Brasília: MMA: [s.n.].

BRASIL; MMA, M. DO M. A. **Treinamento e Capacitação para Boas Práticas em Sistemas de Refrigeração Comercial**. [s.l: s.n.].

CHAKRABORTY, S.; PANIGRAHI, P. K. Stability of nanofluid: A review. **Applied Thermal Engineering**, v. 174, p. 115259, 25 jun. 2020.

CHAUHAN, S. S. Performance evaluation of ice plant operating on R134a blended with varied concentration of Al₂O₃–SiO₂/PAG composite nanolubricant by experimental approach. **International Journal of Refrigeration**, v. 113, p. 196–205, 2020.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. **Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles**. United States: 1995. Disponível em: <<https://www.osti.gov/biblio/196525>>

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, 25 jun. 2021.

DAĞIDIR, K.; BILEN, K. Experimental investigation of usage of POE lubricants with

Al₂O₃, graphene or CNT nanoparticles in a refrigeration compressor. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, v. 14, p. 1041–1058, 1 jan. 2023.

DESAI, N. S.; PATIL, P. R. Application of SiO₂ Nanoparticles as Lubricant Additive in VCRS : An Experimental Investigation. v. 4, n. 1, p. 1–6, 2015.

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.

FARADE, R. A. et al. Investigation of the Effect of Sonication Time on Dispersion Stability, Dielectric Properties, and Heat Transfer of Graphene Based Green Nanofluids. **IEEE Access**, v. 9, p. 50607–50623, 2021.

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 réfrigérateur. **International Journal of Refrigeration**, v. 91, p. 122–135, 2018.

HAQUE, M. E. et al. Performance of a domestic refrigerator using nanoparticles-based polyolester oil lubricant. **Journal of Mechanical Engineering and Sciences**, v. 10, n. 1, p. 1778–1791, 2016.

HEMMAT, M.; ESFANDEH, S. Investigation of rheological behavior of hybrid oil based nanolubricant-coolant applied in car engines and cooling equipments. **Applied Thermal Engineering**, v. 131, p. 1026–1033, 2018.

HUANG, S. et al. Synergistic tribological performance of a water based lubricant using graphene oxide and alumina hybrid nanoparticles as additives. **Tribology International**, v. 135, n. September 2018, p. 170–180, jul. 2019.

HUSSEN, H. A. Experimental Investigation for TiO₂ nanoparticles as a Lubricant-Additive for a Compressor of Window Type Air-Conditioner System. **Journal of Engineering**, v. 20, n. 2, 2014.

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

ILYAS, S. U.; PENDYALA, R.; NARAHARI, M. Stability and thermal analysis of MWCNT-thermal oil-based nanofluids. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 527, n. May, p. 11–22, 2017.

INMETRO/CICMA/SEPIN. **Avaliação de dados de medição - medição - Guia para a Guia para a expressão d expressão de incerteza incerteza demedição medição medição –**

GUM2008. Duque de Caxias, RJ: [s.n.].

ISMAIL, M. F. et al. Rheological Behaviour and Thermal Conductivity of Polyvinyl Ether Lubricant Modified with SiO₂-TiO₂ Nanoparticles for Refrigeration System. **International Journal of Refrigeration**, v. 138, p. 118–132, 1 jun. 2022.

JIA, T.; WANG, R.; XU, R. Performance of MoFe₂O₄-NiFe₂O₄/Fullerene-added nano-oil applied in the domestic refrigerator compressors. **Energy Economics**, v. 45, p. 120–127, 2014.

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

JOSHI, Y. G. et al. Effect of multi-walled carbon nanotube on thermophysical properties of polyester and mineral oil. **Materials Today: Proceedings**, v. 62, p. 3849–3854, 1 jan. 2022.

JWO, C.-S. et al. Effects of nanolubricant on performance of hydrocarbon refrigerant system. **Journal of Vacuum Science & Technology B: Microelectronics and Nanometer Structures**, v. 27, n. 3, p. 1473, 2009.

KAMARAJ, N. Experimental analysis of Vapour Compression Refrigeration System using the refrigerant with Nano particles. n. May, 2016.

KEDZIERSKI, M. A. et al. Viscosity, density, and thermal conductivity of aluminum oxide and zinc oxide nanolubricants. **International Journal of Refrigeration**, v. 74, n. 9, p. 1–9, 2017.

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

KRISHNA SABAREESH, R. et al. Application of TiO₂ nanoparticles as a lubricant-additive for vapor compression refrigeration systems - An experimental investigation. **International Journal of Refrigeration**, v. 35, n. 7, p. 1989–1996, 2012.

KUMAR, R. R.; SRIDHAR, K.; NARASIMHA, M. Heat transfer enhancement in domestic refrigerator using. **International Journal of Computational Engineering Research**, v. v. 3, p. 42–50, 2013.

KUMAR, R.; SINGH, J. Effect of ZnO nanoparticles in R290/R600a (50/50) based vapour compression refrigeration system added via lubricant oil on compressor suction and discharge characteristics. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 53, n. 5, p. 1579–1587, 2017.

LINEIRA DEL RÍO, J. M. et al. Tribological properties of dispersions based on reduced

graphene oxide sheets and trimethylolpropane trioleate or PAO 40 oils. **Journal of Molecular Liquids**, v. 274, p. 568–576, 2019.

LING, J.; HWANG, Y.; RADERMACHER, R. **Vapor Compression Heat Pumps with Refrigerant Mixtures**. 1st Editio ed. Boca Raton: [s.n.].

LOU, J.; ZHANG, H.; WANG, R. Experimental investigation of graphite nanolubricant used in a domestic refrigerator. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 7, n. 2, p. 168781401557101, 1 jan. 2015.

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, 1 mar. 2022.

MANG, T. **Encyclopedia of Lubricants and Lubrication Volume 1**. New York: Springer Heidelberg, 2014.

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

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, 1 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.

MARCUCCI PICO, D. F.; PARISE, J. A. R.; BANDARRA FILHO, E. P. Nanolubricants in refrigeration systems: a state-of-the-art review and latest developments. **Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering**, v. 45, n. 2, p. 1–27, 2023.

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

MUHAMAD ZULKLEE, M. H.; MAMAT, H. Thermophysical and corrosion inhibitor evaluation of graphene, aluminum nitride and barium titanate nanolubricants. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 101, n. 12, p. 101462, 1 dez. 2024.

NAIR, V.; PAREKH, A. D.; TAILOR, P. R. Experimental investigation of a vapour compression refrigeration system using R134a/Nano-oil mixture. **International Journal of Refrigeration**, v. 112, p. 21–36, 2020.

OHUNAKIN, O. S. et al. Performance of a hydrocarbon driven domestic refrigerator based on varying concentration of SiO₂ nano-lubricant Performance d'un réfrigérateur domestique fonctionnant aux hydrocarbures , basé sur une concentration variable de nano

lubrifiant SiO₂. **International Journal of Refrigeration**, v. 94, p. 59–70, 2018.

PADMANABHAN, V. M. V.; PALANISAMY, S. The use of TiO₂ nanoparticles to reduce refrigerator ir-reversibility. **Energy Conversion and Management**, v. 59, p. 122–132, 2012.

PAMIES, R. et al. Antiwear performance of ionic liquid+graphene dispersions with anomalous viscosity-temperature behavior. **Tribology International**, v. 122, n. February, p. 200–209, 2018.

RUOSO, A. C.; CAETANO, N. R. Análise dos limites de inflamabilidade e de segurança da utilização do etanol hidratado. **Tecno-Lógica**, v. 22, n. 2, p. 106, 31 jul. 2018.

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 ReportsElsevier B.V., , fev. 2021. Disponível em: <<https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0370157321002775>>

SAID, Z. et al. Analysis of thermophysical properties and performance of nanorefrigerants and nanolubricant-refrigerant mixtures in refrigeration systems. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 49, p. 103274, 1 set. 2023.

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, 1 dez. 2020.

SANTHANA KRISHNAN, R. et al. **Analysis and feasibility of nano-lubricant in vapour compression refrigeration system**. Materials Today: Proceedings. Anais...Elsevier Ltd, 2018. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.matpr.2018.06.437>>

SANUKRISHNA, S. S. et al. Effect of oxide nanoparticles on the thermal, rheological and tribological behaviours of refrigerant compressor oil: An experimental investigation. **International Journal of Refrigeration**, v. 90, p. 32–45, 1 jun. 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. 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, 2018.

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.

SANUKRISHNA, S. S.; VISHNU, A. S.; M, J. P. Nanorefrigerants for energy efficient refrigeration systems †. v. 31, n. 8, p. 3993–4001, 2017.

SANUKRISHNA, S. S.; VISHNU, S.; PRAKASH, M. J. Experimental investigation on thermal and rheological behaviour of PAG lubricant modified with SiO₂ nanoparticles. v. 261, p. 411–422, 2018.

SAUFI, M. A.; MAMAT, H. Comparison of dispersion techniques of graphene nanoparticles in polyester oil. **Materials Today: Proceedings**, v. 66, p. 2747–2751, 2022.

SENDIL KUMAR, D.; ELANSEZHIAN, R. ZnO nanorefrigerant in R152a refrigeration system for energy conservation and green environment. **Frontiers of Mechanical Engineering**, v. 9, n. 1, p. 75–80, 2014.

SHAREEF, A. S.; AZZIZ, D. H. N.; HADI, H. S. Experimental Study: The Effects of Using Nano-Lubrication on the Performance of Refrigeration Systems. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering**, v. 433, n. 1, p. 0–11, 2018.

SHUKLA, G.; AIYER, H. Thermal conductivity enhancement of transformer oil using functionalized nanodiamonds. **IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation**, v. 22, n. 4, p. 2185–2190, 2015.

SOLIMAN, A. M. A. et al. **Performance enhancement of vapor compression cycle using nano materials**. 2015 International Conference on Renewable Energy Research and Applications, ICRERA 2015. **Anais...IEEE**, 2015.

SOLIMAN, A. M. A.; RAHMAN, A. K. A.; OOKAWARA, S. Enhancement of vapor compression cycle performance using nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2018.

SUBRAMANI, N.; MOHAN, A.; M, J. P. PERFORMANCE STUDIES ON A VAPOUR COMPRESSION REFRIGERATION SYSTEM USING NANO-LUBRICANT. v. 2, n. 1, p. 522–530, 2013.

SUBRAMANI, N.; PRAKASH, M. Experimental studies on a vapour compression system using nanorefrigerants. **International Journal of Engineering, Science and Technology**, v. 3, n. 9, p. 95–102, 2011.

TOMANIK, E. et al. Use of Functionalized Graphene-Based Materials on Grease. **Lubricants**, v. 11, n. 10, p. 452, 20 out. 2023.

WADZER, Y.; NI HTWE, Y. Z.; MAMAT, H. Surfactant additive enhanced stability and

thermal conductivity of graphene (Gr) and ALN (AlN) nanolubricants. **Journal of the Indian Chemical Society**, v. 102, n. 1, p. 101553, 1 jan. 2025.

WANG, R.; ZHANG, Y.; LIAO, Y. Performance of rolling piston type rotary compressor using fullerenes (C₇₀) and NiFe₂O₄ nanocomposites as lubricants additives. **Frontiers in Energy**, v. 14, n. 3, p. 644–648, 2020.

WHITE, D. et al. Microtribological behavior of Mo and W nanoparticle/graphene composites. **Wear**, v. 414–415, p. 310–316, 15 nov. 2018.

XING, M.; WANG, R.; YU, J. Application of fullerene C₆₀ nano-oil for performance enhancement of domestic refrigerator compressors. **International Journal of Refrigeration**, v. 40, p. 398–403, 2014.

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, fev. 2020.

YILDIZ, G.; AĞBULUT, Ü.; GÜREL, A. E. A review of stability, thermophysical properties and impact of using nanofluids on the performance of refrigeration systems. **International Journal of Refrigeration**, v. 129, p. 342–364, 2021.

YILMAZ, A. C. Performance evaluation of a refrigeration system using nanolubricant. **Applied Nanoscience**, v. 10, n. 5, p. 1667–1678, 20 maio 2020.

ZAWAWI, N. N. M. et al. Experimental investigation on thermo-physical properties of metal oxide composite nanolubricants Étude expérimentale sur les propriétés thermo-physiques des nanolubrifiants composites à oxydes métalliques. **International Journal of Refrigeration**, v. 89, p. 11–21, 2018.

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, 15 mar. 2022.

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

APENDICÊ I

LEVANTAMENTO BIBLIOGRÁFICO: Aplicação de nanolubrificantes em sistemas de refrigeração com incremento do COP e decremento da potência consumida na melhor concentração.

Tabela A.1a – Tabela de resumo de trabalhos com nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração por compressão a vapor.

Autor	Tipo de nanopartícula	Nanolubrificante	ϕ [%vol.]	ϕ [g/L]	ϕ [%w.t.]	Incremento do COP (%)	Decremento da potência consumida (%)
(XING; WANG; YU, 2014)	Carbono	C ₆₀ /OM	-	3	0,3	5,6	4,58
(KAMARAJ, 2016)	Carbono	CA/POE	-	0,1	0,01	11,12	20,00
(BABARINDE et al., 2020)	Carbono	GR/OM	-	0,2	0,02	45,00	33,4
(JONG et al., 2021)	Carbono	MWCNT/POE	0,1	-	0,17	7,00	38
(YILMAZ, 2020)	Compósito	Cu/Ag/POE	0,5	-	5	20,89	3,66
(ANISH et al., 2018)	Compósito	CuO/Al ₂ O ₃ /OM	0,05	-	0,24	6,90	14,29
(WANG; ZHANG; LIAO, 2020)	Compósito	C ₇₀ /NiFe ₂ O ₄	-	2,5	2	1,23	0,61
(JIA; WANG; XU, 2014)	Compósito	MoFe ₂ O ₄ -NiFe ₂ O ₄ /C ₆₀	-	0,25	16,15	5,33	4,52

Legenda: MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas; POE: Polioéster; CA: Carbono amorfo; OM: Óleo mineral; GR: Grafeno; ND: Nanopartículas de diamantes; C₆₀: Fulereno; CuO: óxido de cobre; Al₂O₃: Óxido de alumínio; NiFe₂O₄= Ferrita de níquel; C₇₀: Fulereno.

Tabela A.1b – Tabela de resumo de trabalhos com nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração por compressão a vapor.

Autor	Tipo de nanopartícula	Nanolubrificante	ϕ [%vol.]	ϕ [g/L]	ϕ [%w.t.]	Incremento do COP (%)	Decremento da potência consumida (%)
(SHAREEF; AZZIZ; HADI, 2018)	Óxido	Al ₂ O ₃ /OM	-	-	0,05	25,61	28,57
(KUMAR; SRIDHAR; NARASIMHA, 2013)	Óxido	Al ₂ O ₃ /OM	-	-	0,06	19,6	11,50
(SUBRAMANI; PRAKASH, 2011)	Óxido	Al ₂ O ₃ /OM	-	-	0,06	33,00	25,00
(AKTAS et al., 2015)	Óxido	Al ₂ O ₃ /OM	-	-	0,06	16,84	12,10
(JWO et al., 2009)	Óxido	Al ₂ O ₃ /OM	-	-	0,1	4,40	2,40
(SOLIMAN; RAHMAN; OOKAWARA, 2018)	Óxido	Al ₂ O ₃ /POE	-	-	0,1	10,00	9,28
(BONDRE et al., 2019)	Óxido	Al ₂ O ₃ /POE	-	-	0,1	17,27	32,48
(SOLIMAN et al., 2015)	Óxido	Al ₂ O ₃ /POE	-	-	0,1	10,50	13,50
(HAQUE et al., 2016)	Óxido	Al ₂ O ₃ /POE	-	-	0,2	19,00	27,73
(CHAUHAN, 2020)	Óxido	Al ₂ O ₃ /PAG	0,08	-	0,3	10,89	6,80
(NAIR; PAREKH; TAILOR, 2020)	Óxido	Al ₂ O ₃ /PAG	-	-	0,5	6,50	6,10
(SANUKRISHNA; VISHNU; M, 2017)	Óxido	CuO/PAG	0,1	-	0,06	7,50	6,20
(YILMAZ, 2020)	Óxido	CuO/POE	0,5	-	0,3	14,56	2,15
(KUMAR; SINGH, 2017)	Óxido	CuO/OM	-	-	0,8	46,00	7,00
(OHUNAKIN et al., 2018)	Óxido	SiO ₂ /OM	0,02	0,2	-	3,21	18,60

Legenda: PAG: Polialquileno glicol; SiO₂: Dióxido de silício.

Tabela A.1c – Tabela de resumo de trabalhos com nanolubrificantes aplicados em sistemas de refrigeração por compressão a vapor.

Autor	Tipo de nanopartícula	Nanolubrificante	ϕ [%vol.]	ϕ [g/L]	ϕ [%w.t.]	Incremento do COP (%)	Decremento da potência consumida (%)
(BANDGAR, 2016)	Óxido	SiO ₂ /OM	-	-	0,5%	12,16	13,89
(DESAI; PATIL, 2015)	Óxido	SiO ₂ /POE	-	-	2%	14,05	14,02
(PADMANABHAN; PALANISAMY, 2012)	Óxido	TiO ₂ /OM	-	0,1	0,01	36,00	26,90
(ADELEKAN et al., 2017)	Óxido	TiO ₂ /OM	-	0,2	0,02	12,00	13,70
(BABU; NALLUSAMY; RAJAN, 2016)	Óxido	TiO ₂ /OM	-	0,2	0,02	20,20	9,65
(SUBRAMANI; MOHAN; M, 2013)	Óxido	TiO ₂ /OM	-	0,2	0,02	62,54	33,33
(GILL et al., 2018)	Óxido	TiO ₂ /OM	-	0,2	0,02	56,32	15,87
(HUSSEN, 2014)	Óxido	TiO ₂ /OM	0,01	-	0,04	12,00%	13,30
(KRISHNA SABAREESH et al., 2012)	Óxido	TiO ₂ /OM	0,01	-	0,04	17,00	11,00
(SUBRAMANI; MOHAN; M, 2013)	Óxido	TiO ₂ /OM	-	-	0,06	20,00	15,40
(ABDUR RAZZAQ; AHAMED, 2020)	Óxido	TiO ₂ /OM	-	-	0,4	19,50	9,40
(KUMAR; SRIDHAR; NARASIMHA, 2013)	Óxido	ZnO/OM	-	-	0,8	45,00	7,48
(SENDIL KUMAR; ELANSEZHIAN, 2014)	Óxido	ZnO/PAG	0,5	-	3%		

Legenda: TiO₂: Dióxido de titânio; ZnO: Óxido de zinco.

APENDICÊ II

TERMOPARES: Medição da temperatura superficial do compressor.

Na medição da temperatura superficial do compressor, sensores secundários de temperatura, como dentro dos tanques do condensador e evaporador, foram utilizados termopares, dos quais foram utilizados 4 termopares tipo t cobre-constatam. Após a construção dos termopares por meio da junção em ambiente com nitrogênio para evitar oxidação, foi necessário analisar o correto funcionamento de cada um e baseando-se em um termômetro padrão de mercúrio foi feito a calibração.

A calibração dos termopares foi realizada utilizando um banho termostático modelo MQBMP 01, da Microquímica Equipamentos Ltda., com precisão de 0,1 °C e estabilidade térmica de 0,01 °C. Como referência, empregou-se um termômetro padrão de mercúrio, com resolução de 0,1 °C e faixa de medição de -10 °C a 50 °C. O sistema de aquisição de dados utilizado foi composto por um chassi NI cDAQ-9178, acoplado a um módulo de aquisição de temperatura NI-9213

O procedimento de calibração seguiu as diretrizes estabelecidas pelas normas ANSI MC96 e ASTM E320, que determinam um limite máximo de erro de ± 1 °C para termopares do tipo T. As curvas de calibração desenvolvidas, aplicando um ajuste linear utilizadas estão sendo apresentadas na Tabela B.1 a seguir para os termopares.

Tabela B.1 – Curvas de calibração dos sensores termopar tipo t para medição da temperatura superficial do compressor.

Sensor de temperatura	Curva de calibração	R ²
T _{sup}	$T_{sup} [^{\circ}C] = 0,99 \cdot T_t [^{\circ}C] + 0,421$	0,999
T _{cart}	$T_{cart} [^{\circ}C] = 0,998 \cdot T_t [^{\circ}C] + 0,458$	0,999
T _{tanq-Cond}	$T_{tanq-Cond} [^{\circ}C] = 0,998 \cdot T_t [^{\circ}C] + 0,526$	0,999
T _{tanq-Evap}	$T_{tanq-Evap} [^{\circ}C] = 0,998 \cdot T_t [^{\circ}C] + 0,573$	0,999

Legenda: T_{sup}=Temperatura superficial; T_{cart}=Temperatura do cárter; T_{tanq-Cond}=Temperatura do tanque do condensador; T_{tanq-Evap}= Temperatura do tanque do evaporador.

O mesmo método foi adotado para as curvas de calibração dos sensores de temperatura RTD – PT100, assim como para os sensores de pressão piezo resistivos e com os sensores de vazão que estão sendo apresentados nas tabelas a seguir.

Tabela B.2 – Curvas de calibração dos sensores de temperatura RTD- PT 100 localizados no circuito de fluido refrigerante.

Sensor de temperatura	Curva de calibração	R²
T_{suc-comp}	$T_{\text{sup}}[\text{°C}] = 0,997 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,089$	0,999
T_{desc-comp}	$T_{\text{cart}}[\text{°C}] = 0,99 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,117$	0,999
T_{Cond-sai}	$T_{\text{tanq-Evap}}[\text{°C}] = 0,998 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,133$	0,999
T_{Val-Ent}	$T_{\text{tanq-Cond}}[\text{°C}] = 0,987 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,045$	0,999

Legenda: **T_{suc-comp}**=Temperatura sucção do compressor; **T_{desc-comp}**=Temperatura de descarga do compressor; **T_{Cond-sai}**=Temperatura saída do condensador; **T_{Val-Ent}**= Temperatura de entrada da válvula de expansão.

Tabela B.3 – Curvas de calibração dos sensores de temperatura RTD- PT 100 localizados no circuito de fluido refrigerante.

Sensor de temperatura	Curva de calibração	R²
T_{tanq-Ent-Cond}	$T_{\text{tanq-Ent-Cond}}[\text{°C}] = 0,983 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,009$	0,999
T_{tanq-Sai-Cond}	$T_{\text{tanq-Sai-Cond}}[\text{°C}] = 0,98 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,145$	0,999
T_{tanq-Ent-Evap}	$T_{\text{tanq-Ent-Cond}}[\text{°C}] = 0,979 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,009$	0,999
T_{tanq-Sai-Evap}	$T_{\text{tanq-Sai-Cond}}[\text{°C}] = 0,978 \cdot T_{\text{RTD}}[\text{°C}] + 0,065$	0,999

Legenda: **T_{tanq-Ent-Cond}**=Temperatura de entrada no tanque do condensador; **T_{tanq-Sai-Cond}**=Temperatura de saída no tanque do condensador; **T_{tanq-Ent-Evap}**=Temperatura de entrada no tanque do Evaporador; **T_{tanq-Sai-Evap}**=Temperatura de saída no tanque do Evaporador.

Tabela B.4 – Curvas de calibração dos sensores de pressão piezo resistivos.

Sensor de temperatura	Curva de calibração	R²
P_{sai-Evap}	$P_{\text{des-Comp}}[\text{bar}] = 2,5453 \cdot I[\text{mA}] - 2,1683$	0,998
P_{des-Comp}	$P_{\text{sai-Evap}}[\text{bar}] = 8,4227 \cdot I[\text{mA}] - 3,9854$	0,997

Legenda: **P_{sai-Evap}**=Pressão de saída do evaporador; **P_{des-Comp}**=Pressão de descarga do compressor.

Tabela B.5 – Curvas de calibração dos medidores de vazão tipo coriolis e de fluxo de água.

Sensor de temperatura	Curva de calibração	R²

\dot{m}	$\dot{m}[\text{g/s}] = 12488 \cdot I[\text{mA}] + 49,75$	0,999
\dot{m}_{EA-H_2O}	$\dot{m}_{EA-H_2O}[\text{L/min}] = 0,1197 \cdot I[\text{mA}] + 0,8742$	0,997

Legenda: $P_{\text{sai-Evap}}$ =Pressão de saída do evaporador; $P_{\text{des-Comp}}$ =Pressão de descarga do compressor.