

UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA - UFU
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA - FEMEC
LABORATÓRIO DE ENERGIA, SISTEMAS TÉRMICOS E NANOTECNOLOGIA -
LESTnano

ÍTALO FRANCO GUILHERME

ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DA VISCOSIDADE DINÂMICA PARA
DISTINTOS NANOFLUIDOS A BASE DE ÓLEO

Uberlândia, MG
JUNHO DE 2019.

ÍTALO FRANCO GUILHERME

**ANÁLISE DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA E DA VISCOSIDADE DINÂMICA PARA
DISTINTOS NANOFLUIDOS A BASE DE ÓLEO**

Projeto de Fim de Curso de graduação,
apresentado Universidade Federal de
Uberlândia – UFU, como requisito para a
conclusão do curso de Engenharia
Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone
Bandarra Filho

Uberlândia, MG
JUNHO DE 2019.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao meu orientador Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, pela recepção no laboratório LESTnano-UFU, além de abrir os caminhos e disponibilizar os recursos necessários para a realização desse projeto.

A equipe de pesquisadores do laboratório LESTnano-UFU, em especial Abdul Orlando Cárdenas Gómez, pela cooperação e paciência.

Agradeço também a meus familiares por me ensinarem o valor da educação, pelo carinho e exemplo que dão até hoje. Além do apoio durante minha trajetória acadêmica.

RESUMO

GUILHERME, Ítalo Franco. **Análise da condutividade térmica e da viscosidade dinâmica para distintos nanofluidos a base de óleo**. 2019. 41 p. Projeto de Fim de Curso (Graduação) – Engenharia mecânica. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

Neste trabalho foi realizada a medição e caracterização da condutividade térmica e da viscosidade dinâmica para variadas porcentagens de concentrações de nanopartículas dispersas em óleo. Foram utilizadas quatro variedades de nanopartículas com concentrações mássicas distintas dispersas no mesmo fluido base, sendo essas: TiO_2 (0,1; 0,5 e 1%), ZrO_2 (0,1; 0,5 e 1%), Ag (0,06; 0,12 e 0,59%) e MWCNT (0,01; 0,02 e 0,12%). O estudo foi efetuado com o objetivo de analisar a variação das propriedades termodinâmicas do óleo térmico (*LUBRAX UTILITE* grau ISO 100) sem a dispersão das nanopartículas comparado com a dos nanofluidos. Para o estudo da condutividade térmica a temperatura de teste variou de 10-60°C com intervalo de 10°C, já para a aquisição dos dados de viscosidade dinâmica as temperaturas testadas foram de 20, 40, 60 e 80°C. Com relação aos resultados foi possível notar incrementos significativos na condutividade térmica dos nanofluidos de MWCNT, atingindo aproximadamente 18%. Além da viscosidade dinâmica dos nanofluidos, comparada à do óleo puro, ter se mantido bem próximas para a maioria das condições de teste, sendo o maior incremento de 1,7% para o nanofluido de MWCNT em sua máxima concentração.

Palavras-chave: Condutividade térmica. Viscosidade dinâmica. Propriedades termodinâmicas. Nanofluidos. Óleo.

ABSTRACT

GUILHERME, Ítalo Franco. **Analysis of thermal conductivity and dynamic viscosity for different oil-based nanofluids**. 2019. 41 p. End-of-Course Project (Undergraduate) - Mechanical Engineering. Universidade Federal de Uberlândia, 2019.

In this work the measurement and characterization of the thermal conductivity and the dynamic viscosity were performed for various percentages of nanoparticle concentrations dispersed in oil. Four varieties of nanoparticles with different mass concentrations dispersed in the same base fluid were used, these being: TiO₂ (0,1; 0,5 and 1%), ZrO₂ (0,1; 0,5 and 1%), Ag (0,06; 0,12 and 0,59%) and MWCNT (0,01; 0,02 and 0,12%). The study was carried out with the objective of analyzing the variation of the thermodynamic properties of the thermal oil (LUBRAX UTILITE grade ISO 100) without the dispersion of the nanoparticles compared to the nanofluids. For the thermal conductivity study the test temperature has ranged from 10 at 10°C in the interval of 10-60°C, while for the acquisition of the dynamic viscosity data, the temperatures tested were 20, 40, 60 and 80°C. Regarding the results it was possible to note significant increases in the thermal conductivity of MWCNT nanofluids, reaching approximately 18%. In addition to the dynamic viscosity of the nanofluids, compared to pure oil, it has remained very close to most test conditions, with the largest increase of 1,7% for MWCNT nanofluid at its maximum concentration.

Keywords: Thermal conductivity. Dynamic viscosity. Thermodynamic properties. Nanofluids. Oil.

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Amostras dos nanofluidos de TiO_2/OT , nas concentrações mássicas de 0,1; 0,5 e 1,0%, da esquerda para a direita.	22
Figura 3.2 - Amostras dos nanofluidos de ZrO_2/OT , nas concentrações mássicas de 0,1; 0,5 e 1,0%, da esquerda para a direita.	23
Figura 3.3 - Amostras dos nanofluidos de Ag/OT , nas concentrações mássicas de 0,06; 0,12 e 0,59%, da esquerda para a direita.....	23
Figura 3.4 - Amostras dos nanofluidos de $MWCNT/OT$, nas concentrações mássicas de 0,01; 0,02; 0,19 e 0,19% após um mês, da esquerda para a direita.	23
Figura 3.5 - Condutímetro Linseis THB-1 e vista aproximada do sensor THB.	24
Figura 3.6 - Montagem experimental para a medição da condutividade térmica dos nanofluidos.	25
Figura 3.7 - Aparato experimental para medição de condutividade térmica de nanofluidos.	26
Figura 3.8 - Viscosímetro Stabinger SVM 3000/G2 utilizado para as medições de viscosidade dinâmica dos nanofluidos.	27
Figura 4.1 - Condutividade relativa dos nanofluidos estudados em função da temperatura.	29
Figura 4.2 - Condutividade relativa dos nanofluidos de Ag/OT do presente experimento comparados aos dados obtidos por Aberoumand et al. (2016) em função da concentração mássica, a 40, 50 e 60°C.	30
Figura 4.3 - Condutividade térmica dos nanofluidos do presente trabalho em função da concentração mássica, a 40°C.	31
Figura 4.4 - Viscosidade relativa dos nanofluidos de Ag/OT e $MWCNT/OT$ testados no presente trabalho comparados aos dados obtidos por Aberoumand et al. (2016) e Ilyas et al. (2017) em função da temperatura.	32
Figura 4.5 - Viscosidade dinâmica dos nanofluidos de Ag/OT e $MWCNT/OT$ estudados no presente trabalho comparados aos dados obtidos por Aberoumand et al. (2016) e Ilyas et al. (2017) em função da temperatura.	33
Figura 4.6 - Viscosidade relativa dos nanofluidos do presente trabalho em função da concentração mássica, a 40°C.	34

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Tabela de resumo dos trabalhos encontrados na literatura sobre a condutividade térmica de nanofluidos com base em óleo.	12
Tabela 2.2 - Tabela de resumo dos trabalhos encontrados na literatura sobre a viscosidade dinâmica de nanofluidos com base em óleo.	18
Tabela 3.1 - Propriedades do óleo térmico.	20
Tabela 3.2 - Propriedades das nanopartículas de MWCNT e Ag utilizadas.	21
Tabela 3.3 - Concentração mássica nanofluidos e diâmetro das nanopartículas.	22

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras latinas

d	Diâmetro médio da nanopartícula [nm]
k	Condutividade térmica [W/mK]
l	Comprimento da nanopartícula [μm]
R_k	Resistência térmica interfacial [m^2K/W]
T	Temperatura [$^{\circ}C$]
V	Volume [m^3]
wt	Concentração mássica

Letras gregas

μ	Viscosidade dinâmica [kg/ms]
ϕ	Concentração volumétrica
ρ	Massa específica [kg/m^3]

Abreviações

CNT	Nanotubos de carbono
ISSO	International Organization for Standardization
LEST-NANO	Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia
MWCNT	Nanotubo de carbono de parede múltipla
OE	Óleo de engrenagem
OI	Óleo isolante
OM	Óleo de motor
OS	Óleo sintético
OT	Óleo térmico
UFU	Universidade Federal de Uberlândia

Subscritos

<i>nf</i>	Nanofluido
<i>np</i>	Nanopartícula
<i>fb</i>	Fluido base

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Objetivos	2
1.2	Estrutura do texto	2
2	REFERENCIAL TEÓRICO	4
2.1	Condutividade térmica	4
2.2	Viscosidade dinâmica	5
2.3	Nanofluidos	5
2.4	Propriedades térmicas de nanofluidos com base em óleo	6
2.4.1	Condutividade térmica	7
2.4.2	Viscosidade dinâmica	14
3	METODOLOGIA	20
3.1	Síntese dos nanofluidos	20
3.2	Propriedades termodinâmicas	24
3.2.1	Condutividade térmica	24
3.2.2	Viscosidade dinâmica	26
4	ANÁLISE DE RESULTADOS	28
4.1	Condutividade térmica	28
4.2	Viscosidade dinâmica	32
5	CONCLUSÕES	35
	REFERÊNCIAS	37

1 INTRODUÇÃO

Um dos ramos de pesquisa que se difunde cada vez mais na área de sistemas térmicos é a preocupação pela intensificação da transferência de calor nos processos térmicos por meio do desenvolvimento de fluidos que incrementem a transferência de calor sem que haja um acréscimo desproporcional no consumo de energia por bombeamento. Visto que, um dos principais limitantes para o desenvolvimento de sistemas de troca de calor mais eficientes, com dimensões reduzidas, além de menor custo construtivo e operacional, é o restrito desempenho térmico dos fluidos de arrefecimento convencionais.

Desta forma, parte dessas pesquisas estão sendo direcionadas à dispersão de nanopartículas em fluidos convencionais de arrefecimento, conhecidos como nanofluidos. O aumento exponencial do número de publicações nesse campo de pesquisa mostra que o tema nanofluido tem atraído muita atenção nos últimos anos (SAEEDINIA et al, 2012).

As propriedades termo-físicas de um nanofluido, como a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica, influenciam de maneira significativa no seu desempenho termo-hidráulico. Maior condutividade térmica significa maior desempenho de transferência de calor, enquanto menor viscosidade resulta em menor poder de bombeamento e redução de pressão (ASADI et al, 2018). Assim, há um aumento recente no número de publicações que estudam essas propriedades nos diferentes tipos de nanofluidos, a fim de obter resultados confiáveis que possam ser aplicados no processo industriais.

Uma vez que uma das consequências imediatas da dispersão de nanopartículas em um fluido base é a intensificação das propriedades térmicas. Como os resultados encontrados por Ilyas et al. (2017), com nanotubos MWCNTs/óleo térmico e Asadi et al. (2018), usando um híbrido Al_2O_3 -MWCNTs/óleo térmico, ambos os estudos alcançaram aumentos significativos na condutividade térmica de aproximadamente 29% e 45%, respectivamente. Dessa forma, o presente trabalho tem o intuito de avaliar as propriedades térmicas de nanofluidos com base em óleo para compará-los com o fluido base e interpretar as relevâncias dos possíveis incrementos tanto na condutividade térmica quanto na viscosidade dinâmica desses fluidos térmicos.

1.1 Objetivos

O objetivo dessa pesquisa é avaliar as propriedades térmicas de nanofluidos de TiO_2 , ZrO_2 , Ag e MWCNT com base em óleo e, desta forma, determinar experimentalmente a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica. O óleo utilizado foi disponibilizado pela PETROBRAS, caracterizado como óleo térmico, nomeado *LUBRAX UTILE OT*, sendo seu grau de viscosidade *ISO 100*.

Assim, foram determinadas a seguir as etapas a serem realizadas para executar e completar o presente trabalho:

- Realizar uma revisão geral do estado da arte sobre nanofluidos de óleo, especificamente no estudo das propriedades térmicas;
- Determinar a viscosidade dinâmica do óleo sem dispersão de nanopartículas e de cada nanofluido com suas diferentes concentrações;
- Caracterizar a condutividade térmica do óleo sem dispersão de nanopartículas e dos nanofluidos com suas diferentes concentrações;
- Analisar e comparar os resultados experimentais obtidos de viscosidade dinâmica e condutividade térmica para as amostras de nanofluidos em relação ao fluido base, óleo puro, e outros trabalhos experimentais encontrados na literatura.

1.2 Estrutura do texto

O texto está organizado de tal forma que descreve todas as etapas realizadas para alcançar o objetivo principal proposto. Assim, o trabalho apresenta cinco seções, cada uma subdividida em tópicos que especificam detalhadamente características da execução do projeto.

A segunda seção, intitulada referencial teórico, apresenta o levantamento bibliográfico realizado que aborda de forma introdutória alguns conceitos básicos de termodinâmica e caracterização das propriedades térmicas de condutividade térmica e viscosidade dinâmica, além de conceituar os nanofluidos. Ademais, o foco principal foi a revisão de maneira cronológica dos principais trabalhos relacionados à nanofluidos com base em óleo que apresentaram valores experimentais de condutividade e viscosidade.

A terceira seção relata as características referentes ao equipamento experimental, assim como características do fluido base e das nanopartículas utilizadas para a formação dos nanofluidos estudados. Logo após, a quarta seção refere-se à análise dos resultados obtidos experimentalmente para nanofluidos de óleo. Inicialmente são apresentados resultados das medições de condutividade térmica e viscosidade dinâmica e depois é efetuada uma análise baseada na comparação entre as propriedades obtidas para os nanofluidos com aquelas obtidas para o fluido base (óleo), a fim de analisar os incrementos obtidos com a dispersão das nanopartículas. Posteriormente, é apresentada uma comparação dos resultados das diferentes pesquisas encontradas na literatura para nanofluidos de óleo com os resultados do presente trabalho.

Para finalizar, na quinta seção são realizadas as conclusões finais deste trabalho.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

Esta seção informará conceitos básicos para o desenvolvimento do projeto e apresentará estudos prévios na área e seus resultados como parâmetro de comparação. Inicialmente, serão conceituadas as propriedades termodinâmicas abordadas no trabalho, que são a condutividade térmica e a viscosidade dinâmica. Em seguida, será realizada uma introdução aos nanofluidos, sendo explicada sua definição e sua finalidade na área de transferência de calor. Por fim, será apresentado um levantamento bibliográfico sobre essas propriedades termodinâmicas em nanofluidos de óleo com variadas nanopartículas dispersas.

2.1 Condutividade Térmica

De acordo com Çengel e Ghajar (2012), condutividade térmica k é a medida da capacidade de um material conduzir calor. Assim, a condutividade térmica de um material pode ser definida como a taxa de transferência de calor por meio de uma unidade de comprimento de um material por unidade de área por unidade de diferença de temperatura. Um alto valor de condutividade indica que o material é bom condutor de calor, enquanto um valor baixo indica que o material é mal condutor de calor ou isolante.

Ainda de acordo com Çengel e Ghajar (2012), em geral, a condutividade térmica de uma substância é maior na fase sólida, intermediária na fase líquida e menor na gasosa, e a condutividade térmica da maioria dos líquidos decresce com o aumento da temperatura. E, assim como nos gases, a condutividade térmica dos líquidos decresce com o aumento da massa molar.

Já nos sólidos, a condução de calor ocorre devido a dois efeitos: ondas de vibração de rede motivadas pelos movimentos vibracionais das moléculas arranjadas em posições relativamente fixas, de forma periódica, constituindo redes; e energia transportada por meio do movimento livre dos elétrons presentes nos sólidos. A condutividade térmica de sólidos é obtida pela soma do componente de rede e do componente eletrônico. A condutividade térmica relativamente alta de metais puros se deve principalmente ao componente eletrônico. O componente da rede da condutividade térmica depende fortemente de como as moléculas são

arranjadas. Por exemplo, o diamante, que é um sólido cristalino altamente ordenado, tem o maior valor conhecido de condutividade térmica em temperatura ambiente.

2.2 Viscosidade Dinâmica

Quando um fluido sofre uma tensão de cisalhamento, ele começa a mover-se com uma taxa de deformação inversamente proporcional à viscosidade (μ). Estas tensões de cisalhamento originam-se das forças de atração entre moléculas relativamente próximas. A viscosidade é uma importante propriedade no escoamento dos nanofluidos, devido ao fato que parâmetros como a queda de pressão, potência de bombeamento, tipo de escoamento e transferência de calor por convecção dependem diretamente desta propriedade.

Çengel e Ghajar (2012) definem viscosidade como sendo a propriedade do fluido que quantifica a resistência interna ao escoamento, que seria a força de atrito que se desenvolve entre duas camadas de fluido que se movem uma em relação à outra fazendo com que a camada mais lenta tente frear a mais rápida.

2.3 Nanofluidos

Com o objetivo de se obter sistemas de refrigeração mais eficientes é necessário intensificar o processo de transferência de calor, o que está diretamente relacionado ao aumento no coeficiente de transferência de calor e na condutividade térmica.

Desta forma, com o advento da nanotecnologia e a eventual chance de sintetizar materiais na escala manométrica, possibilitou-se o surgimento de novas iniciativas que buscavam a intensificação das propriedades térmicas dos fluidos de trabalho como a relatada por Masuda et al. (1993). Assim, partículas sólidas ultrafinas de Al_2O_3 , SiO_2 e TiO_2 , foram dispersas num fluido base, por intermédio da aplicação da técnica de repulsão eletrostática, apresentando um aumento da condutividade na dispersão proporcional à concentração. Estas partículas ultrafinas, com uma dimensões compreendidas entre 1 e 100 nm ($1nm = 10^{-9} m$), que possuem propriedades físicas e químicas únicas quando comparadas com as propriedades de partículas grandes (escala micrométrica ou maiores) dos mesmos materiais, que ao serem dispersas em fluidos convencionais de arrefecimento como

água, óleos ou etileno glicol deu origem a um conceito inovador idealizado por Choi (1995), denominado de “Nanofluidos”.

Os nanofluidos têm atraído grande interesse da comunidade científica, principalmente, pela potencialização de suas propriedades térmicas. Após Choi (1995) ter proposto os nanofluidos como uma nova geração de fluidos de arrefecimento que superassem os desafios de desenvolver sistemas de troca térmica energeticamente eficiente, muitas pesquisas tem se dedicado ao tema, tanto experimentais como teóricas. Por exemplo, experiências realizadas por Eastman et al. (2001) e Choi et al. (2001) mostraram que a condutividade térmica da dispersão de nanopartículas de Cu em etileno glicol e de nanotubos de carbono em óleo, ambas com uma fração de volume de menos de 1%, aumentou 40% e 150%, respectivamente, em comparação com o fluidos base.

As vantagens que apresentam as dispersões com nanopartículas, em comparação com dispersões convencionais de partículas de dimensões milimétricas ou micrométricas, é que o uso de nanopartículas, não só incrementa as propriedades de transferência de calor do líquido ou fluido base, mas também aumenta a estabilidade da dispersão, reduz a sedimentação e a obstrução dos canais de fluxo o que reduz a queda de pressão Wang e Mujumdar (2007).

Todas as nanopartículas sólidas com alta condutividade térmica podem ser utilizadas como aditivos para nanofluidos de acordo com Li et al. (2009). As nanopartículas utilizadas para preparar nanofluidos mais frequentemente relatadas na literatura são as partículas metálicas, partículas não metálicas e nanotubos de carbono, sendo comumente utilizados com fluidos base a água, óleo de motor, acetona, deceno e etileno glicol.

2.4 Propriedades térmicas de nanofluidos com base em óleo

De acordo com Wei et al. (2017) em comparação com a transferência de calor média convencional de água e vapor de água, o óleo térmico apresenta algumas propriedades vantajosas, tais como alta eficiência de transferência de calor, mais fácil ajuste ao controle de temperatura e nenhuma corrosão ao equipamento, o que propicia menor investimento. Como um meio de transferência de calor promissor e energeticamente eficiente, tem sido amplamente utilizado no campo do coletor

solar, sistema de recuperação de calor e onde o uso de água não é adequado, especialmente quando se deseja baixas pressões e altas temperaturas. Conseqüentemente a melhoria das propriedades termo físicas do óleo térmico pode ser útil para aumentar o desempenho nestas aplicações.

Mas a maior desvantagem é a sua inércia térmica e aquecimento mais lento que pode inviabilizar seu uso de acordo com as exigências da indústria moderna. Se pudermos melhorar a sua condutividade térmica, a velocidade de aquecimento vai aumentar, e o tempo de resfriamento vai reduzir, além disso, a quantidade usada de óleo será reduzida, assim como o volume do trocador de calor.

2.4.1 Condutividade Térmica

No intuito de prever o comportamento da condutividade térmica de nanopartículas, é comumente utilizado a Teoria do Meio Efetivo (EMT), descrita pelo modelo de Maxwell (1873). Além, do modelo proposto por Xue (2006).

Em um dos primeiros estudos a respeito da condutividade térmica em nanofluidos de óleo, Liu et al. (2005) fizeram considerações a respeito do crescimento da condutividade térmica de nanofluidos de nanotubos de carbono de parede múltipla com fluido base de óleo sintético e etileno glicol, com o acréscimo na concentração volumétrica de nanopartículas. Para a concentração volumétrica de 1% no CNT/etileno glicol, houve o máximo aumento de 12,4% no valor de condutividade térmica, enquanto para a suspensão de CNT/óleo sintético, o aumento máximo no valor de condutividade térmica foi de 30% na concentração volumétrica de 2%. O maior aumento de condutividade térmica encontrado excedeu 200% para 0,34% de concentração volumétrica, publicado por Yang et al. (2006), na análise de nanofluidos de nanotubo de carbono em óleo, com concentração volumétrica variando de 0,04 até 0,34% na temperatura de 25°C.

Mais tarde Botha et al. (2011) descobriram experimentalmente que a condutividade térmica do nanofluido de sílica/óleo isolante cresceu com o aumento da concentração de nanopartículas de sílica. O maior aumento de condutividade térmica foi obtido quando nanopartículas de prata foram dispersas na sílica. Para a concentração mássica de 0,07% de sílica e 0,6% de prata, o incremento de condutividade térmica alcançou 15%. O aumento na fração volumétrica de nanopartículas de prata causou o aumento da condutividade térmica no nanofluido

híbrido. No mesmo ano, Kole e Dey (2011) estudaram o incremento de condutividade térmica nos nanofluidos de CuO/óleo de engrenagem e analisaram os fatores que influenciam essa condutividade térmica como temperatura e fração volumétrica de nanopartículas. As medições foram efetuadas no intervalo de 5 a 80°C. A análise experimental mostrou crescimento de 10,4% na condutividade térmica dos nanofluidos com fração volumétrica de CuO de 2,5% em temperatura ambiente, e incremento de 11,9% a 80°C.

No ano seguinte Saeedinia et al. (2012) investigaram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos estáveis de CuO com base em óleo, com o intervalo de fração mássica de partícula de 0,2-2% em diferentes temperaturas. O experimento apresentou 6,2% de incremento na condutividade térmica do nanofluido com fração mássica de nanopartícula de 2%, com relação ao óleo puro. Assim como Fakoor Pakdaman et al. (2012), que estudaram nanofluidos de MWCNT/óleo isolante nas concentrações mássicas de 0,1%, 0,2% e 0,4% e observaram um incremento de 15% na condutividade térmica em 70°C. Além de Wang et al. (2012), que investigaram a condutividade térmica de nanofluidos de grafite em óleo. Os testes apresentaram uma forte dependência da fração volumétrica de grafite no aumento da condutividade térmica. Porém, foi observado pouca relação com a temperatura. A adição de apenas 1,36% de grafite no óleo resultou no incremento máximo de 36% na condutividade térmica. Além de Colangelo et al. (2012), que usaram óleo térmico com partículas de CuO, Al₂O₃, ZnO e Cu, e observaram que, para as mesmas condições, o aumento da condutividade térmica com a adição das nanopartículas foi mais expressivo nos nanofluidos de óleo do que nos nanofluidos de água desmineralizada.

Em outra publicação Kole e Dey (2013) estudaram a condutividade térmica e a viscosidade de nanofluidos de Cu/óleo de engrenagem. Eles observaram 24% de crescimento na condutividade térmica e aproximadamente 71% de incremento na viscosidade para a concentração volumétrica de 2%. No mesmo ano Etefaghi et al. (2013) publicaram os resultados dos seus experimentos com nanofluidos de nanotubos de carbono de parede múltipla em óleo de motor para analisar condutividade térmica e viscosidade. Eles reportaram um incremento de 22,7% na condutividade térmica para a concentração mássica de 0,5%. Contudo, deve ser considerado o fato que o aumento na concentração de nano-aditivos

causou redução nas propriedades lubrificantes do óleo devido à aglomeração e precipitação de nanotubos.

Kumar et al. (2016) foram responsáveis por um trabalho experimental usando Cu-Zn 0,1-0,5 % em diferentes tipos de fluidos base: óleo vegetal, óleo de parafina e óleo SAE para estudar a condutividade térmica e várias outras propriedades reológicas. Para todas as amostras a melhor estabilidade foi observada para aproximadamente 72 horas. A condutividade térmica apresentou aumento para os três fluidos base. Porém, a condutividade térmica efetiva no nanofluido de óleo vegetal (0,162 W/mK) foi a maior quando comparado ao óleo de parafina (0,136 W/mK) e o óleo SAE (0,136 W/mK). Seguido por Li et al. (2016), que fizeram estudos sobre as propriedades termo físicas de nanofluidos de SiC com base em óleo térmico, eles observaram que a condutividade térmica dos nanofluidos cresceu com a fração volumétrica, e o maior aumento de condutividade térmica encontrado foi de 7,36% para 0,8% de concentração volumétrica. E Aberoumand et al. (2016), que conduziram um estudo a respeito da condutividade térmica de nanofluido de WO_3 -Ag/óleo isolante. Foram consideradas três frações de massa nesse estudo (1%, 2% e 4%). E um intervalo de temperatura entre 40 e 100°C. Os resultados apresentaram aproximadamente 41% de incremento na condutividade térmica em comparação com o fluido base na temperatura de 100°C.

No ano seguinte Wei et al. (2017) realizaram estudos experimentais para analisar a estabilidade e condutividade térmica de nanofluidos de TiO_2 com base em óleo térmico. Os resultados apresentaram claramente que a condutividade térmica dos nanofluidos de TiO_2 em óleo térmico aumentaram com a fração volumétrica. Além disso, a condutividade térmica dos nanofluidos de TiO_2 em cada intervalo de concentração foi maior que a do fluido base. Contudo, o incremento da condutividade térmica dos nanofluidos apresentou uma correlação linear com o aumento da fração volumétrica de nanopartículas.

Em estudo semelhante Wei et al. (2017), avaliaram as propriedades térmicas de óleo térmico com a dispersão de nanopartículas híbridas (SiC - TiO_2). A condutividade térmica o óleo térmico puro decresceu com o aumento de temperatura, porém no caso do nanofluido híbrido (SiC - TiO_2 /óleo térmico) a condutividade térmica cresceu com o aumento de temperatura. Além disso, o nanofluido híbrido apresentou condutividade térmica mais elevada que o nanofluido

simples (SiC/óleo térmico ou TiO₂/óleo térmico). Houve uma relação linear entre a concentração volumétrica e a taxa de crescimento da condutividade térmica.

Em outra publicação Aberoumand et al. (2017) investigaram experimentalmente a condutividade térmica do nanofluido de Cu/óleo de motor para avaliarem o efeito da concentração e da temperatura na condutividade térmica do nanofluido. O intervalo de concentrações de nanopartículas foi de 0,2%, 0,5% e 1% em massa. Os resultados revelaram um incremento de 49% na condutividade térmica para o nanofluido com 1% em concentração mássica de CuO comparado ao fluido base.

Foi estudado os efeitos na condutividade térmica da dispersão de nanopartículas de Al₂O₃ funcionalizadas em óleo térmico por Ilyas et al. (2017), variando a concentração mássica dos sólidos entre 0,5-3%. Desta maneira, foi observada a redução da condutividade com o aumento da temperatura para o óleo puro, e o crescimento da condutividade com o aumento da temperatura para o nanofluido. Além disso, o aumento da concentração de nanopartículas gerou incremento na condutividade térmica, chegando ao máximo incremento de aproximadamente 15% em comparação ao óleo puro para a concentração mássica de 3%.

Em outro trabalho publicado pelo mesmo autor, o máximo incremento encontrado por Ilyas et al. (2017) foi de 28,7% para nanofluidos de MWCNTs/óleo térmico com 0,1% de concentração mássica de nanopartículas. Com os resultados, eles concluíram que a densidade efetiva, a viscosidade efetiva e a condutividade térmica efetiva crescem junto da concentração de nanopartículas. Seguindo a linha de estudo com nanotubos, porém agora com a adição de Al₂O₃, Asadi et al., (2018), analisaram as variações da condutividade térmica de nanofluido híbrido (Al₂O₃-MWCNTs/óleo térmico) com mudanças na temperatura e concentração. Para esse tipo de nanofluido foi obtido uma melhora de aproximadamente 45% na condutividade térmica.

Mais recentemente, Naddaf e Heri (2018) estudaram experimentalmente a condutividade térmica de nanofluidos de nano plaquetas de grafite e nanotubos de carbono, ambos com base em óleo diesel. A condutividade térmica do óleo puro, com o aumento da temperatura, diminuiu com uma ligeira inclinação. Mas em todos os nanofluidos sintetizados, com o aumento da temperatura, o coeficiente de condutividade térmica também cresceu. Além disso, a condutividade térmica dos

nanofluidos aumentou devido à maior condutividade térmica das partículas sólidas, conseqüentemente, a condutividade térmica efetiva dos nanofluidos se aproximou da média da condutividade térmica de líquido e sólido. Outra análise feita pelos autores foi que, o aumento da concentração mássica significou mais partículas sólidas e movimento browniano mais acentuado. Logo, concluíram que em diferentes aplicações, o melhor desempenho de nanofluidos pode ser alcançado com boa dispersão de nanopartículas no fluido base e que agregações das nanopartículas resultam na degradação dos desempenhos dos nanofluidos.

Outro artigo revisto com relação à condutividade térmica de nanofluidos em óleo foi publicado por Asadi e Pourfattah (2019). Nesta publicação foram analisados os efeitos causados por duas nanopartículas distintas (ZnO e MgO), ambas em óleo de motor, para a mesma faixa de temperatura (15-55°C) e concentração volumétrica (0,125-1,5%). Foi observado crescimento na condutividade térmica com o aumento da temperatura e com incremento na concentração de nanopartículas, o ganho máximo encontrado para o nanofluido de ZnO foi de 28% enquanto o de MgO alcançou 32% a mais de condutividade térmica comparado ao óleo puro. Além disso, os autores propuseram uma nova correlação para prever esta propriedade termo física, e em comparação aos dados experimentais houve um desvio máximo menor que 1%.

Por fim a Tab. 2.1 apresenta um resumo dos trabalhos citados nesta seção a respeito da condutividade térmica de nanofluidos de óleo.

Tabela 2.1 - Tabela de resumo dos trabalhos encontrados na literatura sobre a condutividade térmica de nanofluidos com base em óleo.

Autor	Nanofluido	Conc.	Temp.	Destques
Liu et al. (2005)	MWCNT/OS	0,5-2,5 ϕ %	10-80°C	<ul style="list-style-type: none"> • Na concentração volumétrica de 2% houve o aumento máximo na condutividade térmica de 30%.
Yang et al. (2006)	CNT/óleo	0,3-8 wt%	25°C	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento de condutividade maior que 200% para 0,34 vol.%.
Botha et al. (2011)	SiO ₂ -Ag /OI	0,07-4,4 wt% SiO ₂ e 0,07-1,4 wt% SiO ₂ / 0,1-0,6 wt% Ag	–	<ul style="list-style-type: none"> • Para concentração mássica de 0,07% SiO₂ e 0,6% Ag, o incremento de condutividade térmica alcançou 15%; • O aumento na fração volumétrica de nanopartículas de prata causou o aumento da condutividade térmica no nanofluido híbrido.
Kole e Dey (2011)	CuO/OE	0,2-2 wt%	5-80°C	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento de 10,4% na condutividade térmica dos nanofluidos com fração volumétrica de 0,025 em temperatura ambiente; • Incremento de 11,9% a 80°C.
Saeedinia et al. (2012)	CuO/óleo	0,2-2 wt%	24-70°C	<ul style="list-style-type: none"> • Crescimento da condutividade com a adição de nanopartículas no fluido base e com o aumento na concentração de partículas; • O máximo aumento de condutividade térmica encontrado foi de 6,2% com fração mássica de nanopartícula de 2%.
Pakdaman et al. (2012)	MWCNT/OS	0,1, 0,2 e 0,4 wt%	40-70°C	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de 15% na condutividade térmica em 70°C para 0,4% de concentração mássica.
Wang et al. (2012)	Grafite/óleo	0,68-1,36 ϕ %	30-60°C	<ul style="list-style-type: none"> • Grande dependência da fração volumétrica de grafite no aumento da condutividade térmica; • A adição de 1,36 % de grafite no óleo resultou no incremento máximo de 36 % na condutividade térmica.
Colangelo et al. (2012)	CuO, Al ₂ O ₃ , ZnO e Cu/OD	0-3 ϕ %	20-60°C	<ul style="list-style-type: none"> • O aumento de condutividade térmica dos nanofluidos com óleo térmico foi maior que com água desmineralizada.
Kole e Dey (2013)	Cu/OE	0,11-2 ϕ %	10-80°C	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de 24% na condutividade térmica para a concentração volumétrica de 2%.
Ettefaghi et al. (2013)	MWCNT/OM	0,1; 0,2; 0,5 wt%	40-100°C	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de 22,7% na condutividade térmica para a concentração mássica de 0,5%.

Legenda: OE: Óleo de engrenagem; OS: Óleo sintético; OI: Óleo isolante; OM: Óleo de motor; OT: Óleo térmico; CNT: Nanotubos de carbono; MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.
Fonte: Elaborada pelo autor a partir dos resultados encontrados na literatura.

Tabela 2.1b - (Continuação) Tabela de resumo dos trabalhos encontrados na literatura sobre a condutividade térmica de nanofluidos com base em óleo.

Autor	Nanofluido	Conc.	Temp.	Destques
Kumar et al. (2016)	Cu-Zn/ óleo vegetal, óleo de parafina e óleo SAE	0,1-0,5 wt%	–	<ul style="list-style-type: none"> • Para todas as amostras a melhor estabilidade foi observada para aproximadamente 72 horas; • Condutividade apresentou aumento para os três fluidos base;
Li et al. (2016)	SiC/OD	0,2-0,8 ϕ %	20-50°C	<ul style="list-style-type: none"> • Maior aumento de condutividade térmica foi de 7,36% para 0,8% de concentração volumétrica.
Aberoumand et al. (2016)	WO ₃ -Ag/OI	1; 2 e 4 wt%	40-100°C	<ul style="list-style-type: none"> • 41% de incremento na condutividade na temperatura de 100°C.
Zou et al. (2017)	TiO ₂ /OD	0,1-1 ϕ %	17-43°C	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade aumentou com a fração volumétrica; • Condutividade térmica apresentou uma correlação linear com o aumento da fração volumétrica de nanopartículas.
Aberoumand et al. (2017)	Cu/OM	0,2; 0,5 e 1 wt%	40-100°C	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de 49% na condutividade térmica para concentração mássica de 1% comparado ao fluido base.
Wei et al. (2017)	SiC-TiO ₂ /OD	0-1 ϕ %	20-50°C	<ul style="list-style-type: none"> • Condutividade do óleo térmico puro decresceu com o aumento de temperatura; • Condutividade cresceu com o aumento de temperatura para os nanofluidos híbridos; • O nanofluido híbrido apresentou condutividade térmica mais elevada que o nanofluido simples; • Relação linear entre a concentração volumétrica e a taxa de crescimento da condutividade.
Ilyas et al. (2017)	MWCNT/OT	0-1 wt%	20-60°C	<ul style="list-style-type: none"> • 28,7% de incremento na condutividade para 0,1% de concentração mássica.
Asadi et al. (2018)	Al ₂ O ₃ -MWCNT/OT	0,125-1,5 ϕ %	25-50°C	<ul style="list-style-type: none"> • 45% de incremento na condutividade térmica.
Naddaf e Heri (2018)	Nano plaquetas de grafite, nanotubos de carbono/óleo diesel	0,05; 0,1; 0,2; 0,5 wt%	5-100°C	<ul style="list-style-type: none"> • Concluíram que o melhor desempenho de nanofluidos pode ser alcançado com boa dispersão de nanopartículas no fluido base; • Agregações de nanopartículas resultam na degradação dos desempenhos de nanofluidos.

Legenda: OE: Óleo de engrenagem; OS: Óleo sintético; OI: Óleo isolante; OM: Óleo de motor; OT: Óleo térmico; CNT: Nanotubos de carbono; MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

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

2.4.2 Viscosidade Dinâmica

Alguns dos modelos para a predição da viscosidade em dispersões sólido-líquido são usados como parâmetro de comparação para os resultados experimentais. A maioria destes modelos é baseada na teoria de Einstein (1906), que propôs um modelo hidrodinâmico baseado nas equações de Navier-Stokes, descrito pela Eq. (2.1).

$$\mu_{nf} = (1 + 2,5\phi)\mu_{fb} \quad (2.1)$$

Na qual, ϕ representa a concentração volumétrica, enquanto μ_{nf} e μ_{fb} a viscosidade do nanofluido e do fluido base, respectivamente.

Com relação à viscosidade dinâmica dos nanofluidos com fluido base em óleo, foi realizada uma revisão a respeito de estudos prévios que abrangem variadas dispersões de nanopartículas. A começar com Kole e Dey (2011), que examinaram nanofluidos de CuO/óleo de engrenagem. Eles analisaram o efeito das da concentração volumétrica de nanopartículas de CuO (0,5-2,5%) e da temperatura (10-80°C) nos nanofluidos. Nesse estudo, os resultados mostraram que a viscosidade dos nanofluidos com fração volumétrica de CuO de 2,5% aumentaram em aproximadamente três vezes comparado ao fluido base, enquanto houve um decréscimo significativo com o aumento da temperatura. Um comportamento não-Newtoniano de características de pseudoplásticas foi detectado nos nanofluidos contendo CuO com fração volumétrica maior que 0,5%.

No ano seguinte, Pakdaman et al. (2012), analisaram as características termo físicas do nanofluido de nanotubo de carbono de parede múltipla com base em óleo isolante nas concentrações mássicas de 0,1%, 0,2% e 0,4% e reportaram que a viscosidade do nanofluido com 0,4% de concentração mássica foi 67% maior do que a do fluido base em 40°C. Também analisaram a viscosidade Saeedinia et al. (2012), que examinaram a viscosidade de nanofluidos estáveis e CuO/óleo. Esse experimento foi realizado com diferentes frações mássicas de nanopartículas (0,2-2%) e diferentes temperaturas. Os resultados experimentais evidenciaram que a viscosidade dinâmica cresce significativamente com o aumento da concentração de nanopartículas. O maior incremento foi observado quando os nanofluidos estavam nas menores temperaturas. E em outro estudo utilizando cobre, Kole e Dey (2013)

trabalharam com nanofluidos de Cu/óleo de engrenagem. Eles prepararam esses nanofluidos com surfactante de ácido oleico, nas concentrações de nanopartículas de Cu entre 0,11-2%. Os resultados experimentais consideraram a influência da fração volumétrica de nanopartículas e o aumento da temperatura de 10 a 80°C. Nessa investigação, houve um incremento de viscosidade de aproximadamente 71% para uma concentração volumétrica de 2% de nanopartículas de cobre, com o nanofluido a 30°C.

Beheshti et al. (2014) investigaram a viscosidade dinâmica de nanofluidos de nanotubos em óleo de transformador e observaram o decremento de 0,9% nos nanofluidos com 0,01% de concentração mássica. Nesse trabalho, foi encontrado que para todas as concentrações mássicas entre 0,1% e 1% houve incremento na viscosidade dinâmica. O maior aumento foi observado na maior concentração mássica, de 1% e foi atribuído ao emaranhamento da estrutura dos nanotubos, que cria mais resistência entre diferentes camadas de óleo. Assim como analisado por Timofeeva, et al. (2009), que notaram que incrementos maiores na viscosidade são encontrados para nanofluidos contendo nanotubos se comparados a nanopartículas esféricas. Além de uma maior viscosidade também ser apresentada para nanopartículas com maiores razões de aspecto (relação comprimento-diâmetro da nanopartícula), quando comparadas nanopartículas de mesma morfologia.

Foi medido a viscosidade dos nanofluidos de Al₂O₃/óleo térmico por Colangelo et al. (2015), e os resultados mostraram que a viscosidade aumenta com o aumento da fração volumétrica e um comportamento não-Newtoniano acentuado nas altas frações volumétricas.

Em outro artigo envolvente nanofluidos com base em óleo, Aberoumand et al. (2016) publicaram seus dados experimentais de condutividade térmica e viscosidade de nanofluidos de Ag/óleo de transferência de calor. Foi observado um aumento de aproximadamente 40% e 27% na condutividade térmica e na viscosidade, respectivamente. Ademais, eles reportaram um comportamento não-Newtoniano dos nanofluidos testados.

Ainda no mesmo ano, Asadi et al. (2016) fizeram análises a respeito da viscosidade dinâmica dos nanofluidos híbridos de nanotubo de carbono de paredes múltiplas (MWNCT) com ZnO com base em óleo de motor. Os experimentos foram realizados em diferentes temperaturas variando de 5°C a 55°C e concentrações de nanopartículas variando de 0,125% a 1%. O efeito da temperatura e a concentração

de sólidos na viscosidade dinâmica do nanofluido foram investigados experimentalmente. Os resultados indicaram que o aumento da temperatura resultou na diminuição da viscosidade dinâmica do nanofluido em 85% enquanto a viscosidade dinâmica aumentou à medida que a concentração de sólidos aumentou, em aproximadamente 45%.

Outros estudos que envolveram a suspensão de nanopartículas híbridas de MWCNT em óleo de motor foram realizados por Dardan et al. (2016), Afrand et al. (2016) e Hemmat et al. (2017), em todos os casos foi observado que a viscosidade dinâmica dos nanofluidos cresceu com o aumento da concentração de nanopartículas e com a diminuição da temperatura. Os experimentos de viscosidade dinâmica dos nanofluidos de Al_2O_3 -MWCNTs/SAE40 efetuados por Dardan et al. (2016) foram avaliados na faixa de temperatura entre 25 e 50°C e variando a fração volumétrica de nanopartículas de 0 a 1,0%. O maior incremento de viscosidade dos nanofluidos com relação ao óleo puro foi de 46%. Já Afrand et al. (2016) publicaram resultados a respeito de um nanofluido composto por um híbrido de óxido de silício (SiO_2 -MWCNTs/SAE40), a fração volumétrica das nanopartículas também variou de 0 a 1,0%, porém a faixa de temperatura dos testes ficou entre 25 e 60°C. Os autores descreveram comportamento Newtoniano dos nanofluidos, além disso, o máximo aumento na viscosidade dinâmica dos nanofluidos em comparação ao óleo de motor puro foi de 37,4%. Por fim, Hemmat et al. (2017) fizeram testes dos nanofluidos de MWCNT-ZnO/SAE40 nas mesmas faixas de temperatura (25-60°C) e mesmo intervalo de concentrações volumétricas das nanopartículas (0-1,0%). Os resultados experimentais de viscosidade relativa indicaram que o máximo incremento na viscosidade dos nanofluidos em comparação ao óleo puro foi de 33,3%.

No mesmo ano, Ilyas et al. (2017), analisaram os efeitos na viscosidade dinâmica da dispersão de nanopartículas de alumina (Al_2O_3) funcionalizadas em óleo térmico. A concentração mássica dos sólidos variou de 0,5 até 3%, e foi analisado incremento na viscosidade à medida que a concentração de nanopartículas aumentou. Além de redução na viscosidade dinâmica com o aumento da temperatura. Assim, ao analisarem os dados de viscosidade relativa, o maior incremento com relação ao óleo puro foi encontrado para a condição de menor temperatura (25°C) e maior concentração mássica (3%), ultrapassando em 18% a viscosidade dinâmica do fluido base.

Outra publicação envolvendo o estudo da suspensão de nanopartículas híbridas contendo MWCNTs em fluido base de óleo SAE40 foi realizada por Hemmat et al. (2018), eles observaram a influência das nanopartículas híbridas de MWCNT com TiO_2 , na proporção de 50:50 wt%, na viscosidade dinâmica do óleo de motor. A faixa de temperatura variou de 25°C a 50°C e foram testadas 6 concentrações volumétricas distintas de nanopartículas (0,0625; 0,125; 0,25; 0,5; 0,75; 1%). Os valores de viscosidade atingiram um incremento máximo de aproximadamente 30% para a concentração volumétrica de nanopartículas de 1% e para a condição mais extrema de temperatura (50°C). Além disso, de acordo com os autores, os nanofluidos apresentaram comportamento pseudoplástico e não-Newtoniano. Analisaram também que para as condições de teste de 25, 30 e 35°C a viscosidade dinâmica sofreu incrementos sempre que houve acréscimo na concentração das nanopartículas, porém, para as condições de temperaturas mais elevadas os nanofluidos não seguiram necessariamente este mesmo padrão crescente com o aumento da concentração volumétrica.

No mesmo ano, Naddaf e Heri (2018) analisaram experimentalmente nanofluidos de nano plaquetas de grafite e nanotubos de carbono com base em óleo diesel. A análise e o cálculo dos resultados mostraram que a temperatura mais elevada conduziu à redução da energia superficial das partículas, que diminuiu a aglomeração de nanopartículas, e conseqüentemente ocasionou a diminuição da viscosidade, o que tornou a movimento Browniano mais intenso.

No último estudo encontrado a respeito de nanofluidos de óleo, Asadi e Pourfattah (2019), como em outros estudos mencionados, analisaram a viscosidade dinâmica de nanofluidos usando como fluido base óleo de motor. Este experimento investigou o efeito causado pela adição das nanopartículas de ZnO e MgO no mesmo óleo puro, variando a concentração volumétrica entre 0,125-1,5% e a temperatura de 15°C a 55°C . Foi observado comportamento Newtoniano dos nanofluidos, além do fato das nanopartículas de ZnO terem causado maior incremento na viscosidade dinâmica do óleo em comparação às nanopartículas de MgO, sendo que os nanofluidos de ZnO para as concentrações volumétricas mais elevadas (1,5%) ultrapassaram 120% da viscosidade do óleo puro, enquanto os nanofluidos de MgO, para a mesma concentração volumétrica de sólidos incrementou em aproximadamente 75% a viscosidade dinâmica do óleo puro.

Logo, para finalizar esta seção, na Tab. 2.2 é apresentado um resumo dos trabalhos citados nesta seção a respeito da viscosidade dinâmica dos nanofluidos com base em óleo.

Tabela 2.2 - Tabela de resumo dos trabalhos encontrados na literatura sobre a viscosidade dinâmica de nanofluidos com base em óleo.

Autor	Nanofluido	Conc.	Temp.	Destaques
Kole e Dey (2011)	CuO/OE	0,5-2,5 $\phi\%$	10-80°C	<ul style="list-style-type: none"> • A viscosidade relativa dos nanofluidos com maior fração volumétrica aumentou em quase três vezes; • Decrescimento com o aumento da temperatura.
Pakdaman et al. (2012)	MWCNT/OS	0,1; 0,2 e 0,4 wt%	40-70°C	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidade do nanofluido com 0.4% de concentração mássica foi 67% maior do que a do fluido base em 40°C.
Saeedinia et al. (2012)	CuO/óleo	0,2-2 wt%	24-70°C	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidade dinâmica cresceu com o aumento da concentração de nanopartículas.
Kole e Dey (2013)	Cu/OE	0,11-2 $\phi\%$	10-80°C	<ul style="list-style-type: none"> • Incremento de viscosidade de 71% para 2% de concentração volumétrica e 30°C.
Beheshti et al. (2014)	CNT/óleo de transformador	0,01 e 1 wt%	20-80°C	<ul style="list-style-type: none"> • Decremento de 0,9% nos nanofluidos com 0,01% de concentração; • Incremento na viscosidade efetiva para todas as concentrações mássicas entre 0,1-1%.
Colangelo et al. (2015)	Al ₂ O ₃ /OD	0,3; 0,7 e 1,0 $\phi\%$	30-50°C	<ul style="list-style-type: none"> • Viscosidade aumentou com o aumento da fração volumétrica; • Comportamento não-Newtoniano acentuado nas altas frações volumétricas.
Asadi et al. (2016)	MWCNT- ZnO/OM	0,125- 1,0 $\phi\%$	5-55°C	<ul style="list-style-type: none"> • Aumento da temperatura resultou na diminuição da viscosidade dinâmica em 85%; • Viscosidade dinâmica aumentou em quase 45% à medida que a concentração de sólidos aumentou.
Dardan et al. (2016)	Al ₂ O ₃ - MWCNT/OM	0-1,0 $\phi\%$	25-50°C	<ul style="list-style-type: none"> • Máximo incremento de viscosidade com relação ao óleo puro foi de 46%.
Afrand et al. (2016)	SiO ₂ - MWCNT/OM	0-1,0 $\phi\%$	25-60°C	<ul style="list-style-type: none"> • Máximo incremento de viscosidade com relação ao óleo puro foi de 37,4%.
Hemmat et al. (2017)	ZnO- MWCNT/OM	0-1,0 $\phi\%$	25-60°C	<ul style="list-style-type: none"> • Máximo incremento de viscosidade com relação ao óleo puro foi de 33,3%.

Legenda: OE: Óleo de engrenagem; OM: Óleo de motor; OT: Óleo térmico; CNT: Nanotubos de carbono; MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

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

Tabela 2.3b - (Continuação) Tabela de resumo dos trabalhos encontrados na literatura sobre a viscosidade dinâmica de nanofluidos com base em óleo.

Autor	Nanofluido	Conc.	Temp.	Destaques
Ilyas et al. (2017)	Al ₂ O ₃ /OT	0,5-3,0 wt%	25-90°C	<ul style="list-style-type: none"> • O maior incremento com relação ao óleo puro foi de 18% para a condição de 25°C e 3% de concentração mássica.
Hemmat et al. (2018)	TiO ₂ - MWCNT/OM	0-1,0 φ%	25-50°C	<ul style="list-style-type: none"> • Máximo incremento de viscosidade de aproximadamente 30%. • Comportamento não-Newtoniano.
Naddaf e Heri (2018)	Nano plaquetas de grafite, nanotubos de carbono/óleo diesel	0,05; 0,1; 0,2 e 0,5 wt%	5-100°C	<ul style="list-style-type: none"> • Temperatura mais elevada conduziu à redução da energia superficial das partículas, diminuindo a aglomeração de nanopartículas e gerando a diminuição da viscosidade, o que tornou a movimento Browniano mais intenso.
Asadi e Pourfattah (2019)	MWCNT- ZnO/OM e MWCNT- MgO/OM	0,125- 1,5 φ%	5-55°C	<ul style="list-style-type: none"> • Comportamento Newtoniano dos nanofluidos. • Nanofluidos de ZnO ultrapassaram 120% da viscosidade dinâmico do óleo puro. • Nanofluidos de MgO incrementou em aproximadamente 75% a viscosidade dinâmica do óleo puro.

Legenda: OE: Óleo de engrenagem; OM: Óleo de motor; OT: Óleo térmico; CNT: Nanotubos de carbono; MWCNT: Nanotubos de carbono de paredes múltiplas.

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

3 METODOLOGIA

Esta seção explicará como foram obtidos os nanofluidos estudados no projeto, assim como as especificidades das nanopartículas e do fluido base utilizado. Em seguida serão apresentados o aparato experimental e a metodologia usada para a aquisição de dados da condutividade térmica e da viscosidade dinâmica dos nanofluidos.

3.1 Síntese dos nanofluidos

Os nanofluidos estudados no trabalho foram feitos a partir do óleo térmico (*LUBRAX UTILE OT* grau *ISO 100*), fornecido pela PETROBRAS. Assim, a Tab. 3.1 exhibe algumas propriedades desse óleo utilizado como fluido base.

Tabela 3.1 - Propriedades do óleo térmico.

Óleo	LUBRAX UTILE OT
Grau de viscosidade	ISO 100
Condutividade térmica a 20°C [W/mK]	0,1308
Viscosidade dinâmica a 40°C [cP]	103,8

Fonte: Catálogo de informações técnicas da PETROBRAS.

Dentre os nanofluidos, dois foram produzidas pela LIEC-UFSCar, sendo o caso dos de TiO_2/OT e de ZrO_2/OT , ambos nas concentrações mássicas de 0,1%, 0,5% e 1%, além dos diâmetros das nanopartículas de TiO_2 e ZrO_2 serem de 5,85 nm e 1,13 nm, respectivamente. Enquanto os nanofluidos restantes de Ag/OT e MWCNT/OT foram produzidos no próprio laboratório LESTnano-UFU, pelo método de dois passos. As nanopartículas de prata e de nanotubos de carbono de parede múltiplas foram adquiridas da empresa Nanostructured & Amorphous Materials, Inc., em pó, sem nenhum tipo de tratamento superficial, sendo o diâmetro do MWCNT entre 20-30 nm e o comprimento entre 10-30 nm, enquanto a nanopartícula de prata possui morfologia esférica com 80 nm de diâmetro. A Tab. 3.2 lista as propriedades fornecidas pelo fabricante das nanopartículas.

Tabela 3.2 - Propriedades das nanopartículas de MWCNT e Ag utilizadas.

Nanopartícula	MWCNT	Ag
Morfologia	Tubular	Esférica
Diâmetro [nm]	20-30	80
Pureza [%]	95	99,9
Condutividade térmica [W/m.K]	~3000	~428
Massa específica [g/cm ³]	~2,10	10,49
Cor	Preta	Cinza escura

Fonte: *Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.*

A quantidade de nanopartículas de Ag e MWCNT a serem adicionadas para a síntese dos nanofluidos foi calculada utilizando a Eq. (3.1) em função das concentrações volumétricas desejadas.

$$\phi = \frac{V_{np}}{V_{np} + V_{fb}} * 100 \quad (3.1)$$

Na equação, ϕ representa a concentração em volume de nanopartículas, enquanto, V_{np} e V_{fb} representam o volume ocupado pelas nanopartículas e pelo fluido base, respectivamente. Nesse sentido, foram produzidas 3 amostras nas concentrações volumétricas de 0,005; 0,01 e 0,05%. Em seguida, aplicando a Eq. (3.2), pode-se deduzir a concentração mássica dos nanofluidos convertendo a partir da volumétrica.

$$wt = \frac{\rho_{np} * \frac{\phi}{(1-\phi)}}{\rho_{fb} + \rho_{np} * \frac{\phi}{(1-\phi)}} * 100 \quad (3.2)$$

Nesta equação, wt representa a concentração em massa de nanopartículas, ρ_{np} a massa específica da nanopartícula e ρ_{fb} a massa específica do fluido base. Desta maneira, a concentração mássica dos nanofluidos de Ag/OT ficou nas porcentagens de 0,06; 0,12 e 0,59%. Enquanto que para o nanofluido MWCNT/OT as 3 amostras tiveram, 0,01; 0,02 e 0,12% de concentração em massa. Desta forma, as concentrações mássicas dos nanofluidos e o respectivo diâmetro das nanopartículas estão presentes na Tab. 3.3.

Tabela 3.3 - Concentração mássica nanofluidos e diâmetro das nanopartículas.

Nanofluidos	Concentração mássica			Diâmetro nanopartículas
		[%]		[nm]
TiO ₂ /OT	0,10	0,50	1,00	5,85
ZrO ₂ /OT	0,10	0,50	1,00	1,13
Ag/OT	0,06	0,12	0,59	80,00
MWCNT/OT	0,01	0,02	0,12	20,00-30,00

Fonte: *Nanostructured & Amorphous Materials, Inc.*, e valores de concentrações obtidos nos laboratórios LIEC-UFSCar e LESTnano-UFU.

O volume das amostras foi pré-definido em 1200 ml a fim de produzir a quantidade de nanofluidos necessária para a avaliação das propriedades termodinâmicas. A massa específica de óleo térmico usado como fluido base foi utilizada para determinar a massa de óleo m_{fb} em função do volume da amostra a ser produzida, sendo essa fornecida pelo fabricante, no valor de 0,885 g/cm³. A massa de nanopartículas necessária para cada concentração foi pesada com uma balança semianalítica GEHAKA BK500 com resolução de 0,001 g e fundo de escala de até 500 g. Para a medição da massa de óleo foi utilizada a balança TOLEDO modelo 2096/III, com fundo de escala de 40 kg e resolução de 0,005 g.

Antes da utilização, cada frasco contendo os nanofluidos foi deixado no banho térmico a 60°C por 15 min e passado por um processo de sonicação em banho ultrassônico por mais 20 min para evitar qualquer tipo de sedimentação que poderia comprometer ou influenciar o resultado final tanto para condutividade térmica quanto para viscosidade. A seguir, as Figs. 3.1, 3.2, 3.3 e 3.4 apresentam os nanofluidos prontos para a fase de testes.



Figura 3.1 – Amostras dos nanofluidos de TiO₂/OT, nas concentrações mássicas de 0,1; 0,5 e 1,0%, da esquerda para a direita.



Figura 3.2 - Amostras dos nanofluidos de ZrO_2/OT , nas concentrações mássicas de 0,1; 0,5 e 1,0%, da esquerda para a direita.



Figura 3.3 - Amostras dos nanofluidos de Ag/OT , nas concentrações mássicas de 0,06; 0,12 e 0,59%, da esquerda para a direita.



Figura 3.4 - Amostras dos nanofluidos de $MWCNT/OT$, nas concentrações mássicas de 0,01; 0,02; 0,12 e 0,12% após um mês, da esquerda para a direita.

No canto direito da Fig. 3.4 encontra-se o recipiente com a maior concentração mássica de nanopartículas de MWCNT, porém, passado um mês do processo de homogeneização. Desta forma, fica evidente o quanto as nanopartículas decantaram durante esse período.

3.2 Propriedades termodinâmicas

3.2.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos foi medida utilizando um condutímetro da empresa LINSEIS modelo THB-1 mostrado na Fig. 3.5-A, que utiliza o método da ponte quente transiente para determinação da condutividade térmica de materiais sólidos e líquidos. Ele possui incerteza menor que 3% do valor medido e fundo de escala de até 1 W/m.K. Os principais componentes do equipamento são a sonda, mostrada na Fig. 3.5-B, confeccionada de uma resistência de fio de níquel isolada com fita de kapton que funciona como uma fonte de calor contínua, e também serve de sensor de temperatura.

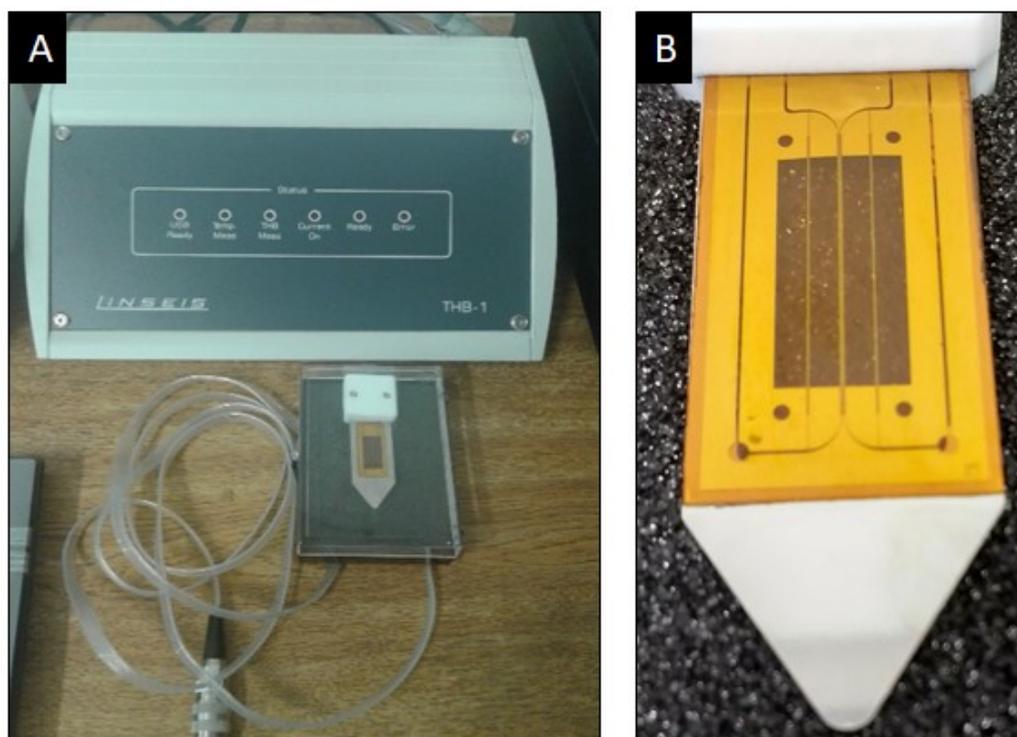


Figura 3.5 - Condutímetro Linseis THB-1 e vista aproximada do sensor THB.

Fonte: Laboratório LEST-nano.

O efeito da temperatura foi avaliado por meio de uma cuba, projetada para manter uma amostra de ~5ml em temperatura constante. Essa cuba funciona como um trocador de calor que recebe água aquecida de um banho termostático que permite controlar e manter a temperatura da amostra constante durante a medição. O banho termostático utilizado foi o MQBMP-01 da empresa Microquímica Equipamentos Ltda., ele controla a temperatura entre 0 e 80°C, com estabilidade de até 0,02°C e precisão de 0,1°C.

A Fig. 3.6 apresenta um esquema da montagem experimental usada para a avaliação da condutividade térmica.

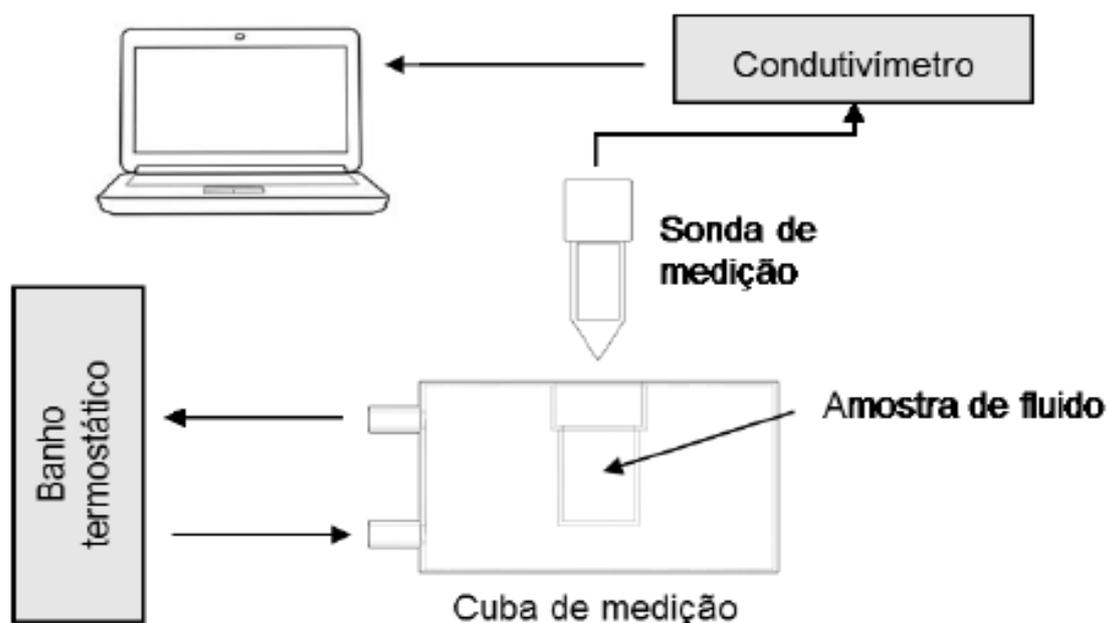


Figura 3.6 - Montagem experimental para a medição da condutividade térmica dos nanofluidos.

Fonte: (MARCUCCI, 2018).

Todo o aparato experimental é mostrado na Fig. 3.7, que contém o banho térmico utilizado para garantir a temperatura constante, a cuba de aço inox em que a amostra de nanofluido foi colocada, o condutivímetro e um computador com o programa de aquisição dos dados. A sonda é inserida na amostra de nanofluido contida na cuba de inox ligada a um banho térmico. A medição é automática e realizada por intermédio de um software em um computador acoplado, sendo realizadas 10 medições por ciclo e de 2 a 3 ciclos por amostra. Além disso,

apresenta vantagens como: maior exatidão, não necessita de calibração ou amostra de referência sendo a medição absoluta e não destrutiva.

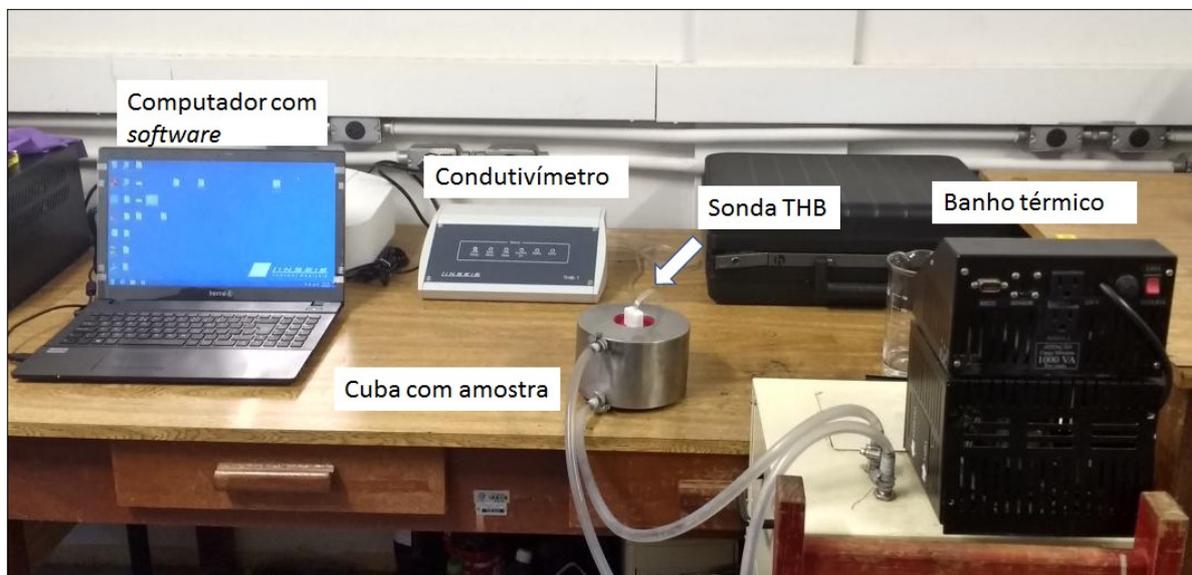


Figura 3.7 - Aparato experimental para medição de condutividade térmica de nanofluidos.

Fonte: Laboratório LEST-nano.

No presente trabalho, os testes foram realizados variando a temperatura na faixa de 10-60°C, com intervalo de 10°C, esta temperatura foi atingida pelo banho termostático para que a água aquecida nele pudesse transferir calor para o nanofluido presente no condutímetro. O valor final da condutividade foi a média aritmética dos resultados obtidos em um ciclo automático de medição consistindo de 8 medições.

3.2.2 Viscosidade Dinâmica

A viscosidade dinâmica foi medida com o auxílio de um viscosímetro Stanbinger SVM 3000/G2 da Anton-Paar, com precisão de 0,1% e faixa de medição entre 0,2 e 20.000 mPa.s. Esse instrumento possui uma célula Peltier que controla a temperatura da amostra, permitindo realizar medições partindo de 10°C até 105°C com estabilidade máxima de 0,005°C e precisão de 0,2°C. A Fig. 3.8 exhibe a aparelhagem utilizada para a medição da viscosidade dinâmica.



Figura 3.8 - Viscosímetro Stabinger SVM 3000/G2 utilizado para as medições de viscosidade dinâmica dos nanofluidos.

Fonte: (MARCUCCI, 2018).

Com o intuito de avaliar o efeito da temperatura e da concentração de nanopartículas na viscosidade dinâmica dos nanofluidos, foram efetuadas quatro medições para cada condição, variando a temperatura de 20°C até 80°C com incrementos de 20°C. Entre a medição de cada amostra de nanofluido foi realizado a limpeza do viscosímetro com água e sabão, e antes de inserir o próximo fluido o óleo base era injetado no viscosímetro para evitar que água, sabão, ou outra impureza pudessem prejudicar a medição.

4 ANÁLISE DE RESULTADOS

Nesta seção, serão abordadas a análise e a discussão dos resultados. Os itens serão apresentados com a mesma sequência utilizada na seção anterior, referente à metodologia experimental. Primeiro serão analisados os resultados da condutividade térmica dos nanofluidos, discutindo como cada nanopartícula (TiO₂, ZrO₂, Ag e MWCNT) influenciou na mudança, ou não, de comportamento do óleo térmico, depois será feita a análise da viscosidade dinâmica dos mesmos nanofluidos, comparando os resultados apresentados para cada distinta dispersão de nanopartículas.

4.1 Condutividade térmica

Os dados de condutividade térmica obtidos no presente trabalho foram comparados com aqueles estudados pelas revisões, as comparações foram feitas a partir de nanofluidos que utilizaram as mesmas nanopartículas em condições semelhante, além de ter como fluido base algum tipo de óleo. No entanto, pelo fato de terem sido usados diversas variações de óleos nos trabalhos revistos, pode-se notar resultados bem distintos entre as revisões, e também, comparando-as com os resultados encontrados no presente experimento.

Os resultados também foram comparados àqueles obtidos pela aplicação da teoria do meio efetivo de Maxwell (1873), apresentado na Eq. (4.1), e com um modelo proposto por Xue (2006), descrito pela Eq. (4.2).

$$\frac{k_{nf}}{k_{fb}} = 1 + 3\phi \cdot \frac{k_{np} - k_{fb}}{2k_{fb} + k_{np} - \phi(k_{np} - k_{fb})} \quad (4.1)$$

$$0 = 9 \cdot (1 - \phi) \cdot \frac{k_{nf} - k_{fb}}{2 \cdot k_{nf} - k_{fb}} + \phi \cdot \left[\frac{k_{nf} - k_b}{k_{nf} + 0,14 \cdot \frac{d_{np}}{l_{np}} \cdot (k_b - k_{nf})} + 4 \cdot \left(\frac{k_{nf} - k_a}{2 \cdot k_{nf} + 0,5 \cdot \frac{d_{np}}{l_{np}} \cdot (k_a - k_{nf})} \right) \right] \quad (4.2)$$

Onde, k_a e k_b , são parâmetros, descritos pelas equações Eqs. (4.21) e (4.22), que representam a condutividade da camada interfacial associadas ao diâmetro e comprimento do nanotubo, d_{np} e l_{np} , respectivamente.

$$k_a = \frac{k_{np}}{1 + 2 \cdot R_k \cdot \frac{k_{np}}{d_{np}}} \quad (4.21)$$

$$k_b = \frac{k_{np}}{1 + 2 \cdot R_k \cdot \frac{k_{np}}{l_{np}}} \quad (4.22)$$

Onde, R_k , representa a resistência térmica da camada interfacial. Sendo usado o valor de $3 \cdot 10^{-8}$ para o nanofluido de MWCNT/OT, e de $3 \cdot 10^{-6}$ para o restante dos nanofluidos (Ag/OT, TiO₂/OT e ZrO₂/OT).

Dessa forma, a Fig. 4.1 faz uma análise da condutividade relativa em relação à temperatura, mantendo a concentração mássica próxima de 0,1% para todos os nanofluidos testados nesse experimento.

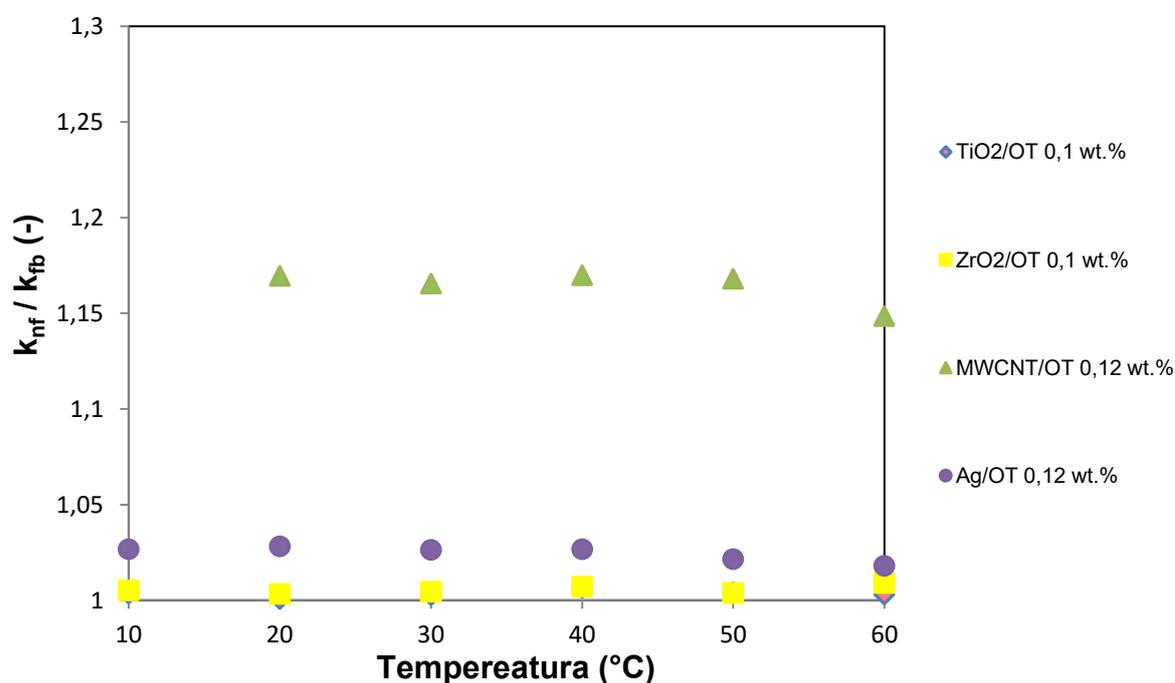


Figura 4.1 - Condutividade relativa dos nanofluidos estudados em função da temperatura.

Fica evidente que a nanopartícula que mais incrementou a condutividade térmica do óleo foi a de nanotubo de carbono de paredes múltiplas, atingindo incrementos entre 16% e 18% para quase todas as condições de temperatura

testadas, exceto 60°C. Além disso, as nanopartículas de ZrO₂ e TiO₂ não foram capazes de gerar incrementos que justificassem sua adição no óleo térmico, não ultrapassando para nenhuma condição 2% de aumento. Além disso, não foi apresentado a condutividade térmica do nanofluido de nanotubo de carbono para a 10°C devido a uma falha no processo experimental nesta condição.

Já a Fig. 4.2 ilustra uma comparação dos resultados obtidos para as medições de condutividade térmica Ag/OT com um modelo proposto por Xue (2006), com o objetivo de validar e analisar possíveis efeitos da camada interfacial, forma das nanopartículas e o efeito de concentração. Os dados também são comparados com os resultados obtidos pela aplicação da teoria do meio efetivo de Maxwell (1873), e também com os resultados obtidos por Aberoumand et al. (2016) sob as mesmas condições de temperatura (40, 50 e 60°C) variando a concentração mássica das amostras.

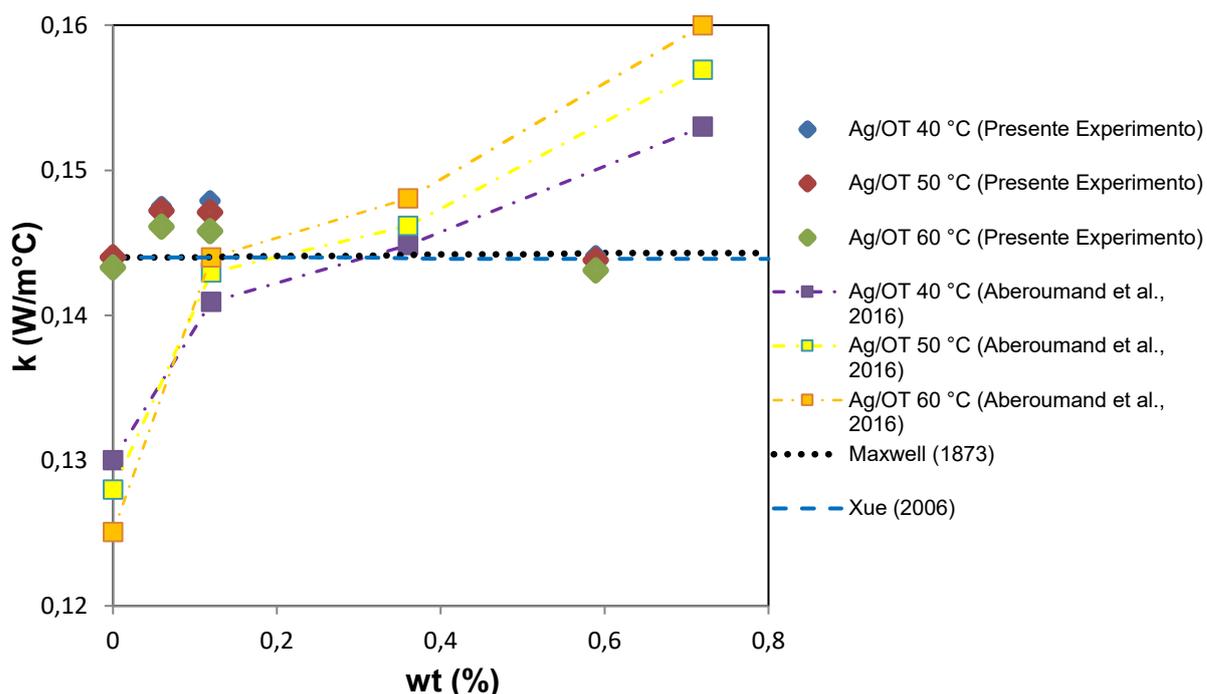


Figura 4.2 - Condutividade relativa dos nanofluidos de Ag/OT do presente experimento comparados aos dados obtidos por Aberoumand et al. (2016) em função da concentração mássica, a 40, 50 e 60°C.

Portanto, é possível verificar no gráfico que, dentre os incrementos obtidos neste trabalho, o mais significativo foi obtido para a temperatura de 40°C na concentração mássica de 0,1184%, atingindo aproximadamente 3% de melhora em

relação ao óleo base na mesma temperatura. Além disso, é evidente que os dados apresentados têm um ponto máximo, a partir do qual a adição de nanopartículas de prata torna-se desvantajosa, este ponto estaria próximo de 0,1% da concentração de massa.

Na Fig. 4.3 estão dispostas as condutividades térmicas dos quatro nanofluidos estudados no presente experimento, variando as concentrações mássicas, além do óleo térmico puro, todas para a condição de 40°C de temperatura. Da mesma maneira que no gráfico anterior, apresenta uma comparação com a teoria dos meios efetivos de Maxwell (1873). Como esperado, a menor condutividade térmica foi apresentada pelo óleo puro (abaixo de 0,145 W/m°C), justificando a adição das nanopartículas para que haja incremento nessa propriedade.

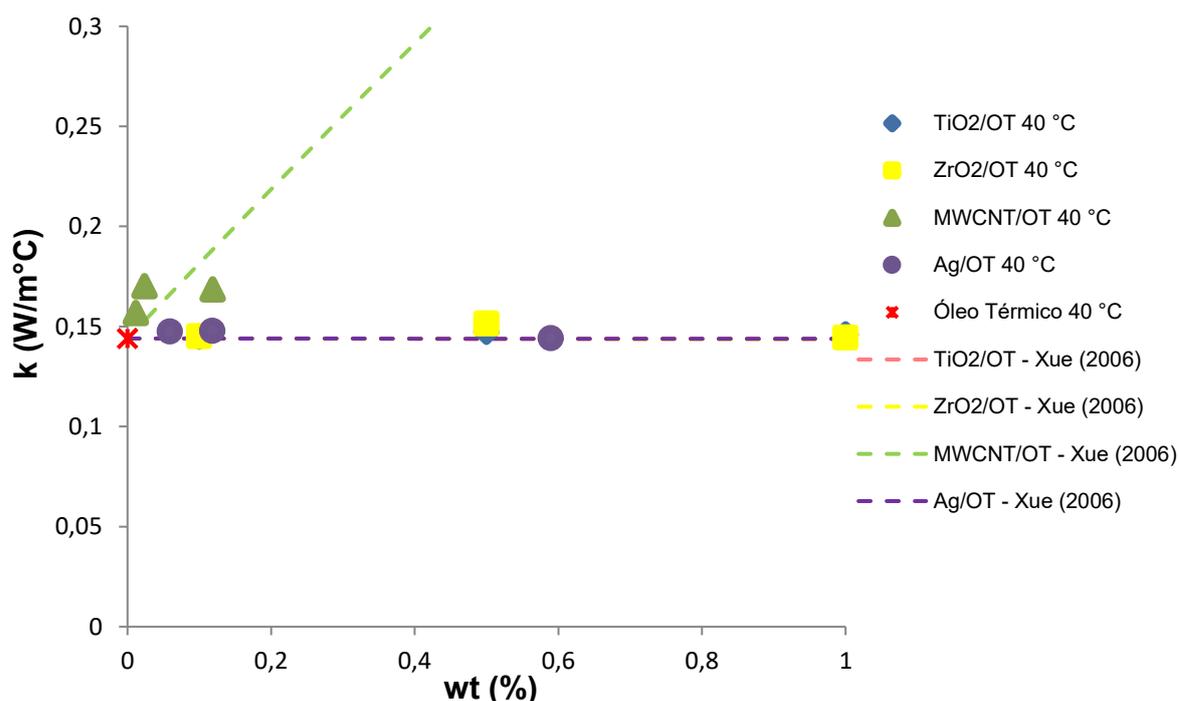


Figura 4.3 - Condutividade térmica dos nanofluidos do presente trabalho em função da concentração mássica, a 40°C.

Além disso, a nanopartícula que gerou os melhores resultados de condutividade térmica foi a de nanotubos de carbono, chegando a cerca de 0,17 W/m°C para a concentração mássica de aproximadamente 0,1 %.

Nota-se que para todos os nanofluidos a adição de nanopartícula chega a um ponto de máximo incremento na condutividade térmica de depois começa a cair.

Para os nanofluidos de MWCNT e Ag essa concentração mássica está próxima de 0,1%, enquanto para os de TiO₂ e de ZrO₂ fica perto da concentração mássica de 0,5%.

4.2 Viscosidade dinâmica

Os resultados experimentais encontrados para a viscosidade dinâmica de nanofluidos de óleo foram comparados com dados encontrados na literatura e com modelos matemáticos que predizem o comportamento de nanofluidos.

Desta forma, Fig. 4.4 faz uma comparação entre a viscosidade relativa dos nanofluidos de Ag/OT e MWCNT/OT testados no presente trabalho com os dados obtidos por Aberoumand et al. (2016) e Ilyas et al. (2017) em função da temperatura.

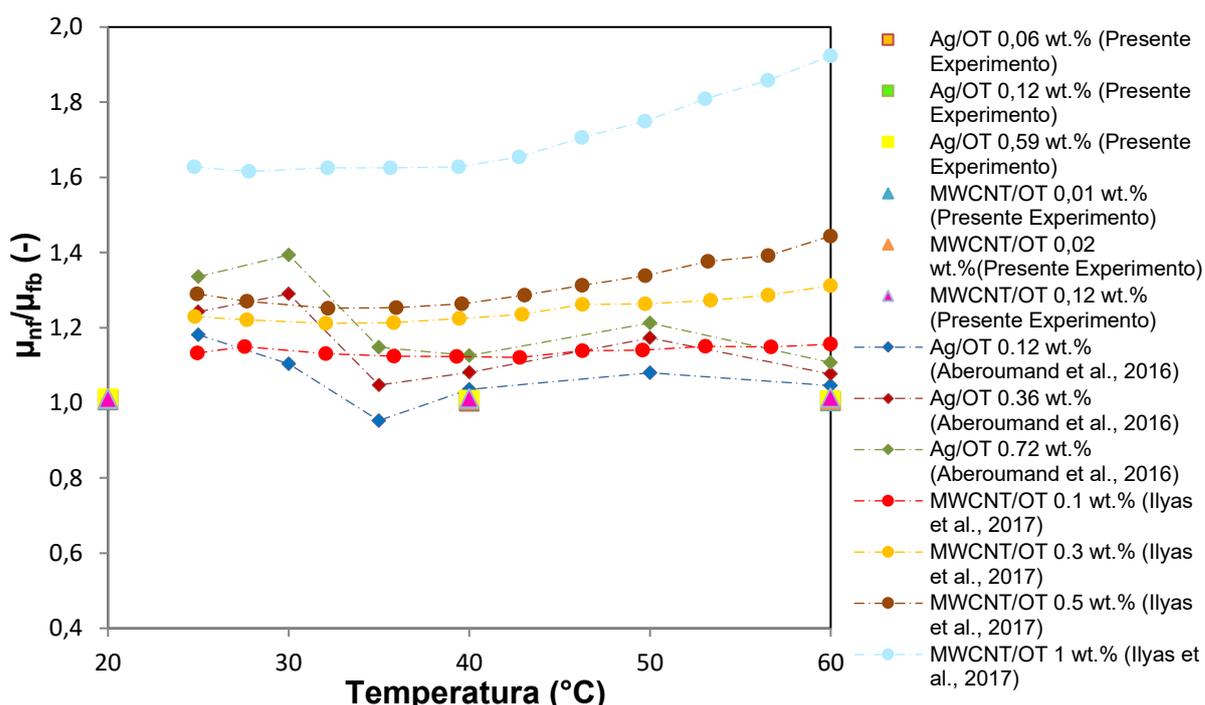


Figura 4.4 - Viscosidade relativa dos nanofluidos de Ag/OT e MWCNT/OT testados no presente trabalho comparados aos dados obtidos por Aberoumand et al. (2016) e Ilyas et al. (2017) em função da temperatura.

As concentrações mássicas dos nanofluidos de prata da revisão variaram de 0,12% a 0,72%, e dos nanofluidos de MWCNT na faixa entre 0,1% e 1%. Logo, é possível notar que, diferente do que pode ser visto para os dados de ambas as

revisões, a viscosidade dinâmica dos nanofluidos testados não sofreu incrementos relevantes com relação ao do óleo puro para nenhuma das condições de temperatura.

Da maneira semelhante à Fig. 4.4, a Fig. 4.5, apresenta os dados das revisões de nanofluidos de MWCNT e Ag encontrados por Ilyas et al. (2017) e Aberoumand et al. (2016), porém com o intuito de avaliar a variação da viscosidade dinâmica absoluta em relação da temperatura. Desta maneira, fica evidente que para todos os nanofluidos a viscosidade decresceu com o aumento da temperatura. Pode-se analisar também que tanto os nanofluidos de Ag/OT estudados por Aberoumand et al. (2016), quanto os deste trabalho (Ag/OT e MWCNT/OT) mostraram uma curva de decrescimento mais acentuada que os nanofluidos de MWCNT/OT testados por Ilyas et al. (2017), principalmente no intervalo de temperatura entre 25°C – 40°C.

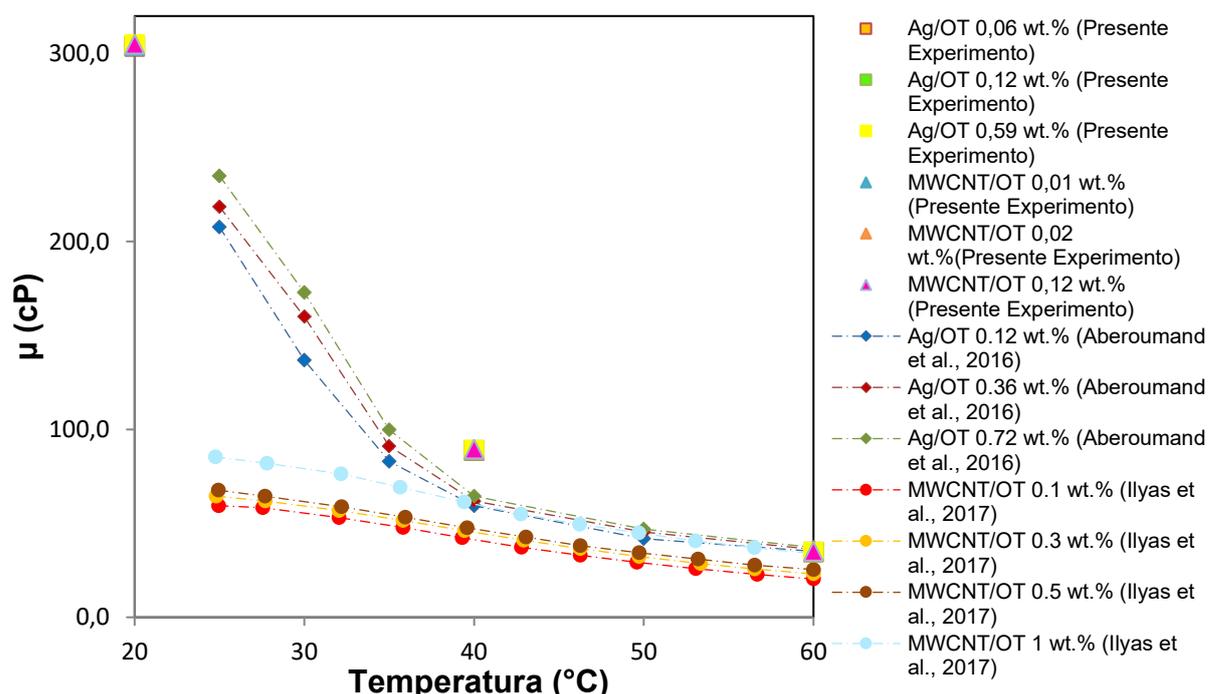


Figura 4.5 - Viscosidade dinâmica dos nanofluidos de Ag/OT e MWCNT/OT estudados no presente trabalho comparados aos dados obtidos por Aberoumand et al. (2016) e Ilyas et al. (2017) em função da temperatura.

Dentre os dados apresentados, o maior resultado de viscosidade dinâmica foi apresentado pelo MWCNT/OT com 0,1186 % de concentração mássica testado no presente experimento, ele chegou a aproximadamente 305 cP.

Assim, a Fig. 4.6 compara os resultados obtidos para as medidas de viscosidade dinâmica dos nanofluidos Ag/OT, MWCNT/OT, ZrO₂/OT e TiO₂/OT sob as mesmas condições de temperatura (40°C) com a expressão de Einstein (1906), usada para determinar a viscosidade de suspensões diluídas com concentrações volumétricas inferiores a 5%. Os dados foram arranjados para analisar a viscosidade relativa em função da variação da concentração mássica. Portanto, é possível verificar que os nanofluidos de zircônio e nanotubos de carbono apresentaram uma tendência crescente de viscosidade relativa com o incremento de nanopartículas, além do fato de todas as amostras exibirem viscosidade próxima ao fluido base, sendo o maior aumento observado para MWCNT/OT na concentração em massa de 0,1186%, apresentando pouco mais de 1% de aumento.

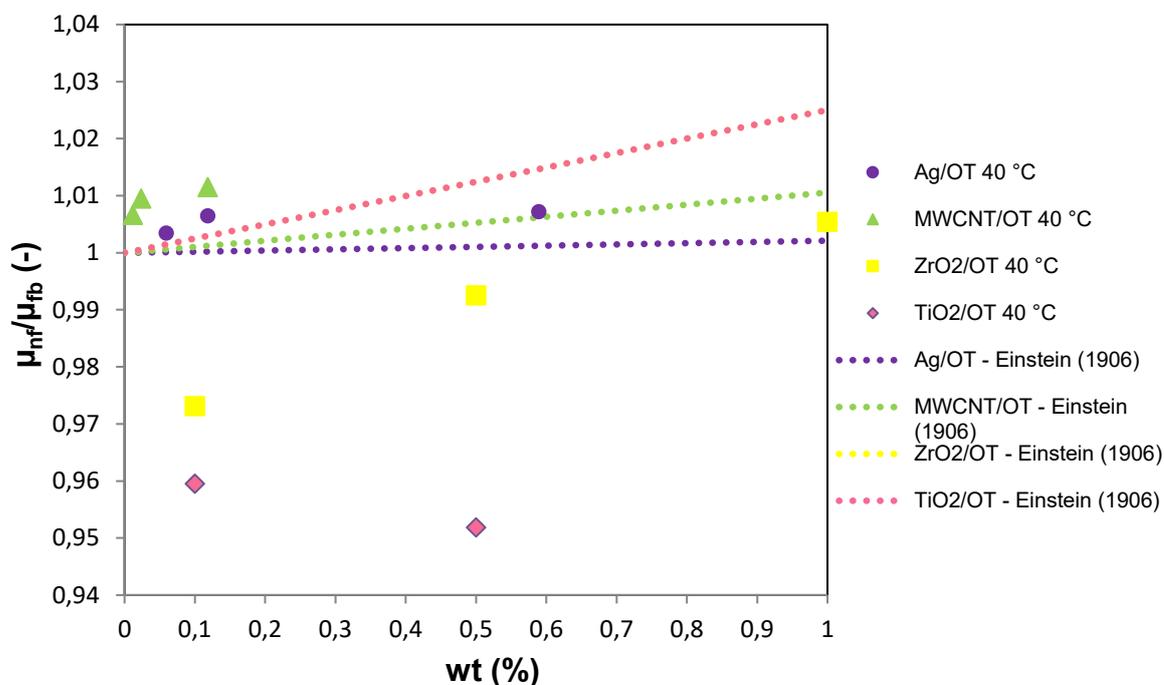


Figura 4.6 - Viscosidade relativa dos nanofluidos do presente trabalho em função da concentração mássica, a 40°C.

5 CONCLUSÕES

O trabalho experimental, realizado para a avaliação das propriedades termodinâmicas dos nanofluidos com base em óleo térmico, iniciou-se de uma extensa revisão bibliográfica, referente à caracterização das propriedades termo-físicas, viscosidade dinâmica e condutividade térmica. Nessas condições, o presente trabalho, contribuiu para um melhor conhecimento do efeito do tamanho e natureza das nanopartículas, além da concentração, na alteração das propriedades termodinâmicas dos óleos.

A análise da condutividade térmica e viscosidade dinâmica foram realizadas para faixas de temperatura entre 10-60°C e 20-80°C, respectivamente. Tendo sido efetuadas as medições de maneira padronizada para todas as amostras de nanofluidos. Portanto, de modo geral, os objetivos propostos para este trabalho foram alcançados satisfatoriamente.

As principais conclusões referentes ao presente estudo podem ser resumidas nos seguintes tópicos:

- Os máximos aumentos da condutividade térmica dos nanofluidos estudados foram encontrados em MWCNT/OT, atingindo aproximadamente 18% em comparação com o óleo LUBRAX UTILE OT-100, sem a adição de nanopartículas;
- Entre os incrementos obtidos na condutividade térmica de Ag/OT, o mais significativo atingiu aproximadamente 3% em relação ao óleo base, na temperatura de 40°C e concentração mássica de 0,1184%;
- A máxima condutividade térmica foi atingida para as amostras de concentrações mássicas intermediárias. No caso dos nanofluidos de MWCNT e Ag essa concentração mássica esteve perto de 0,1%, enquanto para os de TiO₂ e de ZrO₂ aproximou-se de 0,5%;
- O maior aumento da viscosidade dinâmica devido à adição de nanopartículas foi comprovado no nanofluido de MWCNT para a concentração mássica de 0,1186% e a 80°C, o incremento foi de 1,7%;
- Os nanofluidos de MWCNT e Ag apresentaram incremento na viscosidade dinâmica com relação ao óleo puro para todas as concentrações mássicas ensaiadas. Já os resultados de viscosidade dinâmica para os nanofluidos

de TiO_2 e ZrO_2 foram inferiores aos do óleo puro, com exceção da amostra de ZrO_2/OT com 1% de concentração mássica;

- Para todos os nanofluidos estudados a viscosidade dinâmica decresceu com o aumento da temperatura.

A seguir, a fim de contribuir para o entendimento das características termodinâmicas de nanofluidos com base em óleo térmico, algumas sugestões e recomendações para futuros trabalhos são propostas:

- A metodologia dos testes de condutividade térmica e de viscosidade dinâmica podem ser aprimoradas, como na limpeza dos equipamentos, desenvolvendo uma técnica que seja mais confiável, para que uma amostra de nanofluido não contamine a seguinte.

- Aprimorar o encaixe da sonda no teste de condutividade térmica para que ela não entre em contato com a parede da cuba, o que afeta nos dados obtidos.

- Deve-se haver uma preocupação maior na produção dos nanofluidos, para que os surfactantes não afetem os resultados de condutividade térmica e viscosidade dinâmica, sendo requerido um padrão entre os nanofluidos estudados.

- Desenvolver nanofluidos mais estáveis nos óleos térmicos para que os resultados das propriedades termodinâmicas testadas sejam mais confiáveis.

REFERÊNCIAS

ABEROUMAND, H.; JAFARIMOGHADDAM, A.; JAVAHERDEH, K.; MORAVEJ, M.; ABEROUMAND, S. Experimental study on the rheological behavior of silver-heat transfer oil nanofluid and suggesting two empirical based correlations for thermal conductivity and viscosity of oil based nanofluids. **Appl. Therm. Eng.** vol. 101, pp. 362–372, 2016.

ABEROUMAND, S.; JAFARIMOGHADDAM A. Experimental study on synthesis, stability, thermal conductivity and viscosity of Cu–engine oil nanofluid. **J. Taiwan Inst. Chem. Eng.** vol. 71, pp. 315–322, 2017.

AFRAND, M.; NAZARI, K.; AKBARI, M. Effects of temperature and solid volume fraction on viscosity of SiO₂-MWCNTs/SAE40 hybrid nanofluid as a coolant and lubricant in heat engines. **Appl. Therm. Eng.** vol. 102, pp. 45–54, 2016

ASADI, M.; ASADI, A. Dynamic viscosity of MWCNT / ZnO – engine oil hybrid nanofluid : An experimental investigation and new correlation in diferent temperatures and solid concentrations **Int. Commun. Heat Mass Transf.** vol. 76, no. May, pp. 41–45, 2016.

ASADI, A. et al. Heat transfer efficiency of Al₂O₃-MWCNT/thermal oil hybrid nanofluid as a cooling fluid in thermal and energy management applications: An experimental and theoretical investigation. **Int. J. Heat Mass Transf.** vol. 117, pp. 474–486, 2018.

ASADI, A.; POURFATTAH, F. Heat transfer performance of two oil-based nanofluids containing ZnO and MgO nanoparticles; a comparative experimental investigation. **Powder Technol.** vol. 343, pp. 296–308, 2019.

BEHESHTI, A.; SHANBEDI, M.; HERIS, S.Z. Heat transfer and rheological properties of transformer oil-oxidized MWCNT nanofluid. **J. Therm. Anal. Calorim.** vol. 118, pp. 1451–1460, 2014.

BOTHA, S. S.; NDUNGU, P.; BLADERGROEN, B. J. Physicochemical properties of oil-based nanofluids containing hybrid structures of silver nanoparticles supported on sílica. **Ind. Eng. Chem. Res.** vol. 50, no. 6, pp. 3071–3077, 2011.

CHOI, S. U. S. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **International Mechanical Engineering Congress and Exposition**. [S.I.]: ASME. 1995. p. 99-105.

CHOI, S. U. S. et al. Anomalous thermal conductivity enhancement in nanotube suspensions. **Applied Physics Letters**. v. 79, n. 14, p. 2252-2254, October 2001. ISSN 0003-6951.

COLANGELO, G.; FAVALE, E.; RISI, A.; LAFORGIA, D. Results of experimental investigations on the heat conductivity of nanofluids based on diathermic oil for high temperature applications. **Appl. Energy**. vol. 97, pp. 828–833, 2012.

COLANGELO, G.; RISI, A.; MIGLIETTA, P.; FAVALE, E.; MILANESE, M. Thermal conductivity, viscosity and stability of Al₂O₃-diathermic oil nanofluids for solar energy systems. **Energy**. vol. 95, pp. 124–136, 2015.

ÇENGEL, Y. A.; GHAJAR, A. J. **Tranferência de calor e massa: Uma abordagem prática**: 4. Ed. MCGRAW-HILL BRASIL. 2012.

DARDAN, E.; AFRAND, M.; MEGHDADI, A. H. Effect of suspending hybrid nano-additives on rheological behavior of engine oil and pumping power. **Appl. Therm. Eng.** vol. 109, pp. 524–534, 2016

EASTMAN, J. A. et al. Anomalously increased effective thermal conductivities of ethylene glycol-based nanofluids containing copper nanoparticles. **Applied Physics Letters**. v. 78, n. 6, p. 718-720, February 2001. ISSN 0003-6951.

EINSTEIN, A. Eine neue Bestimmung der Moleküldimensionen. **Annalen der Physik**. v. 324, n. 2, p. 289–306, 1906.

ETTEFAGHI, E. et al. Preparation and thermal properties of oil-based nanofluid from multi-walled carbon nanotubes and engine oil as nano-lubricant. **Int. Commun. Heat Mass Transf.** vol. 46, pp. 142–147, 2013.

HEMMAT, M.; AFRAND, M.; ROSTAMIAN, S. H.; TOGHRAIE, D. Examination of rheological behavior of MWCNTs/ZnO-SAE40 hybrid nano-lubricants under various temperatures and solid volume fractions. **Exp. Therm. Fluid Sci.** vol. 80, pp. 384–390, 2017.

HEMMAT, M.; ABBASIAN, A. A.; ESFANDEH, S. Experimental study on rheological behavior of monograde heavy-duty engine oil containing CNTs and oxide nanoparticles with focus on viscosity analysis. **J. Mol. Liq.** vol. 272, pp. 319–329, 2018.

ILYAS, S. U.; PENDYALA, R.; NARAHARI, M. Stability and thermal analysis of MWCNT-thermal oil-based nanofluids. **Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.** vol. 527, no. March, pp. 11–22, 2017.

ILYAS, S. U.; PENDYALA, R.; NARAHARI, M.; SUSIN, L. Stability, rheology and thermal analysis of functionalized alumina- thermal oil-based nanofluids for advanced cooling systems. **Energy Convers. Manag.** vol. 142, pp. 215–229, 2017.

KOLE, M.; DEY, T. K. Effect of aggregation on the viscosity of copper oxide-gear oil nanofluids. **Int. J. Therm. Sci.** vol. 50, no. 9, pp. 1741–1747, 2011.

KOLE, M.; DEY, T. K. Role of interfacial layer and clustering on the effective thermal conductivity of CuO-gear oil nanofluids. **Exp. Therm. Fluid Sci.** vol. 35, no. 7, pp. 1490–1495, 2011.

KOLE, M.; DEY, T. K. Enhanced thermophysical properties of copper nanoparticles dispersed in gear oil. **Appl. Therm. Eng.** vol. 56, no. 1–2, pp. 45–53, 2013.

KUMAR, M.S.; VASU, V.; GOPAL, A.V. Thermal conductivity and rheological studies for Cu– Zn hybrid nanofluids with various base fluids. **J Taiwan Inst Chem Eng.** 2016;66:321–7.

LI, Y. et al. A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology.** v. 196, n. 2, p. 89-101, December 2009. ISSN 0032-5910.

LI, X.; ZOU, C.; ZHOU, L.; QI, A. Experimental study on the thermo-physical properties of diathermic oil based SiC nanofluids for high temperature applications. **Int. J. Heat Mass Transf.** vol. 97, pp. 631–637, 2016.

LIU, M. S.; CHING-CHENG LIN, M.; TE HUANG, I.; WANG, C. C. Enhancement of thermal conductivity with carbon nanotube for nanofluids. **Int. Commun. Heat Mass Transf.** vol. 32, no. 9, pp. 1202–1210, 2005.

MARCUCCI, D. F. **Utilização de Nanopartículas de Diamante como Aditivo Lubrificante em Sistema de Refrigeração.** Tese (Mestrado em Engenharia Mecânica) – FEMEC, Universidade Federal de Uberlândia, p.40-41. 2018.

MASUDA, H. et al. Alteration of Thermal Conductivity and Viscosity of Liquid by Dispersing Ultra-Fine Particles. Dispersion of Al₂O₃, SiO₂ and TiO₂ Ultra-Fine Particles. **Netsu Bussei (Japones).** v. 7, n. 4, p. 227-233, 1993. ISSN 0913-946X.

MAXWELL, J. C. A treatise on electricity and magnetism. An unabridged republication of the last. **Journal of the Franklin Institute.** v. 258, n. 6, p. 534, December 1873. ISSN 0016-0032.

NADDAF, A.; ZEINALI HERIS, S. Experimental study on thermal conductivity and electrical conductivity of diesel oil-based nanofluids of graphene nanoplatelets and carbon nanotubes. **Int. Commun. Heat Mass Transf.** vol. 95, no. May, pp. 116–122, 2018.

PAKDAMAN, F. M.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; RAZI, P. An experimental investigation on thermo-physical properties and overall performance of MWCNT/heat

transfer oil nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes. **Exp. Therm. Fluid Sci.** vol. 40, pp. 103–111, 2012.

SAEEDINIA, M.; AKHAVAN-BEHABADI, M. A.; RAZI, P. Thermal and rheological characteristics of CuO-Base oil nanofluid flow inside a circular tube. **Int. Commun. Heat Mass Transf.** vol. 39, no. 1, pp. 152–159, 2012.

TIMOFEEVA, E. V.; ROUTBORT, J. L.; SINGH, D. Particle shape effects on thermophysical properties of alumina nanofluids. **Journal of Applied Physics**, v. 106, n. 1, p. 014304, 2009. ISSN 0021-8979.

XUE, Q. Z. Model for thermal conductivity of carbon nanotube-based composites. **Nanotechnology**. v. 17, n. 6, p. 1655–1660, February 2006. ISSN 0957-4484.

WANG, X. Q.; MUJUMDAR, A. S. Heat transfer characteristics of nanofluids: a review. **International Journal of Thermal Sciences**. v. 46, n. 1, p. 1-19, January 2007. ISSN 1290-0729.

WANG, B.; WANG, X.; LOU, W.; HAO, J. Thermal conductivity and rheological properties of graphite/oil nanofluids. **Colloids Surfaces A Physicochem. Eng. Asp.** vol. 414, pp. 125–131, 2012.

WEI, B.; ZOU, C.; YUAN, X.; LI, X. Thermo-physical property evaluation of diathermic oil based hybrid nanofluids for heat transfer applications. **Int. J. Heat Mass Transf.** vol. 107, pp. 281–287, 2017.

WEI, B.; ZOU, C.; LI, X. Experimental investigation on stability and thermal conductivity of diathermic oil based TiO₂ nanofluids. **Int. J. Heat Mass Transf.** vol. 104, pp. 537–543, 2017.

YANG, Y.; GRULKE, E. A.; ZHANG, Z. G.; WU, G. Thermal and rheological properties of carbon nanotube-in-oil dispersions. **J. Appl. Phys.** vol. 99, no. 11, 2006.