

ABELAR HENRIQUE DIAS VAZ

**NANOFLUIDOS EM UM SISTEMA DE
ARREFECIMENTO AUTOMOTIVO**



UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA

2019

ABELAR HENRIQUE DIAS VAZ

**NANOFLUIDOS EM UM SISTEMA DE
ARREFECIMENTO AUTOMOTIVO**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao curso de graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para a obtenção do título de **Bacharel em Engenharia Mecânica**.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

UBERLÂNDIA - MG

2019

DEDICATÓRIA

Aos meus pais Custódio Vaz
Filho e Ivone Teixeira Dias Vaz

AGRADECIMENTOS

Agradeço inicialmente aos meus pais, Custódio Vaz Filho e Ivone Teixeira Dias Vaz aos incentivos e apoio dados aos meus estudos. Eles são para mim um exemplo de dedicação, esforço e responsabilidade. Ao meu irmão e companheiro Luis Eduardo Dias Vaz pelo apoio e a troca de ideias durante todos os períodos da faculdade. Lhe desejo toda a sorte do mundo em suas conquistas.

Agradeço à minha namorada Stefani de Lara Teixeira pelo amor, carinho e força, além de todo o apoio que me deu durante a faculdade. Graças ao seu apoio, enfrentei e venci momentos difíceis durante o curso.

Ao doutorando e companheiro Edwin Martin Cárdenas Contreras por todo o apoio prestado do início ao fim desse trabalho. Lhe desejo tudo de bom e que suas conquistas sejam muitas. Agradeço também aos demais colegas do LEST nano, pela ajuda prestada e pelos momentos de descontração.

Ao meu orientador Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, que me encorajou e colaborou para o desenvolvimento do meu trabalho. Desejo à ele todo o reconhecimento almejado. Muito Obrigado.

Aos meus colegas Alberto, Ariel e Felipe, pelos momentos de descontração, pela troca de ideias e informações, além da ajuda prestada durante toda a faculdade.

Ao LEST nano, pela disponibilização dos equipamentos necessários para a realização desse trabalho

À Faculdade de Engenharia Mecânica, por proporcionar um excelente curso com ótimos professores.

VAZ, Abelar Henrique Dias. **Nanofluidos em um sistema de arrefecimento automotivo**. 2019, 86f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2019.

RESUMO

O presente trabalho avaliou o desempenho termohidráulico de nanofluidos de prata à base de uma mistura de água e etilenoglicol (50:50) em um radiador automotivo. Três amostras de nanofluido, com concentrações volumétricas iguais a 0,001%, 0,002% e 0,003% foram preparadas e sua condutividade térmica e viscosidade foram aferidas experimentalmente utilizando um condutivímetro e um viscosímetro rotacional respectivamente. Para os testes de condutividade térmica, a faixa de temperatura avaliada foi de 25 a 55°C, e para a viscosidade, 25 a 95°C. A avaliação do desempenho termohidráulico foi conduzida em uma bancada experimental que permite uma simulação controlada com condições de operação similares às de um sistema de arrefecimento automotivo. A temperatura de incidência do ar no radiador foi mantida constante à 25°C, enquanto que a vazão de nanofluido variou entre 80 e 95g/s. A temperatura de entrada do fluido no radiador variou entre 70 e 90°C, com intervalos de 10°C. Os resultados para a condutividade térmica mostraram um incremento relativo máximo de 1,7% para a concentração 0,002% a 25°C, enquanto que para a viscosidade, um aumento relativo de 5,6% foi observado para a concentração 0,003% à 85°C. Foi observado um aumento relativo máximo de 3,6% na taxa de transferência de calor do nanofluido de concentração 0,003%, a 90g/s e 70°C. Para a perda de carga, um aumento relativo médio de cerca de 2% foi observado para os nanofluidos se comparados ao fluido base.

Palavras chave: Nanofluidos, Prata, Condutividade Térmica, Viscosidade, Transferência de Calor, Radiador Automotivo

ABSTRACT

The present work evaluated the thermohydraulic performance of silver nanofluids based on a mixture of water and ethylene glycol (50:50) in an automotive radiator. Three nanofluid samples with volumetric concentrations of 0.001%, 0.002% and 0.003% were prepared and their thermal conductivity and viscosity were measured experimentally using a thermal conductivity meter and a rotational viscometer, respectively. For the thermal conductivity tests, the temperature range was from 25 to 55 ° C, and for viscosity, from 25 to 95 ° C. The thermohydraulic performance evaluation was conducted on an experimental bench that allows a controlled simulation with similar operation conditions of an automotive cooling system. The temperature of the air flowing to the radiator was maintained constant at 25°C, and the mass flow of nanofluid varied from 80 to 95g/s. The inlet temperature of the fluid in the radiator varied between 70-90°C, with intervals of 10°C. The results for the thermal conductivity showed a maximum relative increase of 1.7% at the concentration 0.002% at 25°C, whereas for the viscosity, a relative increase of 5.6% was observed at the concentration 0.003% at 85°C. A maximum relative increase of 3.6% was observed in the heat transfer rate of the nanofluid at a concentration of 0.003%, at 90g/s and 70°C. Related to the pressure drop, an average relative increase around 2% was observed for nanofluids in comparison with the base fluid.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 - Número de pesquisas envolvendo o termo "nanofluido", como relatado pela base de dados do ScienceDirect (https://www.sciencedirect.com/)	2
Figura 2.2 - Condutividade térmica dos materiais. Adaptado de (OLIVEIRA, 2016)	3
Figura 2.3 - Resultados experimentais de (ELIAS et al., 2014)	15
Figura 2.4 - Esquema da bancada experimental de (PEYGHAMBARZADEH et al., 2013) ..	24
Figura 2.5 - Esquema da bancada experimental de (HUSSEIN; BAKAR; KADIRGAMA, 2014)	25
Figura 2.6 - Esquema da bancada experimental de (CHOUGULE; SAHU, 2014)	26
Figura 2.7 - Esquema da bancada experimental de (DEVIREDDY; MEKALA; VEEREDHI, 2016)	27
Figura 3.1 - Amostras após 10 dias da preparação	32
Figura 3.2 - Recipiente onde é realizada a medida de condutividade térmica (esquerda) e banho térmico (direita)	34
Figura 3.3 - Sensor THB – 1 (Medição de condutividade térmica). Disponível em (https://www.linseis.com/en/products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/)	34
Figura 3.4 - Viscosímetro rotaciona Anton Paar SVM 3000.	36
Figura 3.5 – Diagrama esquemático da bancada experimental (OLIVEIRA, 2016)	37
Figura 3.6 - Placa de bocais	38
Figura 3.7 - Diagrama esquemático do posicionamento dos termopares no túnel de vento.	40
Figura 3.8 – Microbomba e motor	41
Figura 3.9 - Banho térmico e serpentina	41
Figura 3.10 - Posicionamento do radiador no túnel de vento	42
Figura 3.11 - Chassi e placas de aquisição de dados	43

Figura 3.12 - Bancada experimental	44
Figura 4.1 - Comparação dos resultados experimentais para a condutividade térmica com a teoria para o fluido base (Água/EG 50:50)	49
Figura 4.2 - Condutividade térmica dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas	50
Figura 4.3 - Condutividade térmica relativa dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas	51
Figura 4.4 - Comparação dos resultados experimentais para a viscosidade dinâmica com a teoria para o fluido base (Água/EG 50:50)	52
Figura 4.5 – Viscosidade dinâmica dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas	52
Figura 4.6 - Viscosidade dinâmica relativa dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas	53
Figura 4.7 - Taxa de transferência de calor para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 70°C	54
Figura 4.8 - Taxa de transferência de calor para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 80°C	55
Figura 4.9 - Taxa de transferência de calor para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 90°C	56
Figura 4.10 – Perda de carga relativa para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 70°C	57
Figura 4.11 - Perda de carga relativa para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 80°C	58
Figura 4.12 - Perda de carga relativa para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 90°C	59
Figura 4.13 – Adaptação dos resultados experimentais de (KOCA; DOGANAY; TURGUT, 2017) para (a) condutividade térmica relativa e (b) viscosidade relativa de nanofluidos de prata.	60

Figura 4.14 – Adaptação dos resultados experimentais de (OLIVEIRA; FILHO, 2014) sobre a influência da velocidade do ar na taxa de transferência de calor de nanofluidos de prata....	61
Figura 4.15 – Adaptação dos resultados de (LEONG et al., 2010) para a taxa de transferência de calor de nanofluidos de cobre.	62
Figura 4.16 – Adaptação dos resultados experimentais de (SELVAM et al., 2017) para a perda de carga em diferentes temperaturas.....	62

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 - Modelos desenvolvidos para a condutividade térmica dos nanofluidos.	11
Tabela 2.2 - Resultados experimentais para a condutividade térmica dos nanofluidos	17
Tabela 2.3 - Resultados experimentais para a viscosidade dos nanofluidos	22
Tabela 2.4 - Resultados experimentais para o desempenho térmico dos nanofluidos em radiadores automotivos.....	28
Tabela 3.1 - Propriedades físicas das nanopartícula de prata.....	31
Tabela 3.2 - Concentrações finais das amostras	32
Tabela 3.3 - Variáveis lidas pelo sistema de aquisição de dados, além do posicionamento e número de sensores	43
Tabela 3.4 - Condições de ensaio do presente trabalho na bancada experimental.....	45
Tabela 3.5 - Incerteza dos parâmetros medidos e calculados.....	48
Tabela 4.1 - Resultados detalhados da taxa de transferência de calor para os nanofluidos na temperatura de entrada de 70°C.....	54
Tabela 4.2 - Resultados detalhados da taxa de transferência de calor para os nanofluidos na temperatura de entrada de 80°C.....	55
Tabela 4.3 - Resultados detalhados da taxa de transferência de calor para nanofluidos na temperatura de entrada de 90°C.....	56
Tabela 4.4 - Resultados detalhados da perda de carga para os nanofluidos na temperatura de entrada de 70°C.....	57
Tabela 4.5 - Resultados detalhados da perda de carga para os nanofluidos na temperatura de entrada de 80°C.....	58
Tabela 4.6 - Resultados detalhados da perda de carga para os nanofluidos na temperatura de entrada de 90°C.....	59

LISTA DE SÍMBOLOS

Letras arábicas

\dot{m}	Vazão mássica [g/s]
\dot{q}	Calor por unidade de área [W/m ²]
\dot{Q}	Taxa de transferência de calor [KW]
A	Área [m ²]
Cd	Coefficiente de descarga
Cp	Calor específico [KJ/Kg-K]
d	Diâmetro [m]
h	Coefficiente de transferência de calor por convecção [W/m ² K]
k	Condutividade térmica [W/mK]
L	Espessura [mm]
m	Massa [Kg]
P	Pressão [kPa]
q	Calor por unidade de comprimento [W/m]
T	Temperatura [°C]
t	Tempo [s]

Letras gregas

γ	Razão entre espessura da nanocamada e raio da nanopartícula
κ	Constante de Boltzmann
μ	Viscosidade dinâmica [mPa.s]
ρ	Massa específica [kg/m ³]
ϕ	Concentração volumétrica [%]

Subscritos

<i>a</i>	Aglomerados
<i>ar</i>	Ar
<i>eff</i>	Efetivo
<i>f</i>	Frio
<i>fb</i>	Fluido base
<i>in</i>	Entrada
<i>int</i>	Interno
<i>lr</i>	Interfacial
<i>liq</i>	Líquido
<i>ml</i>	Média logarítmica
<i>nf</i>	Nanofluido
<i>out</i>	Saída
<i>p</i>	Nanopartícula
<i>q</i>	Quente
<i>rel</i>	Relativo
<i>t</i>	Total

Números adimensionais

<i>Nu</i>	número de Nusselt
<i>Pr</i>	número de Prandtl
<i>Re</i>	número de Reynolds

Abreviações

<i>CNT</i>	Nanotubos de carbono
<i>CTAB</i>	Brometo de cetrimônio

<i>EG</i>	Etilenoglicol
<i>MWCNT</i>	Nanotubos de carbono de paredes múltiplas
<i>PVP</i>	Polivinilpirrolidona
<i>PVP1</i>	Amostra 1
<i>PVP2</i>	Amostra 2
<i>PVP3</i>	Amostra 3
<i>PWE</i>	Pulsed wire evaporation
<i>SANSS</i>	Arco submerso para síntese de nanopartículas
<i>SDS</i>	Dodecil sulfato de sódio
<i>SHMP</i>	Hexametáfosfato de sódio
<i>THW</i>	Fio quente transiente
<i>TPS</i>	Fonte plana transiente

SUMÁRIO

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO	1
CAPÍTULO II - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	2
2.1 Nanofluidos.....	2
2.2 Preparação dos nanofluidos	4
2.2.1 Método de um passo	4
2.2.2 Método de dois passos	5
2.3 Propriedade dos nanofluidos	7
2.3.1 Condutividade térmica	7
2.3.2 Viscosidade	18
2.4 Nanofluidos em sistema de arrefecimento automotivo	23
CAPÍTULO III - PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	31
3.1 Síntese dos nanofluidos.....	31
3.2 Aferição das propriedades termofísicas	33
3.2.1 Condutividade térmica	33
3.2.2 Viscosidade dinâmica	35
3.3 Bancada Experimental.....	36
3.3.1 Circuito Frio	37
3.3.2 Circuito Quente.....	40
3.3.3 Aquisição de dados	42
3.4 Metodologia e Análise experimental	44
3.4.1 Operação da bancada e estabilização	45
3.4.2 Modelagem matemática.....	46
3.4.3 Determinação da taxa de transferência de calor	46
3.5 Incertezas de medição.....	47
CAPÍTULO IV - RESULTADOS	49
4.1 Propriedades termofísicas	49
4.1.1 Condutividade térmica	49
4.1.2 Viscosidade dinâmica	51
4.2 Desempenho Termohidráulico	53
4.2.1 Taxa de Transferência de Calor.....	53
4.2.2 Perda de Carga	56
4.3 Comparação dos resultados com a literatura	59
CAPÍTULO V - CONCLUSÕES.....	63
5.1 Conclusões.....	63
5.2 Sugestões e trabalhos futuros	64
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	65

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

A crescente tendência à compactação e miniaturização nos mais diversos setores industriais, aliadas à necessidade de sistemas de troca de calor mais eficientes tem criado um grande desafio para os engenheiros térmicos da atualidade. As possibilidades de melhoria de aumento da área de troca de calor, com aletas por exemplo, têm se mostrado cada vez mais limitadas, demandando novas tecnologias para melhorar a eficiência dos ditos sistemas. O advento da nanotecnologia e a possibilidade de sintetizar partículas em escala nanométrica em grandes quantidades possibilitou a criação dos chamados nanofluidos, que exibem características superiores aos fluidos convencionais de troca de calor.

Desde sua descoberta, os nanofluidos vem sido amplamente estudados para melhorar a transferência de calor em equipamentos eletrônicos, sistemas de energia solar assim como nos mais diversos tipos de trocadores de calor existentes, como os de placas, casco e tubos, e até mesmo em trocadores de calor compactos. Dentre os trocadores de calor compactos, os radiadores automotivos despertaram o interesse de alguns pesquisadores, por serem essenciais para o bom funcionamento de um veículo.

Em automóveis, o sistema de arrefecimento é indispensável, pois ele mantém o motor em uma faixa de temperatura adequada a sua operação, e conseqüentemente, quanto maior o veículo, maior é esse sistema. E como a indústria automobilística tem empregado esforços para desenvolver motores mais potentes e econômicos, a melhoria do sistema de arrefecimento também se faz necessária para acompanhar essa evolução. A substituição dos fluidos convencionais de troca de calor por nanofluidos em automóveis não apenas pode melhorar a capacidade de troca de calor do sistema de arrefecimento automotivo, como pode gerar uma economia de combustível de até 10% através da diminuição do tamanho do radiador, conseqüentemente gerando menor arrasto aerodinâmico e sendo necessária uma menor potência à ventoinha do radiador (CHOI, 2006).

Porém, é necessário entender que certos nanofluidos que exibem propriedades superiores a outros ao se mudar a sua condição de aplicação, sendo necessário estudar e compreender os fatores que afetam essas propriedades. Portanto, o presente trabalho tem o objetivo de avaliar a viscosidade e a condutividade térmica de nanofluidos de prata, comparando os resultados com o fluido base. Foi avaliado também o desempenho termohidráulico dos nanofluidos, comparando as alterações na taxa de transferência de calor e na perda de carga com o fluido base.

CAPÍTULO II

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nanofluidos

O termo cunhado por (CHOI; EASTMAN, 1995) descreve os nanofluidos como fluidos contendo partículas de tamanho nanométrico (<100nm) em suspensão. A alta condutividade térmica das partículas, aliadas ao tamanho nanométrico das mesmas – implicando em uma elevada razão de área superficial por volume ocupado – gera uma melhora significativa na propriedade dos nanofluidos se comparado aos fluidos convencionais. A busca por uma maior condutividade térmica em fluidos de transferência de calor despertou o interesse da comunidade científica no estudo dos nanofluidos, como mostra a Fig. 2.1.

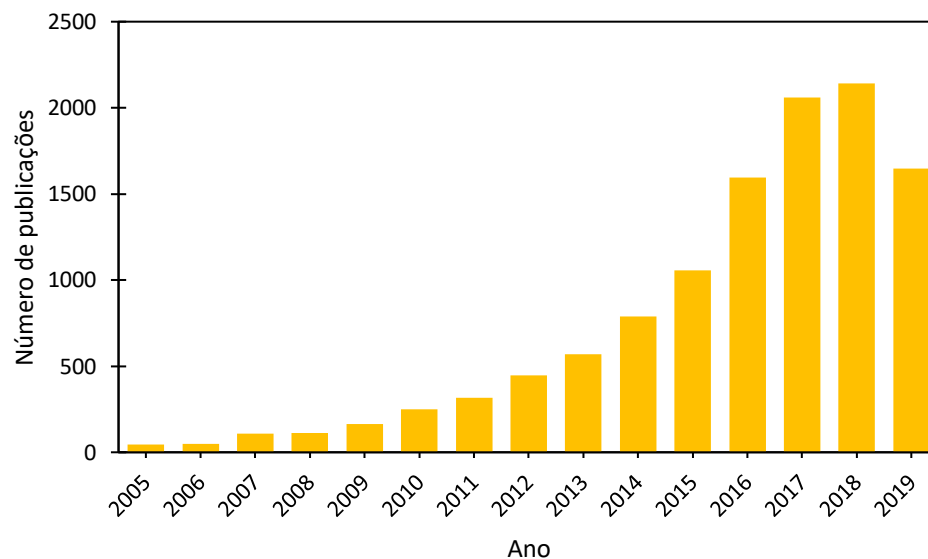


Figura 2.1 - Número de pesquisas envolvendo o termo "nanofluido", como relatado pela base de dados do ScienceDirect (<https://www.sciencedirect.com/>)

Nanofluidos podem ser produzidos com nanopartículas metálicas ou não metálicas, envolvendo partículas dos mais diversos formatos, como esferas, cilindros, plaquetas, dentre outros. Dentre os materiais mais comumente utilizados como nanopartículas, destacam-se o cobre, óxido de cobre, alumina e dióxido de titânio. Porém, existem estudos utilizando outros

materiais, como prata, ouro e carbono em diferentes formatos, como nanotubos, nanofolhas, dentre outros.

A Fig. 2.2 mostra que a condutividade térmica dos metais e óxidos comumente empregados na fabricação de nanofluidos apresenta condutividade térmica bem mais elevada se comparado aos fluidos convencionais. Dessa forma, se espera obter uma condutividade térmica mais elevada com a mistura sólido-líquido se comparado ao fluido base.

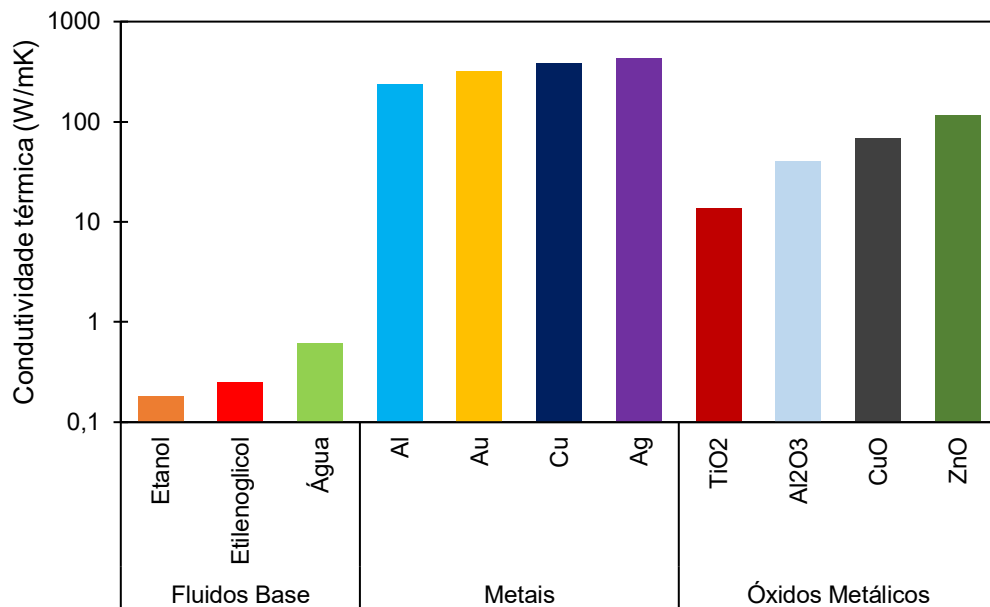


Figura 2.2 - Condutividade térmica dos materiais. Adaptado de (OLIVEIRA, 2016)

Os estudos envolvendo nanofluidos mostram uma tendência na modificação das propriedades dos fluidos ao se dispersarem nanopartículas neles, sendo que a viabilidade dos nanofluidos não dependem somente de propriedades melhores. O uso de nanofluidos acompanha também uma série de desafios, como:

Aumento da viscosidade: Inserir nanopartículas em um fluido de troca de calor, como água ou etilenoglicol, resulta em um aumento em sua viscosidade. O aumento na viscosidade por sua vez, causa um aumento na potência necessária ao sistema de bombeamento de fluido, acarretando em um maior consumo de energia.

Abrasão e erosão: O contato das nanopartículas com as partes fixas e móveis de um sistema de arrefecimento, como as paredes de um trocador de calor, ou com as engrenagens de uma bomba de engrenagens podem levar à erosão e ao desgaste, reduzindo a vida útil do sistema.

Estabilidade: Um dos grandes desafios dos nanofluidos é garantir a sua estabilidade. Ao se considerar que muitos sistemas não ficam operacionais ininterruptamente, entre um período

de operação e outro, pode ocorrer a sedimentação de nanopartículas nas partes mais baixas dos tubos e reservatórios, fazendo que em cada ciclo de operação subsequente, o desempenho térmico do sistema seja menor. Além disso, há a possibilidade da formação de aglomerados de nanopartículas, que além de sedimentarem mais facilmente, reduzem a área total de troca de calor, degradando a eficiência térmica do sistema.

Aumento da viscosidade: A adição de nanopartículas ao fluido aumenta a viscosidade do mesmo. Isso para um sistema fechado, onde o fluido está em escoamento, pode representar uma maior perda de carga e resultar em uma maior potência de bombeamento necessária para circular o fluido.

2.2 Preparação dos nanofluidos

A suspensão de nanopartículas é mais favorável e estável se comparadas a suspensões micrométricas. Os nanofluidos são mais estáveis devido a sua alta razão superfície por volume, sendo capazes de escoar em micro canais sem causar entupimento. Entretanto, ainda existe a dificuldade de garantir a estabilidade de nanofluidos por longos períodos de tempo, especialmente para nanofluidos de aplicação em sistemas térmicos. Devido ao aumento e redução de temperatura dentro do ciclo, há um aumento na colisão entre nanopartículas, criando aglomerações.

Uma das maneiras de evitar a aglomeração é a adição de surfactantes à mistura que, através da diminuição da tensão interfacial entre as partículas, tem-se um aumento na estabilidade da mistura. Em contrapartida, a adição dos surfactantes causa modificações nas propriedades térmicas da mistura. Exemplo de surfactantes: sodium-hexametaphosphate (SHMP), Cetyltrimethylammoniumbromide (CTAB), sodium dodecyl sulfate (SDS).

Para a produção dos nanofluidos, são empregados dois métodos distintos, sendo eles o de um passo e o de dois passos. No processo de um passo, as partículas são produzidas e dispersas no líquido simultaneamente. Já no processo de dois passos, as partículas são produzidas separadamente, e adicionadas posteriormente ao líquido.

2.2.1 Método de um passo

No método de um passo, a síntese de nanopartículas e a suspensão no fluido base acontece simultaneamente. Esse método é o mais adequado para metais de elevada condutividade térmica, pois evita a oxidação (RANGA BABU; KUMAR; SRINIVASA RAO, 2017). É obtida elevada estabilidade e dispersão uniforme com esse método. Por ser um processo simultâneo, etapas como secagem e estocagem de nanopartículas não são necessárias. A

maior desvantagem desse processo é o custo elevado, impossibilitando a produção com custo-benefício em larga escala.

(ZHU; LIN; YIN, 2004) prepararam nanofluidos contendo partículas de cobre dispersas em etileno glicol através do método de um passo por redução química. Uma solução de 0,1M (0,1 mol de soluto para um litro de solução) de $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ em 25ml de etileno glicol foi misturada com outra solução de 0,01M de PVK-K30 em um béquer, seguida de agitação magnética por 30 minutos. Em seguida, foi adicionada uma solução de 0,25M de $\text{NaH}_2\text{PO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ em 25ml de etileno glicol, sendo agitada por mais 15 minutos. A mistura foi colocada num micro-ondas em potência média para reagir durante 5 minutos. Após o resfriamento, o nanofluido de cobre foi obtido. Os testes de estabilidade mostram que em temperatura ambiente os nanofluidos se mantiveram estáveis por mais de 3 semanas em um estado estacionário, e por mais de 8 horas durante um processo de centrifugação.

(EASTMAN et al., 2001) produziram nanofluidos de cobre por condensação de vapor metálico em um líquido com baixa pressão de vapor. As nanopartículas obtidas apresentaram diâmetro menor que 10nm e pequena quantidade de aglomerações.

O método Pulsed Wired Evaporation (PWE) foi usado por (LEE et al., 2012) para produzir nanofluidos de ZnO. Um fio de cobre de 0,5mm é submetido a uma alta voltagem pulsada, transformando o fio em plasma. O plasma em alta temperatura entra em contato com uma mistura de argônio-oxigênio, e é condensado em pequenas partículas. As partículas entram em contato com etileno glicol dentro da câmara de evaporação/condensação, formando o nanofluido ZnO/EG sem contaminação superficial.

Através do método de síntese de nanopartículas por arco submerso (SANSS), (LO et al., 2005) produziram nanofluidos de CuO_2 com baixa aglomeração de partículas e elevada dispersão das partículas no fluido. O método SANSS utilizado consiste em inserir um bastão de cobre num fluido dielétrico numa câmara de vácuo. Um arco elétrico de elevada temperatura derrete e vaporiza o metal e água deionizada, e após a condensação, obtém-se o nanofluido.

2.2.2 Método de dois passos

No método de dois passos, a síntese de nanopartículas é feita separadamente e posteriormente inserida no fluido base. A maior vantagem desse processo é o menor custo se comparado ao método de um passo. Entretanto, nanofluidos preparados por esse método enfrentam problemas com a aglomeração de partículas devido a forças coesivas e de Van der Waals entre partículas. Tal efeito pode ser minimizado com a adição de surfactantes, ou com

o emprego de equipamentos como banho ultrassônico, misturador magnético ou homogeneizador de alta pressão.

Misuradores magnéticos ou suspensos: são ferramentas rotativas que criam um vórtice de fluido, fazendo sua homogeneização. Não são eficientes para quebrar aglomerados de nanopartículas, sendo primariamente utilizados para homogeneização dos nanofluidos. São incapazes de prevenir a formação de aglomerados (PROSPECT, 2009).

Banho e Sonda Ultrassônica: consiste na transferência de ondas ultrassônicas e cavitação à mistura, sendo capazes de alterar a geometria das nanopartículas caso aplicado por muito tempo. A sonda ultrassônica entrega uma densidade de energia muito maior em um volume pequeno, apresentando eficiência mais elevada se comparada ao banho ultrassônico (PROSPECT, 2009).

Homogeneizador de Alta Pressão: é um equipamento que eleva a pressão do fluido e o força a escoar em microcanais, elevando sua velocidade. Esse fenômeno fornece a energia necessária para a quebra das aglomerações através de elevadas forças cisalhantes e cavitação no fluido. Esse processo resulta em um fluido disperso e homogêneo (PROSPECT, 2009).

(MALLICK; SAHU, 2012) produziram nanopartículas de CuO pelo método Sol-Gel. Duas amostras de $\text{Cu}(\text{NO}_3)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ de 5g foram dissolvidas em 20 ml de etanol e propanol, sendo posteriormente misturadas para adquirir boa homogeneização. As soluções foram guardadas por um dia para formação de gel, sendo posteriormente submetidas a secagem (200°C) e calcinação (300°C), uma hora para cada etapa. Os pós obtidos foram comprimidos em tabletes, que foram submetidos a um processo de recozimento (500°C).

(LEE et al., 2008) produziram nanofluidos de Al_2O_3 em água pelo método de dois passos, sem uso de surfactantes. Primeiramente, as nanopartículas obtidas foram misturadas em água deionizada. Em seguida, a mistura foi submetida a vibração ultrassônica por 5 horas para quebrar os aglomerados e homogeneizar a mistura. O nanofluido obtido apresentava uma boa dispersão das nanopartículas, com mínimas quantidades de aglomerações.

(SUGANTHI; RAJAN, 2012) produziram nanofluidos de ZnO em água com o auxílio de SHMP como estabilizante. As nanopartículas utilizadas foram sintetizadas pelo método de precipitação química, utilizando nitrato de zinco hexahidratado como precursor. A adição controlada do nitrato de zinco numa solução de carbonato de amônio sob constante mistura resultou na precipitação de hidróxido de zinco. Os precipitados coletados passaram por secagem a 80°C por 5 horas. O pó formado foi então recozido a 550°C por duas horas, resultando nas nanopartículas de ZnO. As nanopartículas produzidas foram adicionadas à

uma solução contendo SHMP e homogeneizadas durante 20 minutos, seguido de ultrasonicação por 180 minutos. Os nanofluidos produzidos se mantiveram estáveis numa temperatura entre 10-55°C.

(DUANGTHONGSUK; WONGWISES, 2009) produziram nanofluidos de ZnO em água. CTAB, o surfactante utilizado, foi misturado em água para garantir melhor estabilidade da mistura. As nanopartículas de diâmetro médio de 21nm foram posteriormente dispersadas no fluido base e sonicadas continuamente por 3-4 horas. Pouca aglomeração foi observada 3 horas após a sonicação.

(KATHIRAVAN et al., 2010) produziram nanopartículas de cobre de 10nm de diâmetro pelo método de pulverização catódica (sputtering). Nesse método, um disco de cobre de 50mm de diâmetro por 5mm foi o alvo da pulverização. A câmara foi mantida a 100K, e preenchida com 1,33Pa de argônio. Para a produção do nanofluido, as nanopartículas produzidas foram dispersas em água e SDS foi usado como surfactante. A mistura foi vibrada por 10 horas em banho ultrassônico, e após 10 horas, as nanopartículas ainda se encontravam dispersas.

2.3 Propriedade dos nanofluidos

2.3.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica é uma importante propriedade no estudo dos nanofluidos, A dispersão de nanopartículas sólidas de elevada condutividade térmica em fluidos convencionais tendem a elevar a condutividade térmica do fluido, como mostram diversas pesquisas. Entretanto, existem algumas variáveis que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos.

Concentração de nanopartículas: O aumento na concentração de nanopartículas nos nanofluidos tendem a provocar um aumento na condutividade térmica dos mesmos. Porém,(CEYLAN; JASTRZEMBSKI; SHAH, 2006) mostra em sua pesquisa sobre nanofluidos de AgCu que existe uma concentração onde a condutividade térmica é máxima. Concentrações mais elevadas provocaram uma queda na condutividade térmica,

Natureza da nanopartícula e do fluido base: Fluidos e partículas com diferentes propriedades, conseqüentemente tendem a formar nanofluidos com diferentes condutividades térmicas. Em seu trabalho, (LI; PETERSON, 2006) observaram o aumento da condutividade térmica de nanofluidos de CuO e Al₂O₃ dispersos em água para concentrações entre 2% e 10%, sendo que na concentração de 6% e próximo a 32°C, os aumentos na condutividade térmica para os nanofluidos de CuO e Al₂O₃ foram 50% e 20% respectivamente.

Em se tratando de diferentes fluidos, (OH et al., 2008) estudou a condutividade térmica de nanofluidos de Al_2O_3 em água deionizada e etilenoglicol. Para uma mesma concentração e temperatura, foram observados aumentos de 13,3% e 9,7% na condutividade térmica, quando o fluido base é água deionizada e etilenoglicol respectivamente.

Tamanho e forma das nanopartículas: Testes com nanofluidos com partículas de diferentes tamanhos tendem a mostrar condutividades térmicas diferentes para os diferentes tamanhos testados, sendo que frequentemente, aumentos maiores são obtidos para nanofluidos com partículas de menores tamanhos devido a uma maior área superficial de contato obtida. (TENG et al., 2010), ao estudar o efeito do tamanho das nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos de Al_2O_3 observou que para partículas de maiores tamanhos, a condutividade térmica foi menor para todas as temperaturas estudadas. Para os três tamanhos estudados, 20nm, 50nm, e 100nm, foi obtido um incremento máximo na condutividade térmica de 14,7%, 7,3% e 5,6% respectivamente, na temperatura de 50°C.

O formato das nanopartículas também tem considerável influência na condutividade térmica dos nanofluidos. (TIMOFEEVA; ROUTBORT; SINGH, 2009) estudou a condutividade térmica de nanofluidos de Al_2O_3 em água/etilenoglicol (50:50), com nanopartículas em diferentes formatos: plaquetas, lâminas, cilindros e blocos, e obteve diferentes condutividades térmicas para cada formato de partícula. Foi constatado que partículas de formato esférico apresentaram maiores condutividades térmicas em toda a faixa de testes, seguidos pelos blocos. Os formatos de plaquetas e lâminas apresentaram resultados semelhantes, porém inferiores aos demais.

Temperatura: (DAS et al., 2003) foram os primeiros a observar os efeitos da temperatura na condutividade térmica dos nanofluidos. Usando nanofluidos de CuO e Al_2O_3 , com água como fluido base em seus testes, foram observados um aumento de cerca de 4 vezes na condutividade térmica aumentando a temperatura de 21°C para 51°C, para as concentrações estudadas.

(MINTSA et al., 2009) observaram um aumento médio de cerca de 15% na condutividade térmica para nanofluidos de CuO e Al_2O_3 aumentando a temperatura de 20°C para 40°C. Em testes conduzidos apenas com água destilada, o aumento para a mesma faixa de temperatura foi de 5%. Para baixas temperaturas, o efeito de tamanho da nanopartícula para a condutividade térmica não foi considerável, entretanto, o com o aumento da temperatura, nanopartículas de menor diâmetro resultaram em condutividades térmicas mais elevadas. Além disso, com o aumento da quantidade de nanopartículas devido ao menor tamanho das partículas e com o aumento da temperatura, o movimento Browniano pode ter tido influência significativa nos resultados.

Aditivos e PH: A utilização de aditivos tem o objetivo de aumentar a estabilidade dos nanofluidos por longos períodos de tempo através da modificação da interface do meio das partículas. Apesar de melhorar a estabilidade, diferentes concentrações ou diferentes tipos de aditivos podem melhorar a degradar as propriedades térmicas e físicas dos nanofluidos.

A estabilidade dos nanofluidos está diretamente ligada à propriedades eletro-cinéticas. Forças atrativas ou repulsivas podem ocorrer entre nanopartículas, sendo elas forças de van der Waals e eletrostáticas, podendo ser controladas através do controle do pH, melhorando a estabilidade do nanofluido. (SADEGHINEZHAD et al., 2016)

Pesquisadores como (WANG; ZHU; YANG, 2009) constataram que o controle da estabilidade dos nanofluidos, através do controle do pH, e da adição de quantidades ótimas de surfactantes podem resultar em uma melhora na condutividade térmica dos nanofluidos. Aumentos máximos na condutividade térmica de 15% e 18% foram observados para os nanofluidos de Al_2O_3 e Cu estudados na concentração mássica de 0,8%, onde os respectivos pH ótimos são 8 e 9,5, e as concentrações mássicas ótimas do aditivo utilizado (CTAB) são 0,1% e 0,07%.

Demais efeitos, como o movimento Browniano (BROWN, 1828), que descreve o movimento irregular de partículas suspensas em um fluido e a presença de uma camada interfacial também tem efeito sobre a condutividade térmica de nanofluidos, sendo que alguns dos estudos acerca do assunto são apresentados a seguir.

Modelos desenvolvidos para a condutividade térmica

(MAXWELL, 1873) foi o pioneiro na dispersão de partículas sólidas em líquidos com o objetivo de melhorar a condutividade térmica do mesmo, desenvolvendo uma correlação que considera que o transporte de energia térmica de partículas em suspensão é difusivo, pois a distância entre as partículas é maior que as moléculas do fluido. (HAMILTON, 1962) expandiu o modelo de Maxwell, adicionando um fator de forma à equação e permitindo a sua utilização para prever o comportamento de partículas não-esféricas.

(YU; CHOI, 2003) propuseram um modelo baseado na equação de Maxwell para suspensões sólido-líquido com a introdução da presença uma nanocamada. Tal nanocamada age como uma ponte térmica entre sólido e líquido, melhorando a condutividade térmica. Os resultados mostram que prever a existência de uma nanocamada nos nanofluidos acarretam em maiores impactos na condutividade térmica, especialmente quando as nanopartículas tem diâmetros menores que 10nm. Para partículas de maiores diâmetros, o efeito da nanocamada se torna menor, aproximando o modelo proposto ao de Maxwell.

(WANG; ZHOU; PENG, 2003) desenvolveram um método para modelar a condutividade térmica de nanofluidos com suspensões metálicas baseado na teoria do meio efetivo e da

teoria do fractal. Foram levadas em conta o efeito do tamanho e da adsorção superficial em consideração. O modelo fractal proposto diz que a condutividade térmica dos nanofluidos se relaciona diretamente com a formação de aglomerações e com a relação entre as nanopartículas. O modelo obtido, ao ser comparado com a análise experimental de nanofluidos com partículas de 50nm de diâmetro de CuO, obteve boa aproximação. Entretanto, os resultados mostraram que o cálculo preditivo da condutividade térmica apresentou complicações, e que para refinar o modelo obtido, os próximos estudos deveriam atentar para a distribuição espacial dos aglomerados de nanopartículas assim como uma melhor forma de prever a condutividade térmica das monocamadas de adsorção deveria ser desenvolvida.

(JANG; CHOI, 2004) estudaram o comportamento dos efeitos do movimento Browniano das nanopartículas, considerando-o como mecanismo chave no comportamento térmico de suspensões. A construção do modelo se baseou em cinética, convecção e resistência de Kapitza. O modelo construído consistia em 4 modos de transporte de energia: colisão das moléculas do fluido base, difusão térmica da nanopartícula, colisão entre nanopartículas devido ao movimento Browniano e interação entre as nanopartículas em movimento e o fluido base. O modelo foi capaz de prever uma condutividade térmica dos nanofluidos com base em tamanho de partícula e temperatura.

(KOO; KLEINSTREUER, 2004) observaram que o movimento Browniano produz efeitos de micro-mistura nos nanofluidos, sendo portanto um mecanismo chave para os efeitos da condutividade térmica. Eles combinaram a condutividade térmica de uma suspensão diluída estática e a condutividade devido ao movimento Browniano, constituindo um novo modelo levando em conta efeitos de tamanho de partícula, temperatura, concentração volumétrica e propriedades do fluido base.

(XIE; FUJII; ZHANG, 2005) assumiram que as estruturas interfaciais criadas pela formação de nanocamadas entre moléculas de líquido teriam efeito na condutividade térmica dos nanofluidos. Ao considerar que a nanocamada, cuja microestrutura, espessura e propriedades físico-químicas são altamente dependentes do tipo de nanopartícula suspensa, do fluido base e da interação entre eles, tivesse propriedades intermediárias entre o fluido base e as nanopartículas, uma equação para o cálculo da condutividade térmica da nanocamada foi desenvolvida, o que levou ao desenvolvimento de um modelo para o cálculo da condutividade térmica efetiva do nanofluido. Tal modelo foi derivado da solução da equação de condução de calor em coordenadas esféricas e do modelo da esfera rígida, considerando a espessura da nanocamada, tamanho da nanopartícula, concentração volumétrica e razão entre a condutividade térmica do nanofluido e fluido base.

(LEONG; YANG; MURSHED, 2006) desenvolveram um modelo para o cálculo da condutividade térmica dos nanofluidos considerando a nanocamada como um dos maiores mecanismos para o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos. Dentre as suposições iniciais para a construção modelo, os nanofluidos foram considerados como uma composição de fluido base, nanocamada e nanopartícula, e as nanopartículas foram consideradas esféricas, afastadas de modo que nenhuma interação ocorra entre elas. O modelo foi construído a partir da determinação dos campos e gradientes de temperatura e da modelagem da condutividade térmica efetiva. Entretanto, há uma necessidade de desenvolver um modelo para prever as propriedades da nanocamada.

(PRASHER et al., 2006) consideraram o processo de aglomeração como o principal contribuinte na condutividade térmica dos nanofluidos, baseado puramente no fenômeno de condução. Os aglomerados são constituídos de algumas cadeias lineares de nanopartículas e de cadeias secundárias menores, sendo que o aumento na condutividade térmica é atribuído à facilidade do calor mover ao longo das cadeias lineares. Foi encontrado que o aumento da condutividade térmica devido aos aglomerados é fortemente dependente da dimensão fractal e química dos aglomerados e dos seus raios de giração.

Um resumo dos modelos desenvolvidos para a condutividade térmica dos nanofluidos pode ser visto na Tab. 2.1.

Tabela 2.1 - Modelos desenvolvidos para a condutividade térmica dos nanofluidos.

Autor	Equação	Informações adicionais	Eq. n°:
(MAXWELL, 1873)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{k_p + 2k_{fb} + 2\phi(k_p - k_{fb})}{k_p + 2k_{fb} - \phi(k_p - k_{fb})}$		(2.1)
(YU; CHOI, 2003)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{k_p + 2k_{fb} + 2\phi(k_p - k_{fb})(1 + \beta)^3}{k_p + 2k_{fb} - \phi(k_p - k_{fb})(1 + \beta)^3}$	$\beta = \frac{h}{r} = \frac{\text{espessura nanocamada}}{\text{raio da nanopartícula}}$	(2.2)
(WANG; ZHOU; PENG, 2003)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^{\infty} \frac{k_a(r)n(r)}{k_a(r) + 2k_{fb}} dr}{(1 - \phi) + 3\phi \int_0^{\infty} \frac{k_{bf}n(r)}{k_a(r) + 2k_{fb}} dr}$	k_a é a condutividade térmica efetiva dos aglomerados. n é a função de distribuição de raio.	(2.3)

(JANG; CHOI, 2004)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = (1-\phi) + \frac{k_p\phi}{k_{fb}} + 3C \frac{d_{fb}}{d_p} Re_{d_p}^2 Pr \phi$	<p>D_{bf} e d_p são os diâmetros da molécula de fluido base e da nanopartícula respectivamente, C é uma constante de proporcionalidade, Re e Pr são os números de Reynolds e Prandtl respectivamente</p>	(2.4)
(KOO; KLEINSTREUER, 2004)	$k_{eff} = k_{estático} + k_{browniano}$ $k_{browniano} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_{fb} C_p \sqrt{\frac{\kappa_B T}{\rho_p d_p}} f(T, \phi)$	<p>β é uma função que relaciona as relações hidrodinâmicas entre nanopartículas e fluido e f considera variações na temperatura devido a interações entre partículas.</p>	(2.5)
(XIE; FUJII; ZHANG, 2005)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = 1 + 3\Theta \phi_T + \frac{3\Theta^2 \phi_T^2}{1 - \Theta \phi_T}$ $\phi_T = \phi(1 + \gamma)^3$ $\gamma = \frac{\delta}{r_p}$	<p>ϕ_T é a fração volumétrica da nanopartícula e nanocamada. γ é a razão entre espessura da nanocamada e raio da nanopartícula.</p>	(2.6)
(LEONG; YANG; MURSHED, 2006)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{(k_p - k_{lr})\phi_1 k_{lr} [2\beta_1^3 - \beta^3 + 1] + (k_p + 2k_{lr})\beta_1^3 [(k_{lr} - k_{fb}) + k_{fb}]}{\beta_1^3 (k_p + 2k_{lr}) - (k_p - k_{lr})\phi_1 [\beta_1^3 - \beta^3 + 1]}$ $\beta = 1 + \frac{\delta}{r_p}$ $\beta_1 = 1 + \frac{\delta}{2r_p}$	<p>k_{lr} é a condutividade térmica da camada interfacial</p>	(2.7)
(PRASHER et al., 2006)	$\frac{k_{eff}}{k_{fb}} = \frac{(k_a + 2k_{fb}) + 2\phi_a(k_a - k_{fb})}{(k_a + 2k_{fb}) - \phi_a(k_a - k_{fb})}$	<p>k_a é a condutividade térmica dos aglomerados ϕ_a é a concentração volumétrica de nanopartículas no aglomerado</p>	(2.8)

Métodos de medição de condutividade térmica

Estudos mostram que a condutividade térmica de nanofluidos é maior que a de fluidos base. A condutividade térmica dos nanofluidos pode ser medida com uso de diversas técnicas, como fio quente transiente, analisador de propriedades térmicas, método 3ω , placas paralelas, dentre outros.

Fio quente transiente: O método Fio Quente Transiente (THW) consiste em usar um longo fio de platina como fonte de calor e sensor. O fio é imerso no fluido de teste e é submetido a um pulso elétrico abrupto, onde a variação de temperatura é obtida em função do tempo. Se um fio “infinitamente” longo, e muito fino é submetido a um fluxo de calor constante, a distância de medição é pequena e a difusibilidade térmica do meio é alta, após um atraso, o gráfico $\Delta T \times \ln(t)$ se torna uma linha reta, com inclinação $\frac{q}{4\pi k}$, de modo que k pode então ser obtido a partir da Eq. 2.9 (PAUL et al., 2010):

$$k = \frac{q}{4\pi(\Delta T_2 - \Delta T_1)} \cdot \ln\left(\frac{t_2}{t_1}\right) \quad (2.9)$$

Analisador de propriedades térmicas: Os analisadores de propriedades térmicas operam com base na teoria da fonte plana transiente (TPS). Nesse método, o TPS atua como fonte de calor e sensor, sendo que a condutividade térmica é medida através da Lei de Fourier para condução de calor, assim como o THW. As vantagens desse método são a medição mais rápida, grande faixa de medição, não é necessário a preparação das amostras e o tamanho das amostras pode ser flexível (PAUL et al., 2010).

Método 3ω : Assim como no método THW, o método 3ω utiliza apenas um elemento como aquecedor e sensor. Entretanto, a resposta é obtida através de oscilações na temperatura. Uma corrente senoidal de frequência ω passa por um fio metálico, gerando uma onda de calor de frequência 2ω , que é deduzido da componente de voltagem do equipamento na frequência 3ω . Dessa forma, a solução da equação considerando uma fonte de calor de comprimento infinito é dada pela Eq. 2.10:

$$\Delta T(r) = \frac{P}{l\pi k} K_0(qr) \quad (2.10)$$

onde P/l é a amplitude da potência por unidade de comprimento do aquecedor na frequência 2ω e K_0 é um parâmetro dependente da função de Bessel (PAUL et al., 2010).

Método das placas paralelas: Esse método, que é realizado em regime permanente, consiste em colocar uma amostra de fluido entre duas placas de cobre paralelas e redondas. Nesse

método, dois parâmetros devem ser cuidadosamente controlados. O aumento da temperatura em cada termopar deve ser precisamente medido, e quando os termopares estiverem na mesma temperatura, a diferença de temperatura entre eles deve ser minimizada. Quando o calor total, fornecido pelo aquecedor, chega ao líquido através das placas de cobre, a condutividade térmica total pode ser calculada pela Eq. 2.11:

$$k = \frac{\dot{q} L_g}{A \Delta T} \quad (2.11)$$

onde L_g é a espessura dos espaçadores de vidro entre as placas de cobre e A é a área transversal da placa de cobre superior. A condutividade térmica do líquido pode então ser calculada pela Eq. 2.12:

$$k_e = \frac{kA - k_g A_g}{A - A_g} \quad (2.12)$$

onde k_g , A e A_g são a condutividade térmica, área transversal da placa de cobre superior e área transversal total dos espaçadores de vidro, respectivamente (PAUL et al., 2010).

Estudos experimentais recentes na condutividade térmica dos nanofluidos

Muitos pesquisadores têm conduzido experimentos para investigar a condutividade térmica de diferentes tipos de nanofluidos, assim como os fatores que a influenciam. Porém, a literatura mostra diversos resultados diferentes para os experimentos, sendo que em alguns casos, aumentos anômalos na condutividade térmica, maiores que 25%, são observados, e em outros, aumentos discretos inferiores a 10% foram obtidos. Muitos estudos foram feitos com os mesmos nanofluidos, sendo que resultados diferentes também foram observados entre eles. Isso pode ser atribuído à diferentes métodos de preparação de nanopartículas e nanofluidos, condição de teste e equipamentos utilizados durante as medições.

(NIEH; TENG; YU, 2014) analisaram a condutividade térmica de nanofluidos de Al_2O_3 e TiO_2 dispersos em água, usando quitosana como dispersante. A concentração dos testes variou entre 0,5% a 2%wt. e a temperatura entre 80°C a 95°C. Os maiores aumentos observados foram de 39,7% em 95°C para Al_2O_3 comparado ao fluido base, enquanto que para TiO_2 , o maior aumento observado foi de 35,2% a 85°C, sendo que esses aumentos ocorreram para a maior concentração mássica.

(ELIAS et al., 2014) suspenderam nanopartículas de Al_2O_3 em uma mistura 50:50 de água e etilenoglicol, com concentrações volumétricas variando entre 0,2% a 1%. Em testes conduzidos entre 10°C e 50°C, foi observado um aumento de 8,3% na condutividade térmica

na concentração 1% e temperatura 50°C se comparado ao fluido base na mesma temperatura. Os seus resultados podem ser observados na Fig. 2.3.

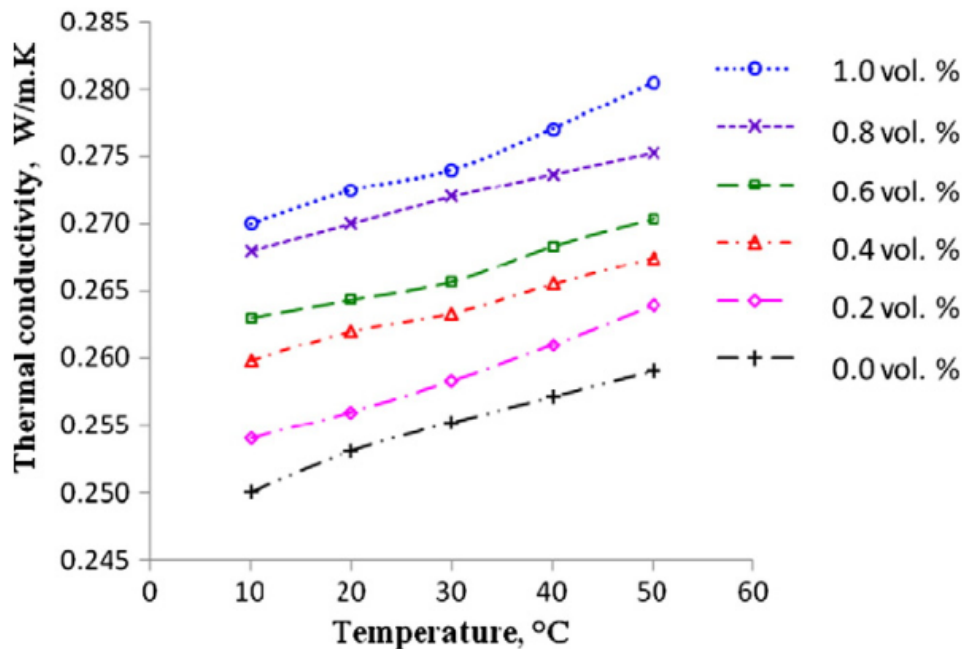


Figura 2.3 - Resultados experimentais de (ELIAS et al., 2014)

(USRI et al., 2015) avaliaram o aumento da condutividade térmica de nanofluidos de Al_2O_3 suspensos em três misturas de água e etilenoglicol, nas seguintes proporções volumétricas: 40:60, 50:50 e 60:40 respectivamente. Os testes, conduzidos numa faixa de temperatura entre 30°C a 70°C com concentrações volumétricas entre 0,5% e 2%, mostraram um aumento máximo de 16,2% na condutividade térmica para o nanofluido disperso na mistura 40:60 de água etilenoglicol, na maior temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas. Foi observado que apesar de que fluidos com maior concentração de água apresentam maior condutividade térmica, os maiores aumentos comparados ao fluido base foram obtidos para testes com maior concentração de EG.

(KUMAR; TIWARI; GHOSH, 2016) produziram nanofluidos de ZnO em água, com concentrações volumétricas entre 0,25% a 2%, usando CTAB como surfactante. Testes conduzidos entre 25°C e 50°C mostraram um aumento na condutividade térmica de 15,88% se comparado ao fluido base na concentração de 2%. O aumento na condutividade térmica com o aumento da concentração foi atribuído à formação de aglomerados de nanopartículas.

(SARAFRAZ; HORMOZI, 2016) estudaram o comportamento de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) em água, variando sua concentração volumétrica entre 0,5% a 1,5%. O maior aumento na condutividade térmica observado foi de 68% para a

concentração de 1,5%. Os resultados mostraram que o aumento na condutividade térmica provocado pelo aumento da temperatura não foi significativo, enquanto o aumento na concentração volumétrica provocou maiores aumentos.

(AGARWAL et al., 2016) suspenderam nanopartículas de CuO em três diferentes fluidos base: água, etilenoglicol e óleo de motor. A medição da condutividade térmica foi realizada na faixa de temperatura entre 10°C e 70°C, com concentrações volumétricas entre 0,25% a 2%. Os aumentos observados foram de 24%, 21% e 14% para água, EG e óleo de motor respectivamente, na maior temperatura e concentração volumétrica. A diferença nos valores de incremento na condutividade térmica para os diferentes nanofluidos na mesma temperatura foi atribuído à camada interfacial, que influencia diretamente a interação entre fluido e nanopartícula. Se comparado aos outros fluidos base, a suspensão de CuO em água foi acompanhada de interações mais fortes entre nanopartícula e fluido base.

(WILK; SMUSZ; GROSICKI, 2017) avaliaram a condutividade térmica de nanofluidos de cobre em água. Foram avaliadas três concentrações volumétricas: 0,011%, 0,055% e 0,101%. Testes conduzidos em uma faixa de temperatura entre 20°C e 60°C mostraram um aumento de 10% na condutividade térmica na concentração de 0,101% se comparado ao fluido base. O aumento encontrado foi atribuído ao fenômeno da termoforese. A elevada condutividade térmica do cobre acarreta em um rápido aquecimento da nanopartícula, intensificando a termoforese, aumentando a condutividade térmica do nanofluido.

(AMIRI; SHANBEDI; DASHTI, 2017) produziram nanopartículas de quantum-dots de grafeno tratados com amina (A-GQD) pelo método de Hummers modificado. As partículas foram suspensas em água nas concentrações mássicas entre 0,001% a 0,02%, sendo que a condutividade térmica foi avaliada até a concentração de 0,002%. Os testes foram realizados entre as temperaturas 20°C e 50°C, sendo que o maior aumento na condutividade térmica foi observado para a concentração 0,002% a 20°C.

(ISLAM et al., 2017) sintetizaram nanofluidos de ZnO suspensos em uma mistura de água e etilenoglicol na concentração 50:50. A condutividade térmica dos nanofluidos foi investigada para concentrações volumétricas variando entre 0,05% a 5%, e os testes foram conduzidos em temperaturas entre 40°C e 70°C. Aumentos na condutividade térmica na faixa de 12-15% foram observados. O aumento da condutividade térmica foi atribuído ao movimento Browniano e às interações interfaciais entre partícula e líquido.

(OMRANI et al., 2019) produziram nanofluidos de MWCNT em água. Amostras com concentração volumétrica de 0,05% foram submetidas a testes de condutividade térmica com o objetivo de avaliar a influência do tamanho e forma das nanopartículas sobre essa propriedade. Os testes realizados entre 10°C e 45°C mostraram que para a amostra com

maior razão de aspecto, um aumento de 36% foi observado a 45°C. Para amostras com mesmo diâmetro, foi observado que um maior comprimento da nanopartícula resultou em um maior aumento na condutividade térmica.

(OUIKHALFAN et al., 2019) avaliaram os efeitos da adição de diferentes surfactantes, CTAB e SDS, sobre a condutividade térmica de nanofluidos de TiO₂ em água. Os resultados mostraram um aumento na condutividade térmica de 10% e 8% se comparados ao fluido base mesmo após duas semanas da preparação dos nanofluidos para as amostras tratadas com CTAB e SDS respectivamente.

Na Tab. 2.2 são exibidos resultados recentes de análises experimentais sobre a condutividade térmica dos nanofluidos.

Tabela 2.2 - Resultados experimentais para a condutividade térmica dos nanofluidos

Referência	Partícula	Tamanho	Fluido Base	ϕ	Variação K	Faixa de Temperatura
(NIEH; TENG; YU, 2014)	Al ₂ O ₃	Ø 10-20nm	50:50 Água/EG	0,5-2% wt.	↑39,7% Al ₂ O ₃	80-95°C
	TiO ₂	Ø 20-30nm				
(ELIAS et al., 2014)	Al ₂ O ₃	Ø 13nm	50:50 Água/EG	0,2-1% vol.	↑8,30%	10-50°C
(HEMMAT ESFE et al., 2015)	MgO	Ø 40nm	60:40 Água:EG	0,1-3% vol.	↑34,5%	20-50°C
(USRI et al., 2015)	Al ₂ O ₃	Ø 13nm	40:60 Água:EG	0,5-2% vol	8,4%	30-70°C
			50:50 Água:EG		12,6%	
			60:40 Água:EG		16,2%	
(KUMAR; TIWARI; GHOSH, 2016)	ZnO	-	Água	0,25 - 2,0% vol.	↑15,88%	25-50°C
(SARAFRAZ; HORMOZI, 2016)	MWCNT	-	Água	0,5 - 1,5% vol.	↑68%	50-70°C

(AMIRI et al., 2016)	CNDG	Ø 2.93 nm	40:60 Água:EG	0,001 - 0,01% wt.	↑20%	25–65°C
(AGARWAL et al., 2016)	CuO	Ø 55-66nm	Água	0,25-2% vol.	↑24%	10-70°C
			EG		↑21%	
			Óleo de Motor		↑14%	
(WILK; SMUSZ; GROSICKI, 2017)	Cu	Ø 40nm	Água	0,011- 0,101% vol.	↑10%	23-60°C
(AMIRI; SHANBEDI; DASHTI, 2017)	A-GQD	Ø 5–20nm	Água	0,001, 0,02% wt.	↑18,6%	20-50°C
(ISLAM et al., 2017)	ZnO	Ø 40nm	50:50 Água:EG	0,05 - 0,5% vol.	↑12-15%	40-70°C
(ŻYŁA; FAL, 2017)	SiO ₂	Ø 7-14nm	EG	0,01- 0,05% wt.	↑3%	25°C
(ŻYŁA et al., 2018)	Nanodia- mantes ND97 e ND87	Ø 4nm	EG	0,01 - 0,1% wt.	↑49%	25°C
(OMRANI et al., 2019)	MWCNT	Ø 8-50nm Comp. 0,5- 30µm	Água	0,05% vol.	↑36%	10-45°C
(OUIKHALFAN et al., 2019)	TiO ₂	Ø 20nm	Água	1,25% vol.	↑10%	20°C

2.3.2 Viscosidade

A viscosidade também é um fator essencial para aplicações de transferência de calor, pois potência de bombeamento e queda de pressão são variáveis dependentes dela. A viscosidade efetiva depende da viscosidade do fluido base acrescido da quantidade de partículas adicionadas.

Variáveis que influenciam na viscosidade de nanofluidos:

Concentração de nanopartículas: A literatura mostra que a dispersão de nanopartículas em um fluido causam um aumento na sua viscosidade. (LEE et al., 2011) estudaram as propriedades de nanofluidos de SiC em água, sendo que os testes para a viscosidade foram conduzidos decrescendo a temperatura de 72°C a 28°C. Dentre as concentrações de nanopartículas estudadas, que foram entre 0,001%vol. a 3%vol., as maiores viscosidades constatadas foram para a concentração de 3%, com valores entre 68% a 102% nas temperaturas estudadas.

(ZHU et al., 2010), em seu estudo com nanofluidos de CaCO₃ em água, constataram um aumento de 69% para a concentração de 4,11%, sendo que os testes foram realizados entre as concentrações volumétricas 0,12% a 4,11%. Em concentrações inferiores, menores valores para a viscosidade foram obtidos.

Temperatura: A temperatura é um parâmetro importante no estudo sobre a viscosidade dos nanofluidos, e os resultados mostram uma tendência numa redução da viscosidade com o aumento da temperatura. Isso se deve principalmente ao enfraquecimento das interações moleculares entre as partículas com o aumento da temperatura. Tal resultado pode ser observado na pesquisa de (TURGUT et al., 2009), em que, ao estudarem sobre nanofluidos de TiO₂ entre as concentrações volumétricas entre 0,2% a 3%, foi observado uma queda na viscosidade em todas as concentrações com o aumento da temperatura de 13°C para 55°C.

Tamanho e forma da nanopartícula: Apesar de diferentes tamanhos e formas de nanopartículas afetarem a viscosidade do nanofluido, pouco tem sido estudado sobre o assunto.

(HE et al., 2007), ao estudarem nanofluidos de TiO₂ a base de água com tamanho de partículas variando entre 95nm e 210nm, observaram um aumento na viscosidade com o aumento do tamanho das nanopartículas, sendo o aumento máximo obtido superior a 7%. Já (SHARIFPUR; ADIO; MEYER, 2015) observaram uma queda na viscosidade de nanofluidos de Al₂O₃/glicerol com o aumento do tamanho das nanopartículas de 19nm para 160nm.

(TIMOFEEVA; ROUTBORT; SINGH, 2009), em seu estudo sobre nanofluidos de Al₂O₃ em água e etilenoglicol em partes iguais observaram que diferentes formatos de nanopartículas produzem nanofluidos com diferentes viscosidades. Para as diferentes concentrações estudadas, partículas com formato de plaquetas e cilindros exibiram viscosidade superior aos outros formatos, como blocos e lâminas.

Fluido Base: A viscosidade de nanofluidos está ligada a viscosidade dos fluidos em que as nanopartículas estão inseridas. (SYAM SUNDAR et al., 2012) produziram nanofluidos de

Fe_3O_4 em uma mistura de etilenoglicol/água com três diferentes proporções (mássicas): 60:40, 40:60 e 20:80. Foi observado um aumento de 2,94 vezes na viscosidade do nanofluido com fluido base 60:40 EG/água, 1,61 vezes para 40:60 EG/água e 1,42 vezes para 20:80 EG/água, mostrando a influência do fluido base na viscosidade do nanofluido.

Modelos clássicos desenvolvidos para a viscosidade

Dentre os modelos clássicos, o modelo de (EINSTEIN, 1905) é um dos mais famosos, que se baseia em uma solução diluída contendo partículas esféricas em baixa concentração volumétrica ($\phi < 0,02$). A viscosidade efetiva do fluido é dada pela Eq. 2.13.

$$\mu_{eff} = (1 + 2,5\phi)\mu_{fb} \quad (2.13)$$

onde μ_{fb} é a viscosidade do fluido base e ϕ é a concentração volumétrica de partículas. Entretanto, o modelo foi desenvolvido considerando partículas esféricas, sem levar em conta efeitos de temperatura e interação entre partículas.

(HATSCHEK, 1913) desenvolveu um modelo que considera a suspensão de partículas esféricas de pequeno diâmetro no fluido, sendo aplicável para concentração de até 40% de partículas sólidas, sendo ele descrito pela Eq. 2.14.

$$\mu_{eff} = (1 + 4,5\phi)\mu_{fb} \quad (2.14)$$

(DE BRUIJN, 1942) propôs uma equação baseada no modelo de Einstein, válido para concentrações mais altas, sendo descrita pela Eq. 2.15.

$$\mu_{eff} = \mu_{fb} \left(\frac{1}{1 - 2,5\phi + 1,552\phi^2} \right) \quad (2.15)$$

(BRINKMAN, 1952) expandiu o modelo de Einstein para concentrações até 4%, sendo representada pela Eq. 2.16.

$$\mu_{eff} = \frac{\mu_{fb}}{(1 - \phi)^{2,5}} \quad (2.16)$$

(BATCHELOR, 1977) considerou o movimento Browniano e a interação entre partículas em sistemas bifásicos contendo partículas esféricas e rígidas, sendo a viscosidade descrita pela Eq. 2.17.

$$\mu_{eff} = \mu_{fb}(1 + 2,5 + 6,2\varphi^2) \quad (2.17)$$

Métodos de medição da viscosidade

Viscosímetro Rotacional: O viscosímetro rotacional determina a viscosidade de um fluido através da determinação do torque necessário para rodar um objeto dentro do fluido. A sua principal vantagem é a capacidade de operar continuamente para uma dada taxa de cisalhamento, de modo que outras medições em estado estacionário podem ser realizadas. Além disso, medições subsequentes variando a taxa de cisalhamento ou temperatura podem ser facilmente realizadas. (LEBLANC; SECCO; KOSTIC, 1999)

Viscosímetro Capilar: Esse tipo de viscosímetro é derivado de sistemas dedicados a medição da queda de pressão em microcanais. A queda de pressão na parede do microcanal é medida diretamente através da queda de pressão e a taxa de cisalhamento é medida através da taxa de escoamento. (CHEVALIER; TILLEMENT; AYELA, 2007)

Viscosímetro de corpo móvel: Em seus formatos mais comuns, uma esfera ou um cilindro “caem” dentro de uma câmara preenchida com líquido por uma distância determinada, onde sua velocidade é determinada. O arrasto viscoso proporcionado pelo objeto deslocando através do fluido gera uma força de arrasto, em que, considerando a geometria do objeto, e as propriedades do fluido e do objeto, a viscosidade do fluido é determinada. (LEBLANC; SECCO; KOSTIC, 1999)

Estudos experimentais recentes na viscosidade dos nanofluidos

Muitos pesquisadores têm pesquisado também sobre como a adição de nanopartículas em fluidos base altera a viscosidade do fluido final. Tais estudos são motivados pela importância dessa propriedade em sistemas de troca de calor, pois outras propriedades como potência de bombeamento e perda de carga estão diretamente relacionadas com a viscosidade. Similar ao observado na condutividade térmica, os aumentos na viscosidade não são os mesmos para condições similares de testes. Enquanto alguns resultados mostram aumentos anômalos na viscosidade, outros mostram aumentos menores e mais discretos.

(HEMMAT ESFE; SAEDODIN, 2014) avaliaram a viscosidade em nanofluidos de ZnO dispersos em etilenoglicol. Os nanofluidos preparados apresentaram concentrações volumétricas entre 0,25% e 5%. A temperatura dos testes variou entre 24,7°C a 50°C. Foi observado um aumento de 30% na viscosidade do nanofluido na temperatura de 30°C e concentração 5% se comparado ao fluido base na mesma temperatura. Os resultados

mostraram que o aumento da concentração volumétrica teve mais impactos no aumento da viscosidade se comparado ao aumento de temperatura.

(AMIRI et al., 2016) produziram nanofolhas de grafeno dopadas de nitrogênio (CNDG) fazendo a posterior dispersão numa mistura de água e etilenoglicol em razão volumétrica 40:60 respectivamente. Foram produzidos nanofluidos com concentrações mássicas entre 0,001% e 0,01%. Testes conduzidos entre temperaturas 25°C a 65°C, numa taxa de cisalhamento de 140s⁻¹ mostraram um aumento insignificativo (3,5%) na viscosidade com o aumento da concentração de nanopartículas,

(ŻYŁA; FAL, 2017) estudaram a viscosidade de nanofluidos de SiO₂ dispersos em etilenoglicol. Os testes conduzidos para concentrações mássicas entre 0,01% e 0,05%, na temperatura de 25°C mostraram um aumento de 6% na viscosidade para a concentração 0,01%. enquanto que para a concentração 0,05%, um aumento de 39% foi observado.

(SAEEDI; AKBARI; TOGHRAIE, 2018) analisaram aumentos na viscosidade de nanofluidos de CeO₂ dispersos em etilenoglicol. Foram conduzidos experimentos entre 25°C e 50°C, com nanofluidos de concentração volumétrica entre 0,05% e 1,2%. Para diferentes concentrações volumétricas, os menores aumentos na viscosidade foram obtidos a 35°C. A 25°C e 1,2%vol. foi obtido um aumento de 104% na viscosidade.

A Tab. 2.3 mostra resumidamente os resultados das análises experimentais sobre a viscosidade dos nanofluidos.

Tabela 2.3 - Resultados experimentais para a viscosidade dos nanofluidos

Referência	Partícula	Tamanho	Fluido Base	ϕ	Varição viscosidade	Faixa de Temperatura
(HEMMAT ESFE; SAEDODIN, 2014)	ZnO	Ø 18nm	EG	0,25 – 5% vol	↑30%	24.7-50°C
(NIEH; TENG; YU, 2014)	Al ₂ O ₃	Ø 10-20nm	50:50 Água/EG	0,5 - 2 wt.%	↑30,4%	80-95°C
	TiO ₂	Ø 20-30nm				
(ELIAS et al., 2014)	Al ₂ O ₃	Ø 13nm	50:50 Água/EG	0.2 - 1% vol.	↑185%	10-50°C

(KUMAR; TIWARI; GHOSH, 2016)	ZnO	-	Água	0,25 - 2,0% vol.	↑49,31%	25-50°C
(AMIRI et al., 2016)	CNDG	Ø 2.93 nm	40:60 Água:EG	0,001 - 0,01% wt.	↑3,5%	25-65°C
(WILK; SMUSZ; GROSICKI, 2017)	Cu	Ø 40nm	Água	0,011 - 0,101% vol.	↑25%	20-60°C
(AMIRI; SHANBEDI; DASHTI, 2017)	A-GQD	Ø 5-20nm	Água	0,001, 0,02% wt.	↑3,58%	20-50°C
(ISLAM et al., 2017)	ZnO	Ø 40nm	50:50 Água:EG	0,05 - 0,5% vol	↑46%	40-70°C
(ŻYŁA; FAL, 2017)	SiO ₂	Ø 7-14nm	EG	0,01 - 0,05% wt	↑39%	25°C
(SAEEDI; AKBARI; TOGHRAIE, 2018)	CeO ₂	Ø 10- 30nm	EG	0,05 - 1,2%	↑104%	25-50°C
(OMRANI et al., 2019)	MWCNT	Ø 8-50nm Comp. 0,5-30µm	Água	0,05% vol.	↑5,5%	10-45°C

2.4 Nanofluidos em sistema de arrefecimento automotivo

(NARAKI et al., 2013) estudaram os aumentos na taxa global de transferência de calor provocado pelo uso de nanofluido de CuO/Água em um radiador automotivo. Os testes conduzidos entre as temperaturas de 50° a 80°C mostraram uma redução na taxa global de transferência de calor com o aumento da temperatura. A adição de nanopartículas nas concentrações volumétricas 0,15% e 0,40% causaram um aumento de 6% e 8% respectivamente no desempenho térmico do radiador. O melhor desempenho térmico foi observado nas condições de menor temperatura, maior concentração de nanopartículas, maior velocidade do nanofluido e do ar.

(PEYGHAMBARZADEH et al., 2013) avaliaram o desempenho de nanofluidos de CuO e Fe₂O₃ em um radiador automotivo. Uma representação da bancada utilizada pode ser vista na Fig. 2.4. Nanofluidos de concentrações volumétricas entre 0,15% a 0,65% foram produzidos e testados em temperaturas entre 55°C a 80°C, Reynolds entre 50-1000 para o lado do nanofluido e entre 500-700 para o lado do ar. Foram obtidos aumentos de 7% e 9% no desempenho térmico do radiador usando nanofluidos de CuO e Fe₂O₃ respectivamente na concentração de 0,65%, se comparados com água.

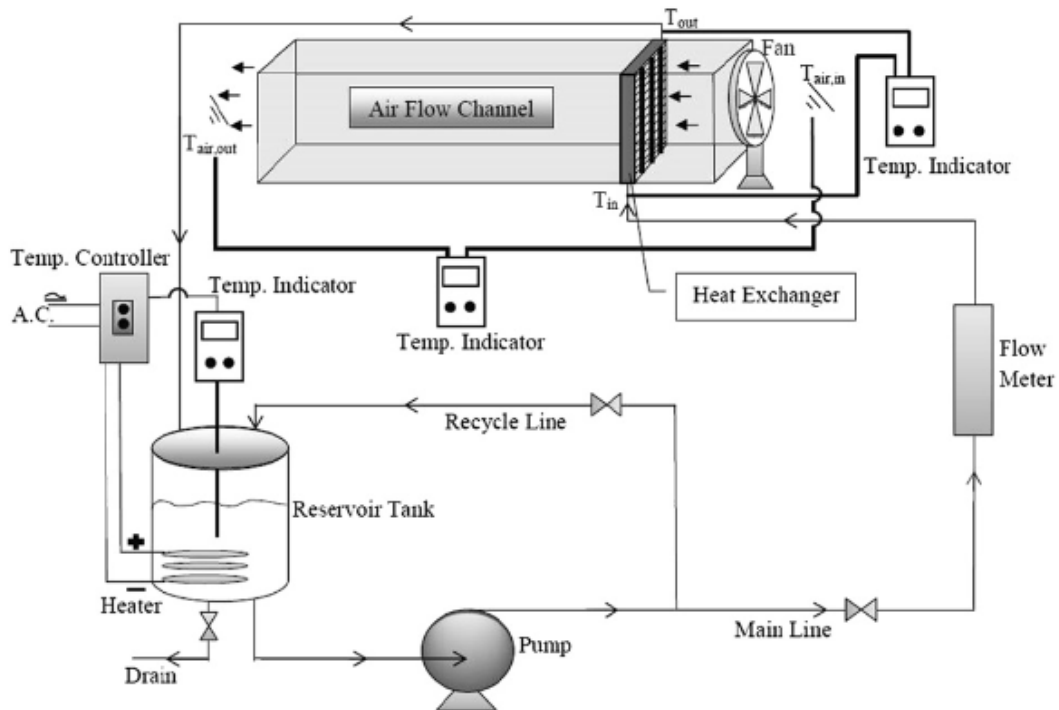


Figura 2.4 - Esquema da bancada experimental de (PEYGHAMBARZADEH et al., 2013)

(CHAVAN; PISE, 2013) investigaram a transferência de calor em um radiador usando nanofluidos de Al₂O₃ em água, com concentrações volumétricas entre 0,1% a 1%. Os testes foram conduzidos a 45°C, com vazão de nanofluido entre 3l/min a 8l/min. Foi observado um aumento na transferência de calor entre 40%-45% se comparado ao fluido base. Os autores observaram um aumento na transferência de calor com o aumento da vazão volumétrica de nanofluido.

(HUSSEIN; BAKAR; KADIRGAMA, 2014) estudaram o escoamento sob convecção forçada de nanofluidos em um radiador automotivo. Nanofluidos de SiO em água em concentrações volumétricas entre 1% a 2,5% escoam no radiador numa vazão volumétrica entre 2-8lpm. Foi observado um incremento superior a 40% no número de Nusselt do nanofluido se

comparado ao fluido base, assim como um aumento de 22% no fator de atrito na concentração de 2,5%. O esquema da bancada experimental adotada pode ser visto na Fig. 2.5.

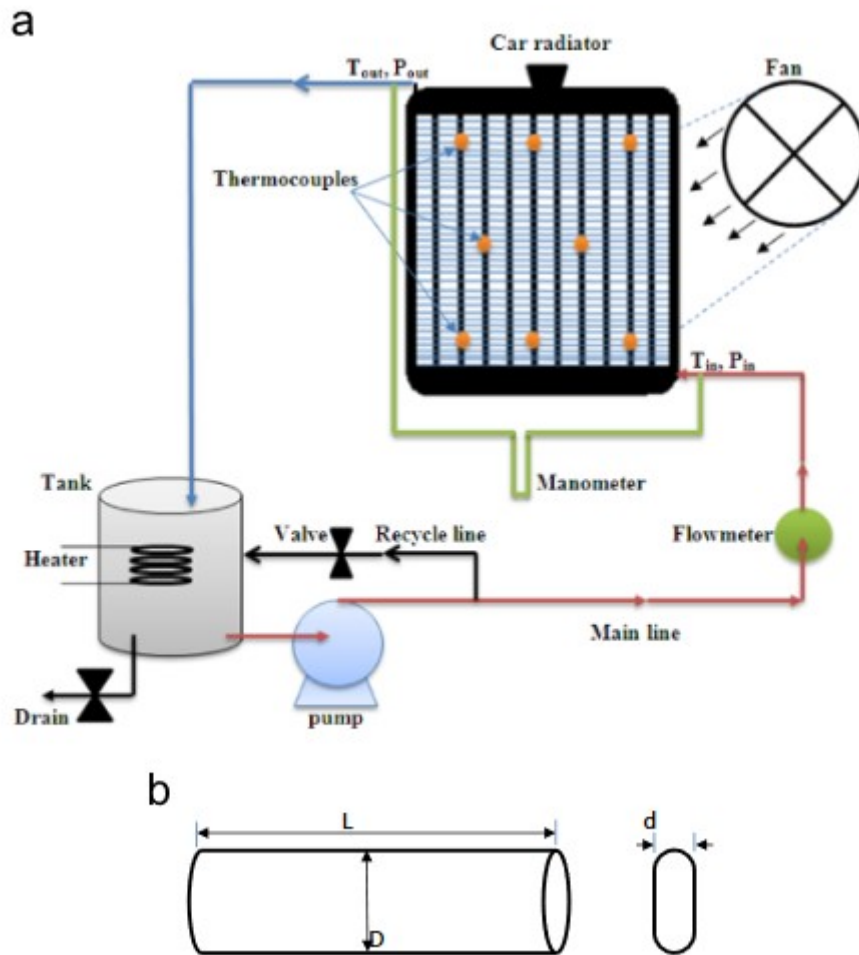


Figura 2.5 - Esquema da bancada experimental de (HUSSEIN; BAKAR; KADIRGAMA, 2014)

(CHOUGULE; SAHU, 2014) investigaram o efeito de diversas características sob o comportamento térmico de nanofluidos de CNT em água. Foram produzidos dois tipos de nanofluidos: CNT funcionalizado (FCNT) e CNT com surfactantes. Comparações entre diferentes pH para F-CNT, diferentes concentrações volumétricas e diferentes nanofluidos foram feitas. Os testes foram conduzidos na bancada esquematizada pela Fig. 2.6, a 90°C, com concentrações entre 0,15%-1% e vazão de nanofluido entre 2 a 5 litros por minuto. Os resultados mostraram um melhor desempenho para FCNT se comparado ao SCNT, sendo que o desempenho térmico do SCNT apresentou deterioração em elevadas temperaturas. Para a concentração de 1%, vazão de 5l/min e pH de 5,5, foi obtido um aumento de 90,76% no desempenho térmico do FCNT se comparado ao fluido base, sendo que em maiores pH, piores resultados foram obtidos.

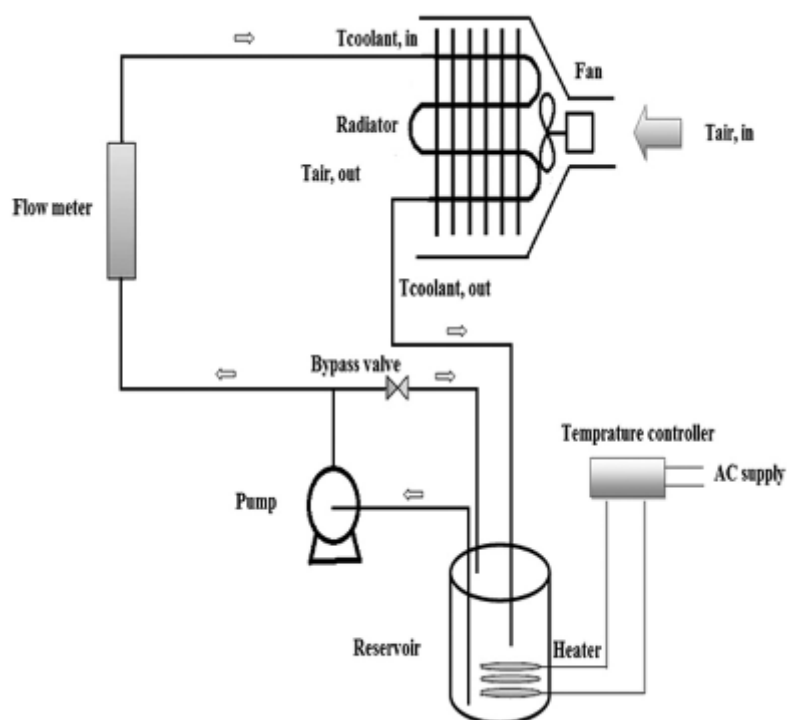


Figura 2.6 - Esquema da bancada experimental de (CHOUGULE; SAHU, 2014)

(VASUDEVAN NAMBEESAN et al., 2015) estudaram o desempenho térmico de nanofluidos de Al_2O_3 /água-etilenoglicol, na concentração volumétrica de 0,1%. Os testes conduzidos com temperaturas de entrada entre 40°C e 70°C estudaram o efeito da adição de etilenoglicol na água, assim como a adição de nanofluidos. Enquanto a adição de EG nas proporções 10% e 20% resultaram numa redução de 20% e 25% respectivamente no desempenho térmico do fluido base, a adição de nanofluidos na mistura água/EG na proporção 80:20 resultou em um aumento de 37% na taxa de transferência de calor, sendo que o aumento foi maior para maiores temperaturas.

(ALI et al., 2015) avaliaram o desempenho térmico de nanofluidos de MgO /água como fluido de trabalho de um radiador. Foram produzidos nanofluidos com concentrações volumétricas entre 0,06% e 0,12%. A temperatura de entrada do radiador foi mantida entre 56°C e 64°C , e a vazão volumétrica do nanofluido foi mantida entre 8-16 litros por minuto. O maior incremento no desempenho térmico foi de 31%, obtidos para a maior concentração e menor vazão dos testes. O efeito da variação da temperatura de entrada também foi estudado, e foi observado um aumento de 6% na taxa de transferência de calor ao variar a temperatura entre 56°C e 64°C .

(AMIRI et al., 2016) estudaram o comportamento de nanofluidos de nanofolhas de grafeno dopadas de nitrogênio (CNDG) em água-etilenoglicol como fluido de arrefecimento de um

radiador automotivo. As concentrações mássicas testadas variaram entre 0,001% e 0,01%. O desempenho do nanofluido foi avaliado entre as temperaturas 35°C e 55°C, com uma vazão entre 3 a 7 l/min de nanofluido. Foi observado um aumento de 83% no coeficiente de transferência de calor na concentração de 0,01% se comparado com o fluido base. Para essa mesma concentração, foi observado um aumento na perda de carga de 8% na temperatura de 35°C. Em uma mesma concentração, foi observado que o aumento da temperatura causou um decréscimo na perda de carga do sistema.

(DEVIREDDY; MEKALA; VEEREDHI, 2016) avaliaram o desempenho térmico de nanofluidos de TiO₂ em uma mistura de água-etilenoglicol. Nanofluidos com concentrações volumétricas entre 0,1%-0,5% escoaram em vazões entre 2-5l/min em um radiador automotivo. O esquema da bancada utilizada pode ser visto na Fig. 2.7. Foi obtido um aumento no desempenho térmico de 37%, sendo que os efeitos da variação da temperatura de entrada foram pouco representativos.

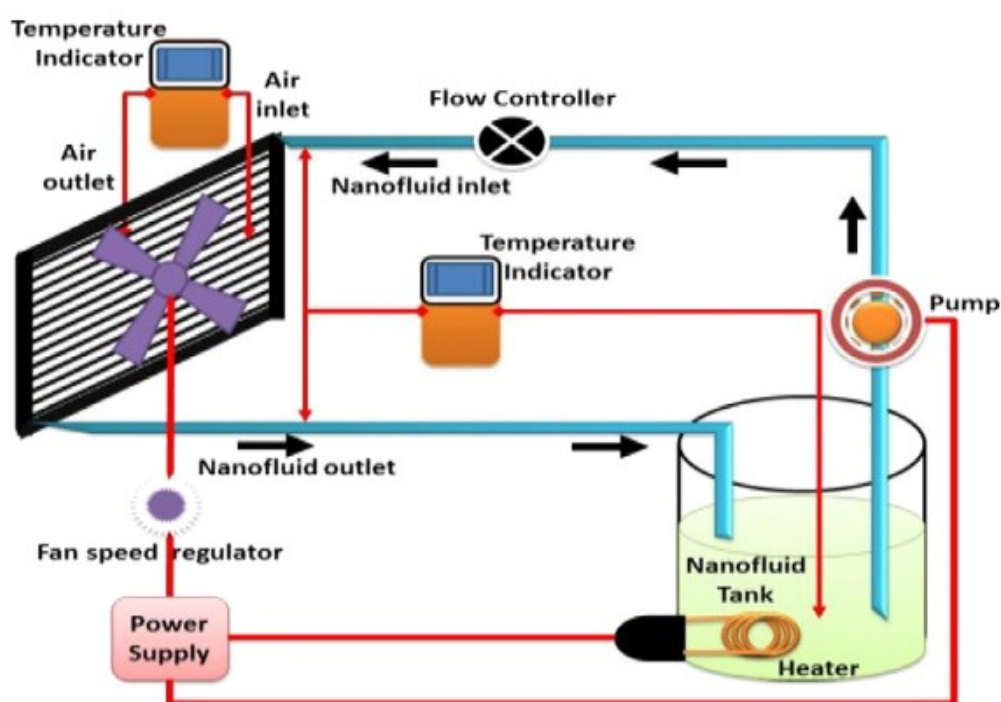


Figura 2.7 - Esquema da bancada experimental de (DEVIREDDY; MEKALA; VEEREDHI, 2016)

(M'HAMED et al., 2016) realizaram testes com nanofluidos de MWCNT/água-etilenoglicol em um radiador automotivo, com concentrações volumétricas entre 0,1% a 0,5%. O experimento foi conduzido em regime laminar, com vazão de nanofluido entre 2 a 6l/min e temperatura de entrada 85°C. Um aumento de 196,3% foi observado para o coeficiente de transferência de

calor, na concentração 0,5%. Os efeitos do número de Reynolds e concentração volumétrica também foram estudados, sendo que o aumento de quaisquer um desses parâmetros acarreta em um aumento no desempenho térmico do sistema.

(JADAR; SHASHISHEKAR; MANOHARA, 2017) estudaram a transferência de calor de nanofluidos de f-MWCNT/água em um radiador automotivo. Os experimentos foram conduzidos com vazões de fluido entre 0,5 a 2,5l/min, à temperatura de entrada constante de 45°C. Foi observado um aumento de 45% na taxa de transferência de calor se comparado ao fluido base.

(SUBHEDAR; RAMANI; GUPTA, 2018) estudaram o desempenho de nanofluidos de Al_2O_3 em uma mistura de água e mono etilenoglicol. Foram preparadas amostras de concentrações volumétricas entre 0,2% e 0,8%. Os testes de transferência de calor foram realizados entre 65°C e 85°C, com vazão entre 4 e 9 litros por minuto. Na vazão 4 litros por minuto, foi observado um incremento máximo no número de Nusselt de 28,47% se comparados ao fluido base.

(SAID et al., 2019) investigaram os efeitos da utilização de nanofluidos de TiO_2 e Al_2O_3 dispersos em uma mistura de água e etilenoglicol como fluido de arrefecimento automotivo. Foram produzidas amostras com concentrações volumétricas entre 0,05% e 0,3%. Os testes conduzidos a 80°C e vazão de fluido entre 0,5 e 3l/min mostraram que as amostras de maior concentração exibiram resultados melhores. A 1l/min, os nanofluidos de TiO_2 exibiram um aumento máximo em Nu de 14,99% enquanto os nanofluidos de Al_2O_3 exibiram um aumento máximo de 24,21% se comparados ao fluido base.

Na Tab. 2.4 é exibido de forma resumida os resultados experimentais para o desempenho térmico de nanofluidos em radiadores automotivos.

Tabela 2.4 - Resultados experimentais para o desempenho térmico dos nanofluidos em radiadores automotivos

Referência	Partícula	Tamanho	Fluido Base	Φ (%)	Incre-mento	T (°C)
(NARAKI et al., 2013)	CuO	Ø60nm	Água	0-0,4% vol.	↑8%	50-80°C
(PEYGHAMBARZA DEH et al., 2013)	CuO Fe2O3	Ø 60nm Ø 40nm	Água	0,15-0,65% vol.	↑9%	50-80°C

(CHAVAN; PISE, 2013)	Al ₂ O ₃	Ø 20nm	Água	0-1% vol.	↑40-45%	45°C
(BHIMANI; RATHOD; SORATHIYA, 2013)	TiO ₂	Ø 15nm	Água	0,1-1% vol.	↑45%	40-80°C
(HUSSEIN; BAKAR; KADIRGAMA, 2014)	SiO ₂	30nm	Água	1-2,5% vol.	Nu ↑40%	60-80°C
(NIEH; TENG; YU, 2014)	Al ₂ O ₃ TiO ₂	Ø 10-20nm Ø 20-30nm	50:50 Água/EG	0,5-2% wt,	↑25,6%	80-95°C
(ALI; EL-LEATHY; AL-SOFYANY, 2014)	Al ₂ O ₃	Ø 10nm	Água	0,1-2% vol.	↑14,79%	97°C
(CHOUGULE; SAHU, 2014)	FCNT SCNT	Ø 20-30nm, 3-8 µm comp	Água	0,15-1% vol.	Nu ↑90,76%	90°C
(VASUDEVAN NAMBEESAN et al., 2015)	Al ₂ O ₃	Ø 20nm	90:10 80:20 Água:EG	0,1% vol.	↑37%	40-70°C
(ALI et al., 2015)	MgO	Ø 20nm	Água	0,06- 0,12% vol.	↑31%	56-64°C
(AMIRI et al., 2016)	CNDG	Ø2.93 nm	40:60 Água:EG	0,001 - 0,01% wt,	h ↑83%	35-55°C
(DEVIREDDY; MEKALA; VEEREDHI, 2016)	TiO ₂	Ø21 nm	60:40 Água:EG	0,1-0,5% vol.	↑37%	35-45°C
(M'HAMED et al., 2016)	MWCNT	Ø 20-30nm comp 3-8 µm	50:50 Água:EG	0,1-0,5% vol.	↑196,3%	85°C
(SRINIVAS et al., 2016)	MWCNT	Ø 20-40nm comp 1-25 µm	Água	0,025- 0,1% wt.	↑94,9%	80-95°C

(JADAR; SHASHISHEKAR; MANOHARA, 2017)	f-MWCNT	Øint 16nm Øext 20nm Comp 20µm	Água	0,1% w/v	q ↑45%	45°C
(SELVAM et al., 2017)	GnP	-	Água/EG 70:30	0,1-0,5% vol.	U ↑104%	35-45°C
(SUBHEDAR; RAMANI; GUPTA, 2018)	Al ₂ O ₃	Ø 20nm	Água/Mon o EG 50:50	0,2-0,8% vol.	Nu ↑28,47%	65-85°C
(SAID et al., 2019)	TiO ₂ Al ₂ O ₃	Ø 5nm Ø 10nm	Água/EG 50:50	0,05%- 0,3% vol.	Nu ↑24,21%	80°C

CAPÍTULO III

PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

3.1 Síntese dos nanofluidos

Nanopartículas de prata de 20nm de diâmetro foram adquiridas na Nanostructured & Amorphous Materials e posteriormente diluída em mistura H₂O/EG (50:50), de modo a garantir as concentrações desejadas e suas características são exibidas na Tab. 3.1. O surfactante polivinilpirrolidona (PVP), presente na nanopartícula em uma razão 3:1, foi utilizado.

Tabela 3.1 - Propriedades físicas das nanopartícula de prata

Tamanho	20 [nm]
Pureza	99%
Concentração em massa de nanopartículas	25%wt.
Concentração em massa de aditivos (PVP)	74,8%wt.
Massa específica da nanopartícula	10400 [kg/m ³]
Calor específico da nanopartícula	0,240 [kJ/kgK]
Condutividade térmica da nanopartícula	430 [W/mK]

Os nanofluidos foram preparados pelo método de homogeneização em alta pressão. A homogeneização em alta pressão, também usado por CÁRDENAS (2017), consiste em um equipamento onde a mistura é pressurizada, por meio de pistões, e depois esse fluido é direcionado a uma câmara de interação. Nessa câmara, a combinação de elevadas taxas de cisalhamento, energia de cavitação induzida por grandes gradientes de pressão e impactos da mistura com as paredes é responsável por quebrar as aglomerações de nanopartículas, deixando-as dispersas de forma homogênea no fluido base. A Tab. 3.2 apresenta a concentração final das amostras após análises gravimétricas por evaporação, obtida a partir de várias medições realizadas com pequenas quantidades de volume para cada concentração preparada.

Tabela 3.2 - Concentrações finais das amostras

Amostra	Concentração em volume [%vol.]
PVP 1	0,001
PVP 2	0,002
PVP 3	0,003

As amostras também foram submetidas a 40 minutos de vibração ultrassônica. Ambos os processos tem como finalidade fornecer a energia necessária às amostras para quebrar as aglomerações, dispersando as nanopartículas no fluido base. A análise de estabilidade foi feita visualmente, sendo que após 10 dias não foi percebido nenhuma sedimentação, conforme mostrado na Fig. 3.1.

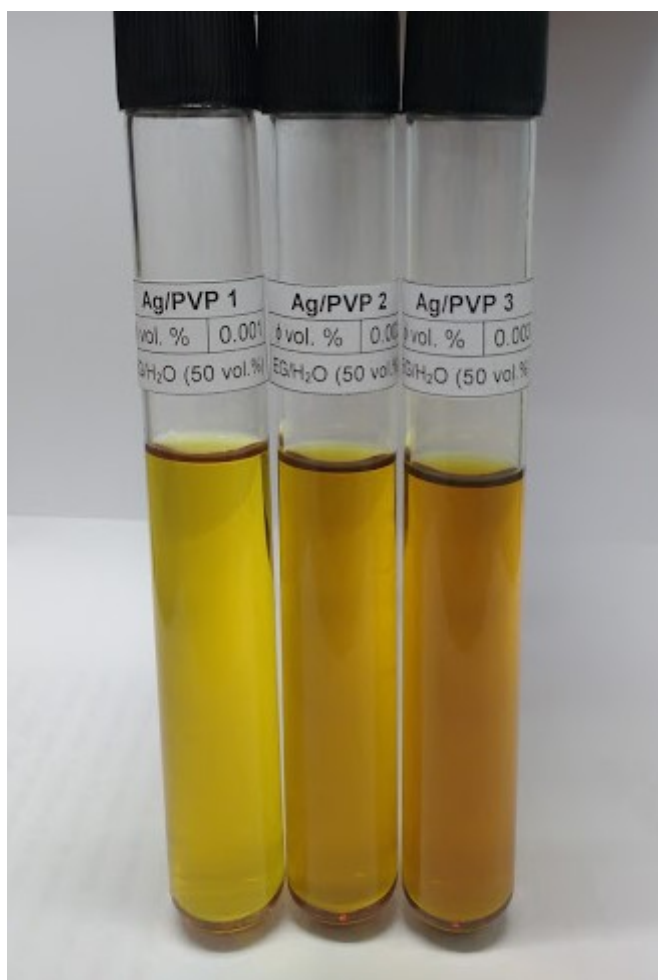


Figura 3.1 - Amostras após 10 dias da preparação.

3.2 Aferição das propriedades termofísicas

3.2.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica das amostras foi aferida com o auxílio do sensor Linesis THB-1, que opera pelo princípio da ponte quente transiente. Esse método pode ser considerado uma evolução do tradicional método do fio quente transiente, sendo que a medição é realizada de uma forma mais rápida e independente do operador.

O método do fio quente transiente, tradicionalmente utilizado por muitos pesquisadores, acompanha várias implicações que podem interferir nos resultados, tais como a perda de calor entre os condutores elétricos, baixa sensibilidade entre temperatura e tensão de saída do sensor e alta sensibilidade a tensão mecânica. O método da ponte quente transiente elimina parcialmente essas desvantagens aumentando a sensibilidade do sinal à temperatura devido a construção de uma ponte entre os pequenos resistores elétricos, que forma um condutor plano. Este condutor é dividido em dois resistores, de comprimentos diferentes, que resultam numa única fonte de calor.

A medição é realizada da seguinte forma: uma amostra de nanofluido é inserida em um recipiente onde o controle da temperatura é feito com auxílio de um banho térmico. O sensor é inserido na cavidade do recipiente, sendo que o nanofluido submerge completamente os resistores do sensor. O banho térmico da Microquímica, modelo MQBM-01, permite a seleção digital da temperatura do fluido com uma resolução de $0,1^{\circ}\text{C}$ e um intervalo de trabalho entre -20°C e $+150^{\circ}\text{C}$. Além disso, o equipamento tem capacidade para 9 litros, e uma capacidade de circulação de fluido de 6litros/min, permitindo uma boa homogeneização. Para melhorar o resultado dos testes, mantendo uma estabilidade na temperatura e reduzindo efeitos de convecção natural, antes de cada teste, o fluido do banho térmico é retirado de circulação e removido da cavidade. A Fig. 3.2 ilustra o reservatório das amostras e o banho térmico.



Figura 3.2 - Recipiente onde é realizada a medida de condutividade térmica (esquerda) e banho térmico (direita)

O equipamento THB-1, mostrado na Fig. 3.3, é diretamente conectado a um computador, onde através de um software próprio é possível visualizar e alterar os parâmetros de medição e visualizar os resultados.



Figura 3.3 - Sensor THB – 1 (Medição de condutividade térmica). Disponível em (<https://www.linseis.com/en/products/thermal-diffusivity-thermal-conductivity/>)

O processo de medição é baseado na Eq. 3.1 onde a condutividade térmica é inversamente proporcional a variação de temperatura pelo tempo.

$$k = \frac{q}{4\pi\Delta T} \ln(\Delta t) \quad (3.1)$$

Onde k é a condutividade térmica do líquido circundante, q representa o calor dissipado por unidade de comprimento, ΔT e Δt representam a variação de temperatura e tempo, respectivamente. Entretanto, esse cálculo só pode ser realizado na faixa de tempo onde possa ser considerado linear. Para isso, o software mostra o sinal de saída, que é proporcional a temperatura, em função do tempo. A derivada dessa função deve ser mantida praticamente constante no período para que seja possível determinar corretamente o valor da condutividade térmica.

O processo de medição da condutividade térmica é transiente, ou seja, depende do tempo de medição. Dessa forma, a potência dissipada e o tempo de aquisição dos dados devem ser ajustados de modo que a derivada da função do sinal de saída se mantenha constante no intervalo de aquisição do sinal para que a propriedade seja calculada.

Na interface principal do software, são mostrados os resultados obtidos nos testes realizados. No caso da impossibilidade de cálculo, um erro é exibido, sendo necessário ajustar os parâmetros de tempo de aquisição e corrente elétrica novamente. É importante ressaltar que os parâmetros ideais para a realização dos testes diferem entre fluidos diferentes, sendo necessário um ajuste individual para cada amostra antes do início dos testes.

3.2.2 Viscosidade dinâmica

A viscosidade dos nanofluidos foi medida pelo viscosímetro Anton Paar SVM 3000, ilustrado pela Fig. 3.4. O viscosímetro é dotado de um rotor que gira livremente sem atrito, sendo que a determinação da viscosidade é obtida na medição de parâmetros como torque e velocidade. A pequena célula de medição da viscosidade dinâmica contém um tubo em rotação com velocidade constante. Este tubo é preenchido com a amostra. Um outro tubo possui um ímã integrado (rotor) que flutua na amostra e gira livremente sem atrito. Devido à baixa densidade do rotor, ele é mantido centrado pela força centrífuga. O pequeno volume de amostra (~2,5 ml) permite mudanças extremamente rápidas de temperatura (por efeito Peltier) e tempos de estabilização muito curtos. A viscosidade dinâmica é calculada a partir da velocidade do rotor.



Figura 3.4 - Viscosímetro rotaciona Anton Paar SVM 3000.

3.3 Bancada Experimental

A bancada experimental para avaliar o desempenho termohidráulico de nanofluidos em radiadores se encontra no Laboratório de Energia, Sistemas Térmicos e Nanotecnologia da Universidade Federal de Uberlândia. Ela permite trabalhar em condições muito próximas à de um sistema de arrefecimento automotivo, e é composto por dois circuitos: um circuito quente, onde o fluido de trabalho circula, e o circuito frio, onde o ar circula.

O circuito quente representa o sistema de circulação do fluido de arrefecimento automotivo. Dentre os equipamentos que o compõe, os principais são o radiador automotivo, uma bomba de engrenagens para circular o fluido, e um banho termostático que aquece o fluido, simulando a carga térmica gerada por um motor automotivo.

O circuito frio é composto principalmente por um túnel de vento que pode operar em circuito aberto ou fechado, um ventilador cuja variação da frequência de operação permite um ajuste fino da vazão de ar, e uma placa de bocais para um ajuste grosseiro da vazão.

A bancada é dotada de um sistema de aquisição de dados, onde as vazões e temperaturas de ambos os circuitos são medidas em pontos específicos e enviadas à um computador, onde através de um software criado em LabView, os dados podem ser analisados. A Fig. 3.5 mostra um diagrama esquemático da bancada experimental.

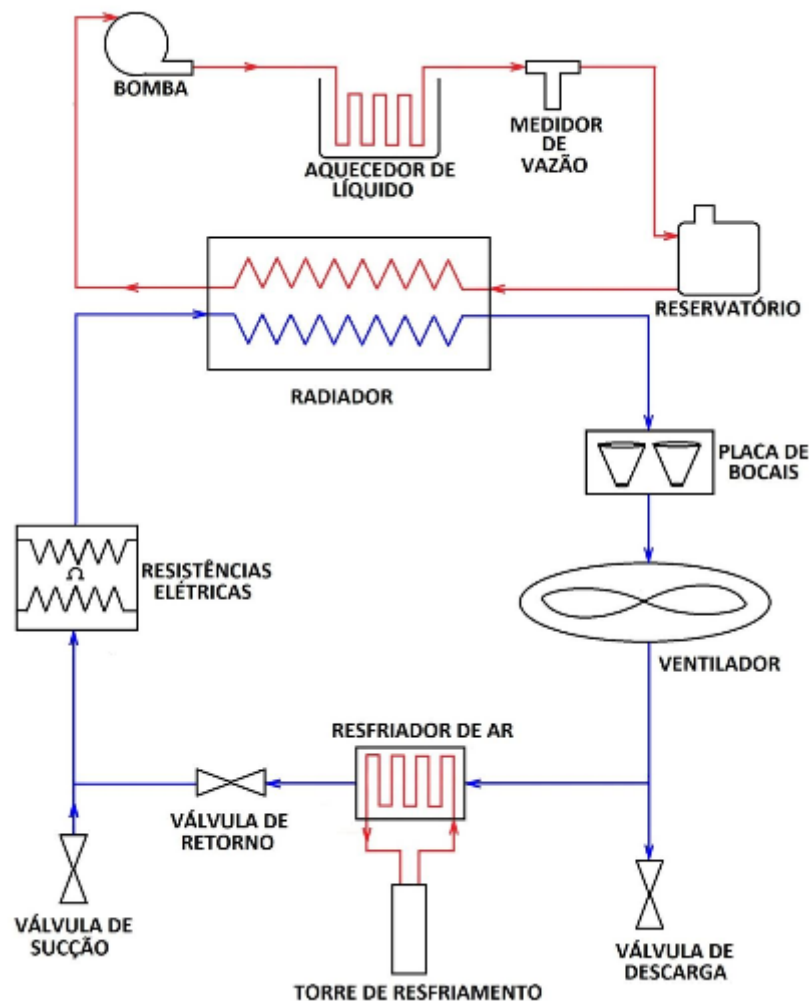


Figura 3.5 – Diagrama esquemático da bancada experimental (OLIVEIRA, 2016)

3.3.1 Circuito Frio

Para a avaliação do desempenho termohidráulico em radiadores automotivos, a bancada conta com um túnel de vento. A circulação do ar é induzida por um ventilador centrífugo com capacidade para fornecer uma vazão de até $10000\text{m}^3/\text{h}$, onde a frequência de operação é controlada por um inversor de frequência. O circuito frio pode operar de forma aberta ou fechada, sendo que para isso o túnel possui válvulas tipo damper.

A bancada também conta com uma placa contendo 5 bocais, dispostos de acordo com a ASHRAE STANDARD 41.2, que estabelece que a distância entre os centros dos bocais e entre o centro do bocal e a parede de um duto adjacente devem ser, respectivamente, três vezes e uma vez e meia o diâmetro da garganta do bocal. A placa de bocais é ilustrada pela Fig. 3.6.

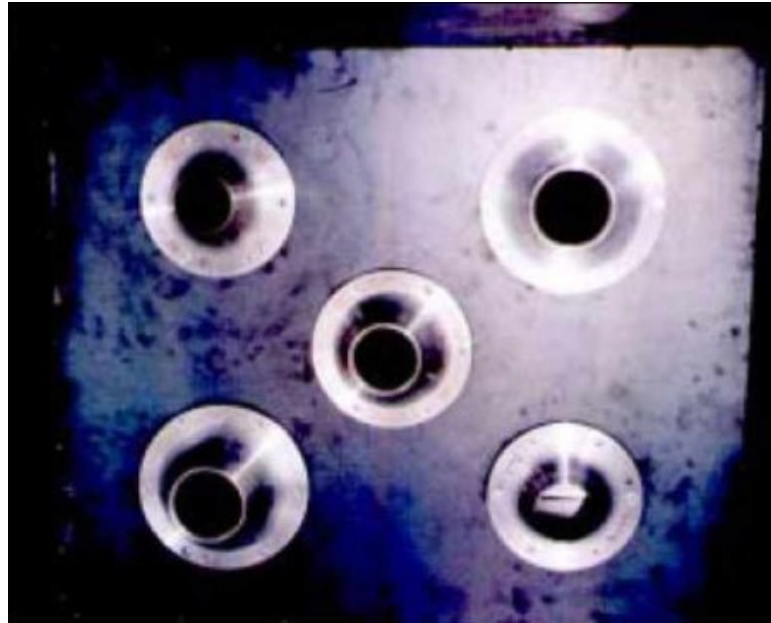


Figura 3.6 - Placa de bocais

A vazão do ar é determinada também de acordo com a ASHRAE STANDARD 41.2. Ao passar pelo bocal, o ar sofre uma perda de carga, que é correlacionada com a vazão do ar em circulação. A vazão do ar é aferida por dois equipamentos. O primeiro é manômetro analógico diferencial em U, que através da altura da coluna de água permite medir o diferencial de pressão. O segundo é um transdutor diferencial de pressão do tipo LD301, da empresa SMAR, em que um sinal elétrico é gerado proporcional a deformação de um diafragma existente em seu interior.

O controle da vazão do ar pode ser feito de duas formas. Alternar o número de bocais abertos proporciona um controle grosseiro da vazão enquanto alternar a frequência de operação do ventilador proporciona um ajuste fino da vazão.

Dessa forma, o cálculo da vazão do ar é determinado de forma indireta pela queda de pressão do ar ao passar pela placa de bocais. Para isso, a vazão de cada bocal é calculada, e posteriormente somada, como mostra a Eq. 3.2:

$$i' = \sum m_i \cdot Cd_i \quad (3.2)$$

onde i' é a vazão teórica do ar. A vazão de cada bocal, m_i , e o coeficiente de descarga de cada bocal, Cd_i , são obtidos nas Eq. 3.3 e 3.4:

$$i \cdot \sqrt{\frac{\rho_{ar} \cdot \Delta P_{ar}}{2}} \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{A_i}{A_{pleno}} \right)^2} \quad (3.3)$$

$$Cdi = 0,9975 - 0,00653 \left(\frac{10^6}{Re_{d,i}} \right)^a \quad (3.4)$$

Onde A_i representa a área do bocal i medida na descarga do mesmo, A_{pleno} é a área total do pleno onde a placa de bocais está instalada e ρ_{ar} e ΔP_{ar} representam a densidade do ar e a queda de pressão do ar ao passar pelo bocal.

O número de Reynolds na descarga do bocal i , $Re_{d,i}$, pode ser calculado pela Eq. 3.5:

$$Re_{d,i} = \frac{4 \cdot i}{\pi \cdot d_i \cdot \mu_{ar}} \quad (3.5)$$

Em que μ_{ar} é a viscosidade dinâmica do ar, e d_i é o diâmetro do bocal i . Assim, os valores de a na Eq. 3.4 são obtidos através da seguinte relação:

$$a=0,5 \text{ se } Re_{d,i} < 10^6$$

$$a=0,2 \text{ se } Re_{d,i} > 10^6$$

A temperatura na seção de testes é controlada com o auxílio de um conjunto de resistências elétricas fixadas a montante da seção de testes. O conjunto de resistências possuem uma potência nominal de 6KW, e estão conectadas a um conversor de potência, que controla a potência dissipada entre zero e a potência nominal. A potência dissipada é controlada de acordo com o seu sinal de entrada, que é do tipo 4-20mA.

O sinal recebido pelo conversor de potência é gerado por uma placa de aquisição de dados da National Instruments. O controlador é sintonizado com um controlador PID retroalimentado, que modifica o sinal recebido pelo conversor através da medida da temperatura dos termopares localizados a montante da seção de testes. Para sintonizar o controlador, foi utilizado o método caixa preta, que consiste em aplicar um distúrbio de entrada, com a finalidade de gerar uma resposta natural no sistema, criando uma função de transferência que caracterize tal comportamento.

A temperatura do ar foi medida através de duas grades de 16 termopares cada, a montante e a jusante do radiador, obtendo uma distribuição média da temperatura em cada seção. A distribuição dos termopares pode ser vista na Fig. 3.7.

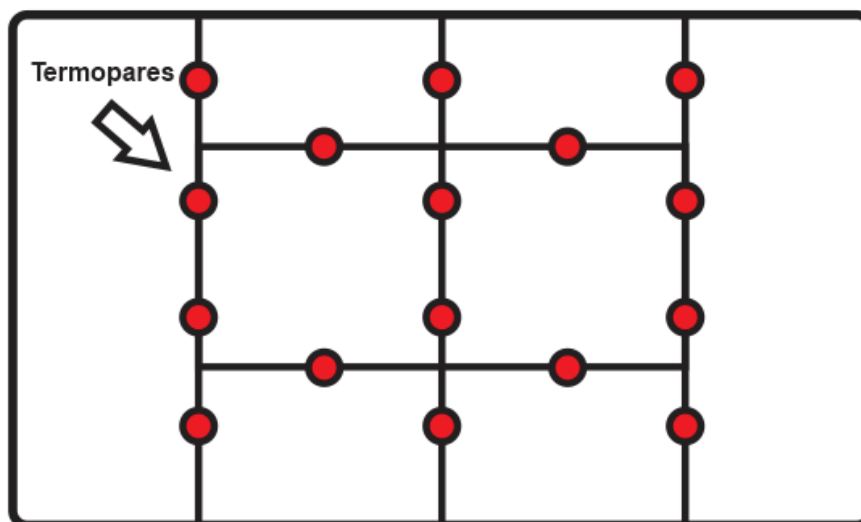


Figura 3.7 - Diagrama esquemático do posicionamento dos termopares no túnel de vento.

Um termohigrômetro OMEGA RHXLL35D foi posicionado na entrada do túnel de vento, sendo esse sensor capaz de fornecer também a medição da umidade relativa, ponto de orvalho e temperatura de bulbo seco. Um segundo sensor também foi utilizado, e foi posicionado na entrada da seção de testes. Esse sensor é constituído por um termopar tipo T envolto por um pavio, dotado de um sistema de goteio, mantendo o pavio sempre molhado.

3.3.2 Circuito Quente

O circuito quente, ou de fluido de arrefecimento conta com um reservatório de líquido localizado logo antes da seção de entrada do radiador, e no ponto mais elevado do circuito quente. Além de armazenar o líquido de arrefecimento, o reservatório é responsável por manter a bomba completamente afogada e por manter todas as tubulações preenchidas por fluido. O reservatório também conta com uma tampa que é uma válvula controladora de pressão.

Para a circulação do fluido no sistema, foi utilizado uma microbomba da empresa MICROPUMP com capacidade de bombear até 12l/min, sendo capaz de operar em elevadas temperaturas. Essa é uma microbomba de deslocamento positivo, permitindo vazão mássica de fluido constante em qualquer ponto do circuito. A bomba sofre poucos danos ao trabalhar com nanofluidos, pois apresenta engrenagens não metálicas, apresentando menor desgaste

e não degradando as nanopartículas. A bomba é conectada a um inversor de frequência que permite variar a vazão de fluido. A Fig. 3.8 ilustra a microbomba utilizada.



Figura 3.8 – Microbomba e motor

O sistema possui um banho termostático em que uma resistência elétrica ligada a um termostato é responsável por controlar a temperatura do banho. O termostato, dotado de função liga desliga, opera com base em valores de temperatura máximos e mínimos preestabelecidos, permitindo um controle preciso da temperatura do banho termostático. Para realizar a homogeneização da temperatura, uma bomba de recirculação de 0,75KW foi instalada. O fluido de arrefecimento circula por uma serpentina de cobre imersa no fluido do banho térmico, aquecendo-o, simulando dessa forma, a carga térmica gerada por um motor automotivo. O banho termostático e a serpentina estão ilustrados na Fig. 3.9.



Figura 3.9 - Banho térmico e serpentina

A temperatura do fluido de arrefecimento foi medida na entrada e na saída do radiador, usando dois sensores do tipo RTD (do inglês: *Resistance Temperature Detector*). A pressão do fluido foi medida usando um transdutor diferencial de pressão.

A vazão mássica do fluido foi medida por um medidor do tipo Coriolis, da empresa Metroval, modelo RHM-6. Esse equipamento é preciso e é capaz de medir numa faixa de vazão de 0-0,160kg/s.

Por ser uma bancada para avaliar o desempenho de trocadores de calor automotivos, um radiador foi posicionado na seção de testes, dentro do túnel de vento, entre as duas grades de termopares. O radiador fornecido pela empresa FIAT é do modelo comumente utilizado nos veículos Palio e Uno. Na Fig. 3.10 é possível observar o radiador instalado dentro do túnel de vento.



Figura 3.10 - Posicionamento do radiador no túnel de vento

3.3.3 Aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados conta com um chassi NI Compact cDAQ-9178XT da NATIONAL INSTRUMENTS, que possui 8 módulos de expansão instalados, responsáveis por coletar os sinais necessários ao monitoramento, supervisão e controle das grandezas físicas envolvidas no funcionamento da bancada. A Fig. 3.11 mostra o chassi e a placa de aquisição de dados.

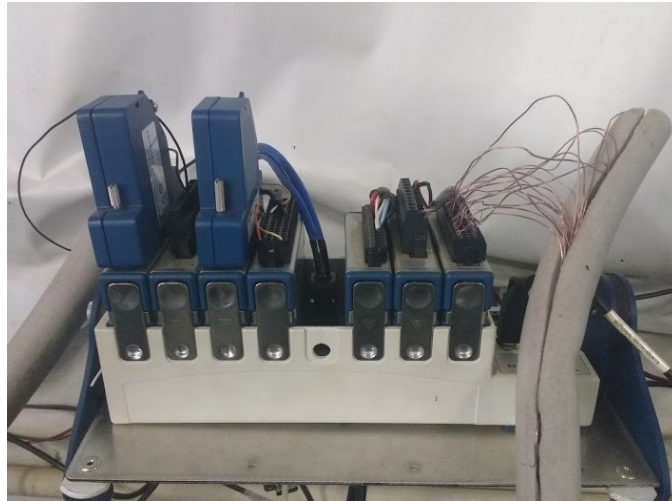


Figura 3.11 - Chassi e placas de aquisição de dados

Os dados adquiridos são coletados por um computador, onde através de um programa desenvolvido em LabView® os sinais são condicionados e podem ser analisados. O programa coleta os dados em tempo real, e é programado para salvar dados conforme comando do operador. Dessa forma, assim que a bancada atinge o regime permanente, é iniciada a coleta dos dados.

Na Tab. 3.3 estão retratadas as variáveis lidas pelo sistema de aquisição de dados, além da posição dos sensores na bancada e o número de sensores em cada posição.

Tabela 3.3 - Variáveis lidas pelo sistema de aquisição de dados, além do posicionamento e número de sensores

Circuito	Variável	Posição	Número de sensores
Quente	Temperatura	Entrada do radiador	1
	Temperatura	Saída do radiador	1
	Pressão diferencial	Entrada e saída da bomba	1
	Vazão	Saída serpentina	1
Frio	Temperatura	Antes do radiador	16
	Temperatura	Após radiador	16
	Pressão diferencial	Antes e após placa de bocais	2
	Umidade relativa	Antes do radiador	1

Na Fig. 3.12, é mostrada uma vista geral da bancada, onde é possível visualizar e identificar a maior parte dos componentes descritos anteriormente.



Figura 3.12 - Bancada experimental

3.4 Metodologia e Análise experimental

A fim de avaliar a importância dos parâmetros analisados para avaliar o desempenho termohidráulico dos fluidos estudados, obtendo uma confiabilidade desejável aos resultados, os testes foram conduzidos em regime permanente.

Dessa forma, a Tab. 3.4 mostra de forma resumida os fluidos analisados e as condições de operação da bancada durante a realização dos ensaios experimentais.

Tabela 3.4 - Condições de ensaio do presente trabalho na bancada experimental

Condições de ensaio	
Fluido Base	Água/Etilenoglicol (50:50) % vol.
Nanopartícula	Prata
Aditivos	PVP
Concentração das nanopartículas (% vol.)	0,001, 0,002, 0,003
Temperatura de entrada do líquido (°C)	60, 70, 80
Vazão mássica do líquido (g/s)	80, 85, 90, 95
Temperatura de incidência do ar (°C)	25

3.4.1 Operação da bancada e estabilização

O equipamento foi iniciado da seguinte forma para a realização dos ensaios:

1. O sistema de aquisição de dados é ligado para verificar e monitorar as variáveis medidas.
2. A resistência do banho térmico é ligada, juntamente com o sistema liga e desliga, para que o fluido de arrefecimento atinja sua temperatura de trabalho. Após isso, o sistema de recirculação do fluido do banho térmico é ligado.
3. A frequência de operação do ventilador e da bomba foram ajustadas de acordo com as operações de trabalho.
4. A resistência elétrica para controle da temperatura do ar foi iniciada.
5. O controle PID responsável por manter a temperatura de entrada do ar foi iniciado.
6. A bancada opera livremente até atingir as condições de testes, ou seja, até atingir o regime permanente.

A condição de regime permanente se refere a condição na qual o sistema se encontra estável. Variações nas condições do ar ambiente, bolhas presentes no fluido de arrefecimento ou ruídos no sistema de aquisição de dados são barreiras à obtenção de um regime estável.

Para obter a estabilidade, são monitoradas as oscilações nos valores de temperatura, pressão e vazão mássica de fluido. Dessa forma, quando as oscilações nos valores dessas variáveis são mínimas, o sistema é considerado estável.

3.4.2 Modelagem matemática

A figura central do sistema é o radiador. É nele onde acontecem as trocas térmicas, ocorrendo a transferência de calor do fluido de arrefecimento (circuito quente) para o ar (circuito frio). A fim de simplificar a modelagem do sistema, e considerando as condições nas quais foram realizados os testes, assume-se que o sistema se encontra em regime permanente. Além disso, são consideradas as seguintes hipóteses:

- Sistema adiabático;
- Temperatura do fluido de arrefecimento constante na entrada e saída do radiador;
- Vazões mássicas de ar e fluido de arrefecimento constantes;
- Não ocorrem reações químicas no sistema;
- Mudanças de energia cinética e potencial são desprezíveis;
- Não há mudança de fase do fluido ao escoar pelo radiador;
- O coeficiente de transferência de calor individual e global são constantes ao longo do radiador;
- O calor específico de cada fluido é considerado constante ao longo do radiador, sendo dessa forma, a taxa de capacidade de calor considerada constante de cada lado;
- Eficiência das aletas consideradas constantes e uniformes;
- A velocidade e temperatura de entrada em cada lado do fluido são consideradas uniformes ao longo da seção transversal do escoamento.

3.4.3 Determinação da taxa de transferência de calor

A taxa de transferência de calor do sistema é determinada através de cálculos, ao se considerar que há transferência de calor entre o circuito quente e o circuito frio. O balanço energético é obtido a partir da primeira lei da termodinâmica, conforme Eq. 3.6:

$$\dot{Q} = \dot{m} C_p \Delta T \quad (3.6)$$

Como o sistema é considerado adiabático, e os fluidos não podem apresentar mudança de fase, a transferência de calor entre o circuito frio e quente é dado pelas Eq. 3.7 e 3.8:

$$Q_q = Q_f \quad (3.7)$$

$$\left(\dot{m}_q C_{p,q} (T_{q,i} - T_{q,e}) \right) = \left(\dot{m}_f C_{p,f} (T_{f,i} - T_{f,e}) \right) \quad (3.8)$$

onde os subscritos q e f se referem aos lados quente e frio respectivamente.

Para trocadores de calor onde as temperaturas de entrada e saída são conhecidas, o coeficiente de transferência de calor (U) pode ser determinado a partir das médias logarítmicas (T_{lm}), como descrito na Eq. 3.9:

$$Q = F \cdot U \cdot A \cdot \Delta T_{ml} \quad (3.9)$$

A média logarítmica das temperaturas é determinada pela Eq. 3.10:

$$\Delta T_{lm} = \frac{T_1 - T_2}{\ln\left(\frac{\Delta T_1}{\Delta T_2}\right)} \quad (3.10)$$

(F) é um valor de correção para o cálculo de (U), devido às equações originais terem sido desenvolvidas para trocadores de calor de tubos. Entretanto, para trocadores de calor em escoamento cruzado, o valor de (F) é próximo a 1, sendo considerado 1 nos cálculos com a finalidade de simplificação. Os gradientes de temperatura ΔT_1 e ΔT_2 são determinados conforme as Eq. 3.11 e 3.12:

$$\Delta T_1 = T_{in,liq} - T_{out,ar} \quad (3.11)$$

$$\Delta T_2 = T_{out,liq} - T_{in,ar} \quad (3.12)$$

3.5 Incertezas de medição

As grandezas descritas no presente trabalho se subdividem em grandezas medidas e grandezas calculadas. As grandezas medidas são obtidas através da medição direta pelos sensores e transdutores posicionados ao longo da bancada, sendo exemplo dessas grandezas a temperatura ou diferencial de pressão. Já as grandezas calculadas, como a taxa de transferência de calor, são derivadas das grandezas medidas, assim como suas incertezas. O cálculo das incertezas das grandezas calculadas foi realizado com o auxílio do software EES.

O programa utiliza o método de propagação de incertezas descritos nas normas técnicas do NIST (TAYLOR; KUYATT, 2001). Segundo a norma, assumindo que as medidas individuais são independentes e aleatórias, a propagação de incerteza para uma variável calculada Y pode ser determinada através da Eq. 3.13.

$$U_Y = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial Y}{\partial X_i} \right)^2 \cdot U_{X_i}^2} \quad (3.13)$$

Onde U_Y representa a incerteza da variável calculada e U_{X_i} representa a incerteza da variável medida i . A Tab. 3.5 mostra as incertezas dos principais parâmetros medidos e calculados

Tabela 3.5 - Incerteza dos parâmetros medidos e calculados

Instrumento	Parâmetro	Incerteza
Parâmetros medidos		
Termopar tipo T	$(T_{in}, T_{out})_{ar}$	$\pm 0,2^\circ\text{C}$
RDT PT100	$(T_{in}, T_{out})_{liq}$	$\pm 0,1^\circ\text{C}$
Transdutor de pressão diferencial da bomba	$(\Delta P)_{liq}$	$\pm 0,25\%$
Transdutor de pressão diferencial dos bocais	$(\Delta P)_{ar}$	$\pm 0,075\%$
Medidor de Vazão tipo Coriolis	\dot{m}_{liq}	$\pm 0,15\%$
Temperatura de bulbo úmido	(T_{bu})	$\pm 0,8^\circ\text{C}$
Viscosímetro	μ	$\pm 0,35\%$
Condutímetro	k	$\pm 3\%$
Balança analítica	m	$\pm 0,0001\text{g}$
Parâmetros calculados		
Taxa de transferência de calor	\dot{Q}	$\pm 3\%$
Temperatura média logarítmica	T_{ml}	$\pm 0,3^\circ\text{C}$
Vazão de ar	\dot{m}_{ar}	$\pm 0,012\%$

CAPÍTULO IV

RESULTADOS

4.1 Propriedades termofísicas

Nessa seção, são apresentados os resultados obtidos para os testes de condutividade térmica e viscosidade realizados. Foram preparadas três amostras de nanofluido de prata em água/EG (50:50 vol%), de concentrações nominais 0,001%, 0,002% e 0,003% utilizando polivinilpirrolidona (PVP) como surfactante, denominadas PVP1, PVP2 e PVP3 respectivamente.

4.1.1 Condutividade térmica

A condutividade térmica dos nanofluidos e do fluido base foram aferidas utilizando o sensor Linesis THB-1, que opera pelo método da ponte quente transiente. A faixa de temperatura dos testes foi de 25°C a 55°C, com intervalos de 10°C em 10°C. A fim de assegurar uma melhor confiabilidade dos resultados, os testes foram repetidos 10 vezes para cada temperatura. Os valores de condutividade térmica do fluido base foram verificados com valores teóricos tabelados (ASHRAE, 2017), sendo que um desvio máximo de 3% foi observado, conforme Fig. 4.1.

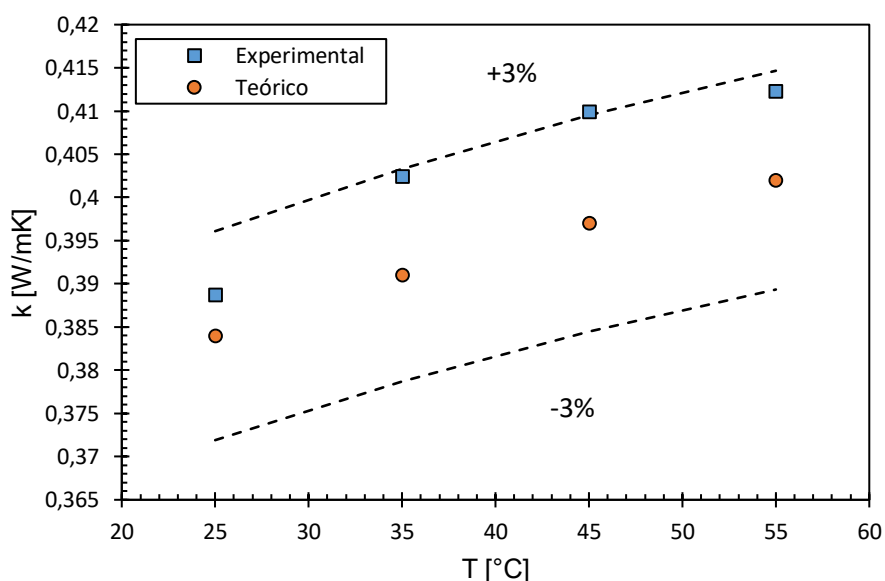


Figura 4.1 - Comparação dos resultados experimentais para a condutividade térmica com a teoria para o fluido base (Água/EG 50:50)

Os resultados mostram uma tendência do aumento da condutividade térmica com o aumento da temperatura dos testes realizados. Aumentar a concentração de nanopartículas se mostrou eficaz até 0,002 vol%, sendo que acima desse valor, houve uma degradação na condutividade térmica.

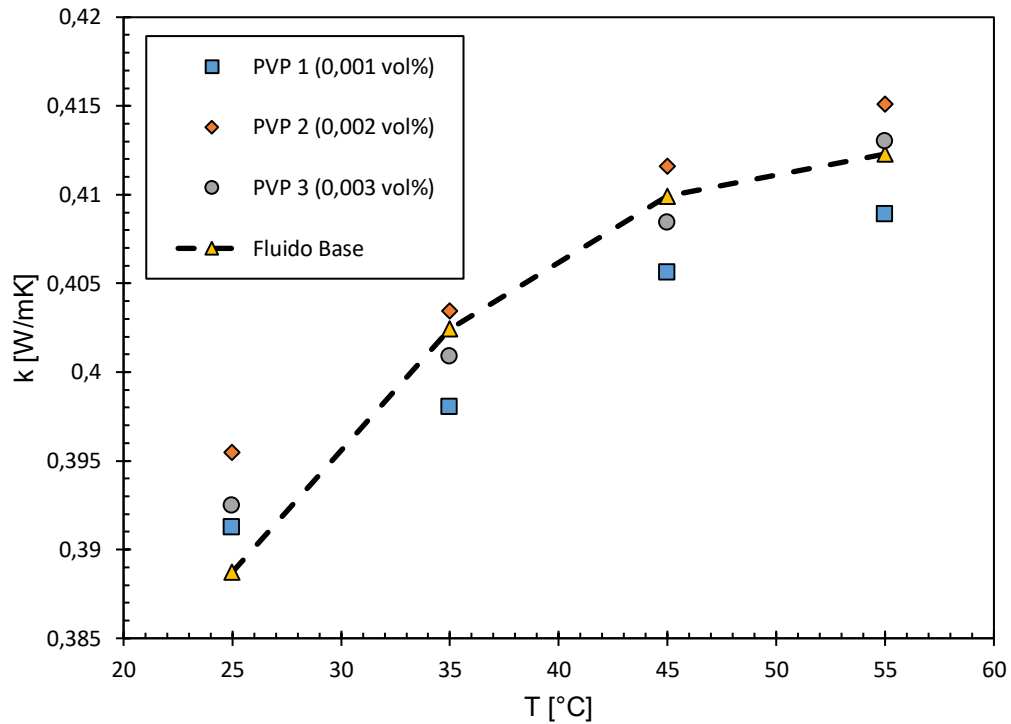


Figura 4.2 - Condutividade térmica dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas

A Fig. 4.2 permite uma visualização mais detalhada dos aumentos da condutividade térmica das amostras relativas ao fluido base. É possível observar que para todos os nanofluidos analisados, a 25°C os resultados são mais promissores. Para as demais temperaturas estudadas, mesmo demonstrando um comportamento crescente com o aumento da temperatura, a condutividade térmica se mostrou inferior aos testes em 25°C, exibindo casos onde o nanofluido se mostrou inferior ao fluido base.

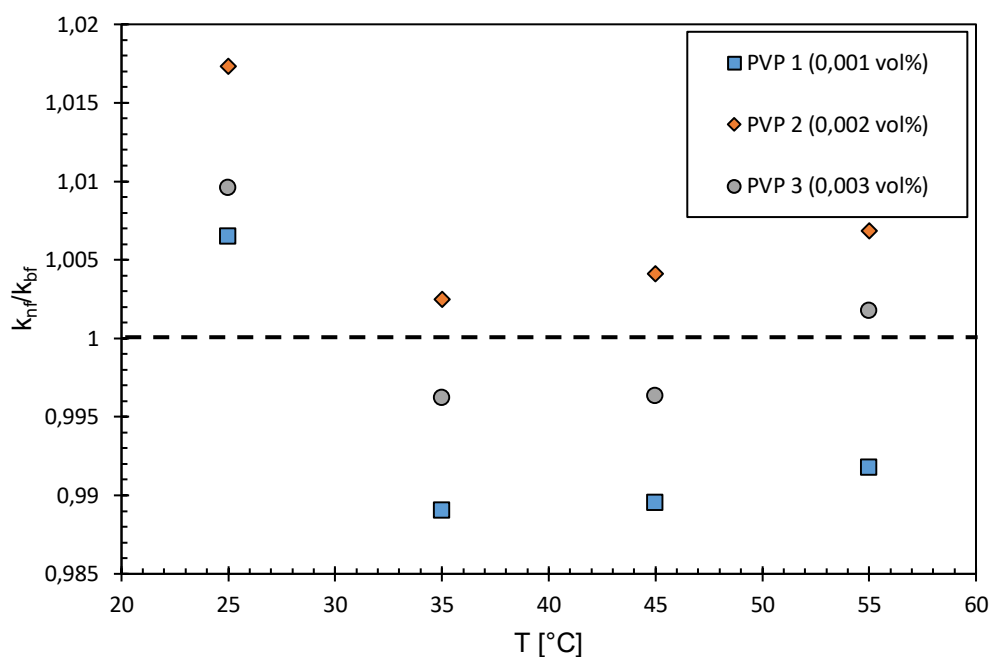


Figura 4.3 - Condutividade térmica relativa dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas

É importante ressaltar que os aumentos obtidos foram baixos, conforme mostrado na Fig. 4.3. A 25°C, PVP2, a amostra com melhores resultados se comparada as demais, exibiu um incremento de apenas 1,7% se comparado ao fluido base. Além disso, acima de 35°C, as amostras PVP1 e PVP3 se mostraram majoritariamente inferiores ao fluido base, com decremento máximo observado de 1% à 35°C para PVP1.

É possível inferir que fatores, como a baixa concentração, ou a quantidade incorreta de surfactante adicionada ao nanofluido, foram responsáveis pela qualidade dos resultados obtidos. Estudos como o de (XIA et al., 2014) relatam a existência de uma concentração ótima de surfactante, na qual a condutividade térmica e estabilidade do nanofluido são superiores às demais concentrações. No presente estudo, o surfactante foi previamente adicionado às nanopartículas pelo fabricante, numa razão mássica de 3:1, sendo que essa concentração possivelmente não é a ideal para as amostras analisadas.

4.1.2 Viscosidade dinâmica

A viscosidade dinâmica dos nanofluidos e do fluido base foram medidas experimentalmente com o auxílio do viscosímetro rotacional Stabinger SVM 3000 da Anton Paar. Os resultados obtidos para o fluido base foram conferidos com os valores teóricos (ASHRAE, 2017), exibindo um desvio máximo de 4,3%, conforme Fig. 4.4.

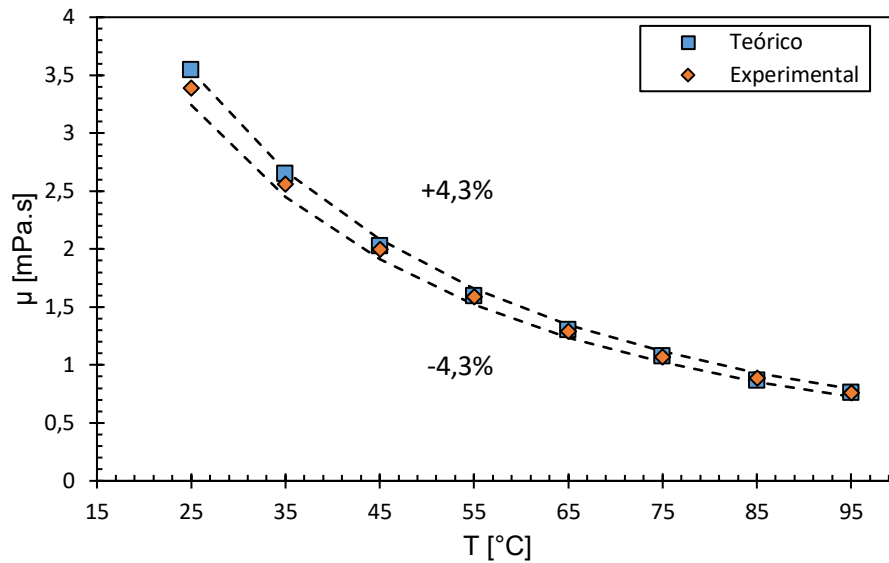


Figura 4.4 - Comparação dos resultados experimentais para a viscosidade dinâmica com a teoria para o fluido base (Água/EG 50:50)

A Fig. 4.5 mostra que a viscosidade dos fluidos analisados diminuiu com o aumento da temperatura, como era de se esperar. O aumento na temperatura enfraquece as forças adesivas entre as moléculas de fluido, sendo necessária uma menor força para cisalhar as moléculas de fluido.

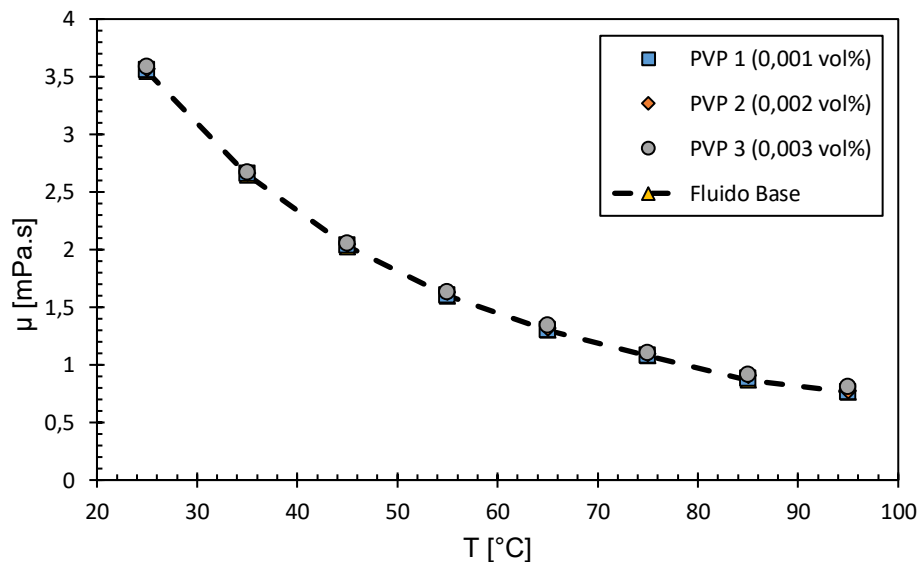


Figura 4.5 – Viscosidade dinâmica dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas

Na Fig. 4.6, fica claro que aumentar a concentração de nanopartículas provocou um aumento na viscosidade do nanofluido. Esse efeito é percebido para todas as temperaturas analisadas, se tomando mais pronunciável com o aumento da temperatura. Contudo, os incrementos na viscosidade não foram tão pronunciáveis, com um máximo de 5,6% a 85°C para a amostra PVP3, sendo possível inferir que os nanofluidos apresentam um comportamento semelhante ao do fluido base.

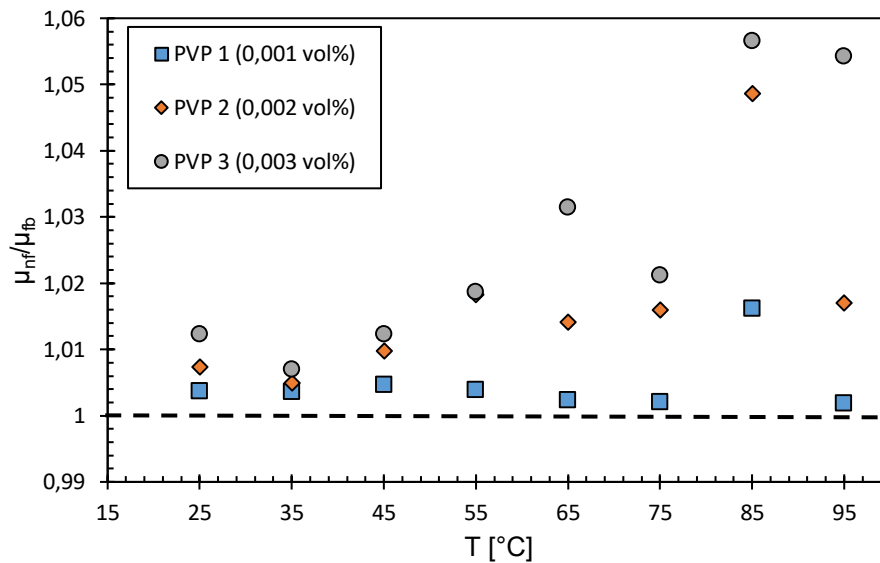


Figura 4.6 - Viscosidade dinâmica relativa dos nanofluidos em função da temperatura e concentração volumétrica de nanopartículas

4.2 Desempenho Termohidráulico

Nessa seção, são exibidos os resultados relativos ao desempenho térmico dos nanofluidos em um radiador automotivo se comparados ao fluido base, com a finalidade de avaliar a viabilidade dos ditos nanofluidos. É válido lembrar que os testes foram realizados com temperaturas de entrada no radiador entre 70°C e 90°C, com vazão mássica variando entre 80g/s e 95g/s, sendo a temperatura de entrada do ar mantida constante, a 25°C, para todos os testes.

4.2.1 Taxa de Transferência de Calor

O resultado do cálculo da taxa de transferência de calor para os fluidos analisados, feitos pela Eq. 3.9, nos mostra que os aumentos relativos não foram elevados, sendo possível perceber um incremento máximo de 3,6% para a concentração 0,003 vol% se comparado ao fluido base. Nas figuras 4.7, 4.8 e 4.9, é possível analisar o efeito da vazão mássica de fluido sobre

a taxa de transferência de calor, sendo que resultados mais detalhados podem ser vistos nas tabelas 4.1, 4.2 e 4.3.

Nos testes a 70°C, foi possível observar que o aumento da concentração influenciou positivamente na taxa de transferência de calor, como exibido na Fig. 4.7. Os resultados exibidos na Tab. 4.1 nos mostram que para as concentrações 0,001% e 0,002%, um leve decréscimo na taxa de transferência de calor relativo foi percebido com o aumento da vazão mássica. A taxa de transferência de calor relativa dos nanofluidos de concentração 0,002% e 0,003% foi cerca de duas vezes maior se comparadas a amostra de concentração 0,001%.

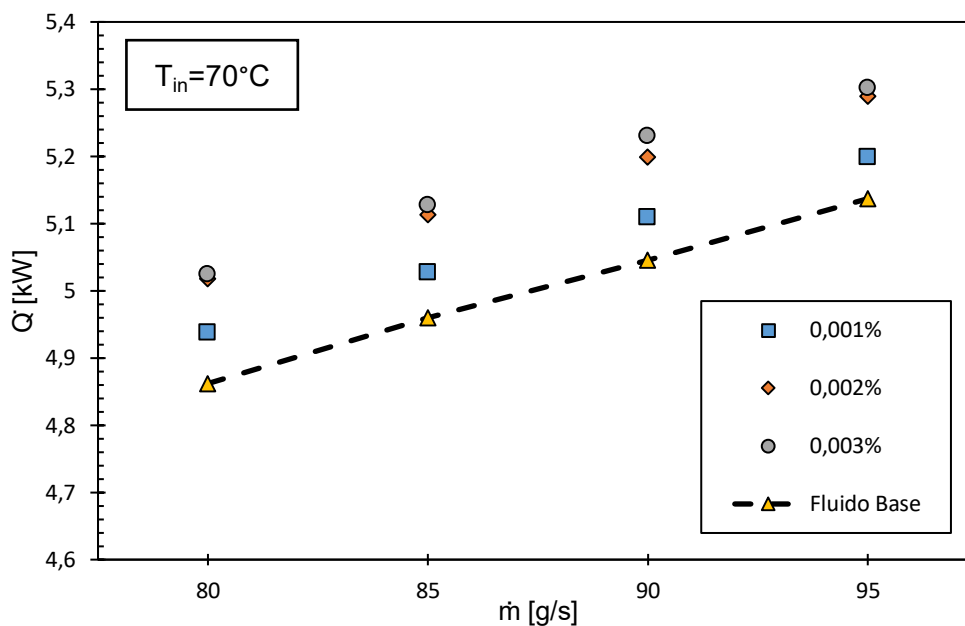


Figura 4.7 - Taxa de transferência de calor para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 70°C

Tabela 4.1 - Resultados detalhados da taxa de transferência de calor para os nanofluidos na temperatura de entrada de 70°C

ϕ	$\dot{m}=80$		$\dot{m}=85$		$\dot{m}=90$		$\dot{m}=95$	
	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)
Fluido Base	4,862	-	4,96	-	5,046	-	5,137	-
0,001%	4,938	1,56	5,028	1,37	5,11	1,27	5,199	1,21
0,002%	5,018	3,21	5,114	3,10	5,199	3,03	5,29	2,98
0,003%	5,025	3,35	5,128	3,39	5,231	3,67	5,302	3,21

Os resultados relativos aos testes na temperatura de 80°C estão exibidos na Tab. 4.2 e na Fig. 4.8. É possível perceber que com o aumento da vazão, a taxa de transferência de calor de todas as amostras apresentou uma tendência a se aproximarem, ao mesmo tempo que para as amostras de concentração 0,002% e 0,003%, uma redução na taxa de transferência de calor relativa foi percebida. A 80g/s, um aumento máximo de 3,07% na taxa de transferência de calor foi percebido para a concentração 0,003%, indicando que os nanofluidos estudados e o fluido base possuem comportamento similar quanto a transferência de calor.

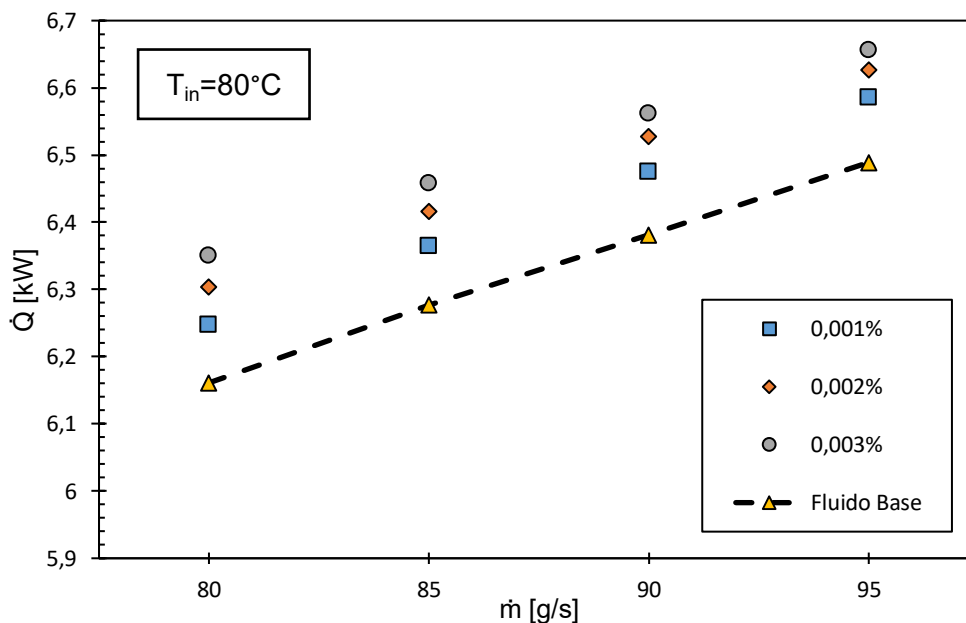


Figura 4.8 - Taxa de transferência de calor para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 80°C

Tabela 4.2 - Resultados detalhados da taxa de transferência de calor para os nanofluidos na temperatura de entrada de 80°C

ϕ	$\dot{m}=80$		$\dot{m}=85$		$\dot{m}=90$		$\dot{m}=95$	
	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)
Fluido Base	6,161	-	6,277	-	6,381	-	6,489	-
0,001%	6,248	1,41	6,365	1,40	6,475	1,47	6,586	1,49
0,002%	6,304	2,32	6,416	2,21	6,528	2,30	6,627	2,13
0,003%	6,35	3,07	6,458	2,88	6,562	2,84	6,656	2,57

A 90°C, foi observado um incremento máximo de 2,79%, inferior aos demais testes em temperaturas mais baixas, indicando uma possível deterioração da estabilidade com o

aumento da temperatura. Com o aumento da vazão, as amostras exibiram uma taxa de transferência de calor relativa cada vez mais similar, próxima aos 2%. O aumento da vazão provocou uma deterioração na taxa de transferência de calor relativa para as concentrações 0,002% e 0,003%. Esses resultados estão exibidos na Fig. 4.9 e na Tab. 4.3.

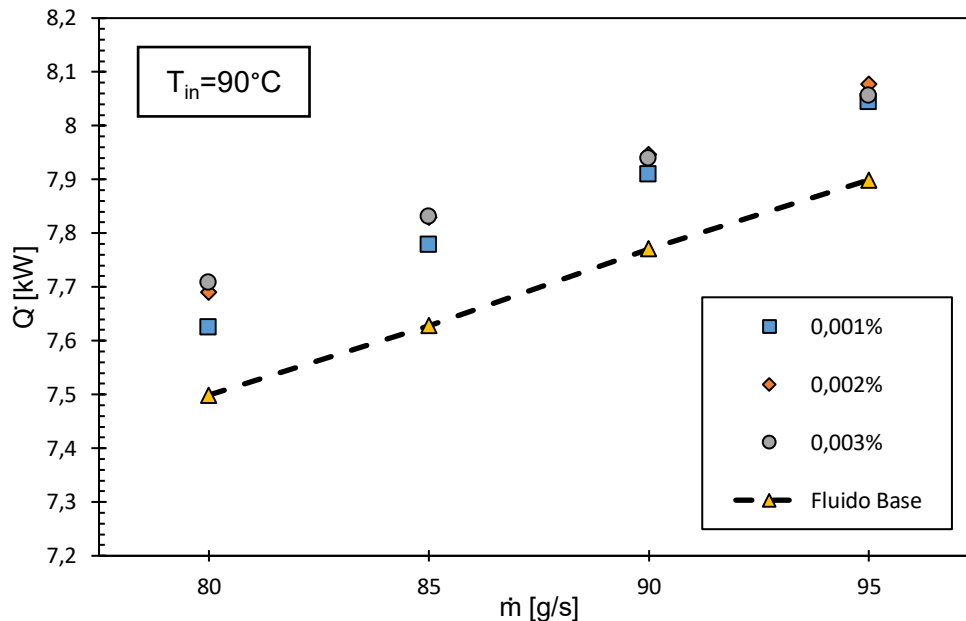


Figura 4.9 - Taxa de transferência de calor para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 90°C

Tabela 4.3 - Resultados detalhados da taxa de transferência de calor para nanofluidos na temperatura de entrada de 90°C

ϕ	$\dot{m}=80$		$\dot{m}=85$		$\dot{m}=90$		$\dot{m}=95$	
	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)	\dot{Q} [kW]	\dot{Q}_{rel} (%)
Fluido Base	7,499	-	7,628	-	7,771	-	7,899	-
0,001%	7,625	1,68	7,778	1,97	7,909	1,78	8,044	1,84
0,002%	7,69	2,55	7,83	2,65	7,946	2,25	8,077	2,25
0,003%	7,708	2,79	7,831	2,66	7,939	2,16	8,056	1,99

4.2.2 Perda de Carga

Ao se avaliar o desempenho dos nanofluidos, é importante entender que a adição de nanopartículas em um fluido modifica suas propriedades, afetando a potência de bombeamento necessária para mantê-lo em circulação. A perda de carga, que afeta diretamente a potência de bombeamento, foi avaliada experimentalmente com o auxílio do

transdutor de pressão posicionado paralelamente à bomba. Os resultados exibindo a perda de carga relativa estão exibidos nas figuras 4.10, 4.11 e 4.12, enquanto nas tabelas 4.4, 4.5 e 4.6, são exibidos os resultados mais detalhados para cada fluido analisado.

A 70°C a Fig. 4.10 mostra que o aumento da concentração não necessariamente resulta em um aumento na perda de carga, sendo que em vazões acima de 85g/s, a amostra de concentração 0,002% exibiu piores resultados, com um aumento relativo máximo de 3%, conforme Tab. 4.4. A amostra de 0,001% exibiu comportamento similar ao fluido base, exibindo um aumento relativo mais significativo a 95g/s.

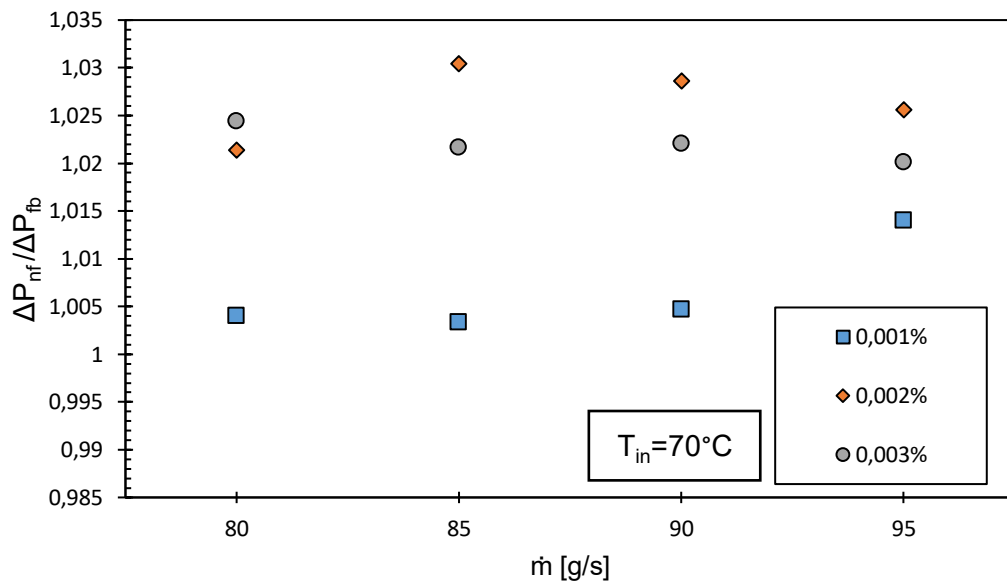


Figura 4.10 – Perda de carga relativa para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 70°C

Tabela 4.4 - Resultados detalhados da perda de carga para os nanofluidos na temperatura de entrada de 70°C

ϕ	$\dot{m}=80$		$\dot{m}=85$		$\dot{m}=90$		$\dot{m}=95$	
	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$
Fluido Base	1,374	-	1,519	-	1,686	-	1,855	-
0,001%	1,380	1,004	1,524	1,003	1,694	1,005	1,881	1,014
0,002%	1,404	1,021	1,565	1,030	1,734	1,029	1,903	1,026
0,003%	1,408	1,024	1,552	1,022	1,723	1,022	1,892	1,020

A 80°C, a amostra de 0,002% exibiu aumentos e quedas expressivas na perda de carga relativa, com um aumento máximo de 13%, e uma queda máxima de 16%. Se comparado aos

demais testes, incluindo os que foram realizados em diferentes temperaturas, nota-se que a perda de carga relativa não excede 3%, sendo possível inferir que alguma irregularidade durante a realização dos testes ou na bancada provocou a degradação dos ditos resultados, possivelmente relacionados ao transdutor de pressão, visto que os resultados de taxa de transferência de calor não exibiu tais anomalias. Para as amostras de 0,001% e 0,003%, ambas exibiram um aumento na perda de carga até uma certa vazão, 90g/s e 85g/s respectivamente, seguidas de uma queda nas vazões subsequentes. Estes resultados estão ilustrados na Fig. 4.11 e na Tab. 4.5.

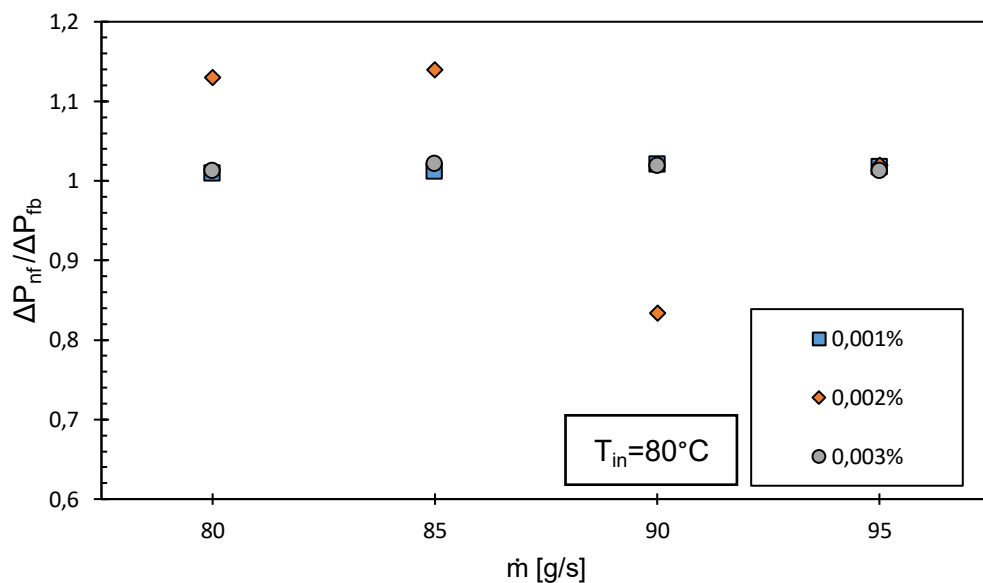


Figura 4.11 - Perda de carga relativa para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 80°C

Tabela 4.5 - Resultados detalhados da perda de carga para os nanofluidos na temperatura de entrada de 80°C

ϕ	$\dot{m}=80$		$\dot{m}=85$		$\dot{m}=90$		$\dot{m}=95$	
	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$
Fluido Base	1,366	-	1,512	-	1,677	-	1,856	-
0,001%	1,379	1,010	1,529	1,012	1,712	1,021	1,888	1,017
0,002%	1,544	1,130	1,722	1,139	1,398	0,834	1,892	1,019
0,003%	1,383	1,012	1,544	1,021	1,709	1,019	1,879	1,013

Os testes realizados a 90°C mostram comportamento similar para todas as amostras, apresentando uma vazão onde a perda de carga é máxima, da mesma forma que os testes

nas concentrações 0,001% e 0,003% a 80°C. A independência entre concentração e perda de carga é facilmente visualizada na Fig. 4.12. O aumento da temperatura dos testes provocou um leve aumento na perda de carga, o que pode caracterizar um possível desgaste na bomba com a realização dos testes ou a degradação dos nanofluidos com o aumento da temperatura. A perda de carga relativa está exibida na Tab. 4.6.

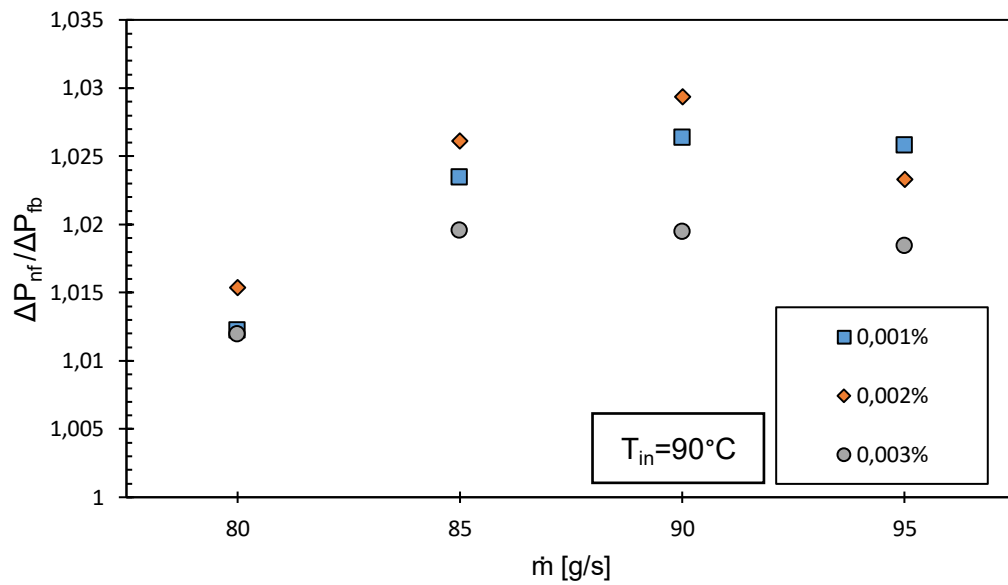


Figura 4.12 - Perda de carga relativa para os nanofluidos em função da vazão mássica e concentração volumétrica de nanopartículas na temperatura de entrada de 90°C

Tabela 4.6 - Resultados detalhados da perda de carga para os nanofluidos na temperatura de entrada de 90°C

ϕ	m=80		m=85		m=90		m=95	
	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$	ΔP [kPa]	$\Delta P_{nf}/\Delta P_{fb}$
Fluido Base	1,388	-	1,535	-	1,703	-	1,868	-
0,001%	1,405	1,012	1,571	1,023	1,747	1,026	1,916	1,026
0,002%	1,410	1,015	1,575	1,026	1,753	1,029	1,911	1,023
0,003%	1,405	1,012	1,565	1,020	1,736	1,019	1,902	1,018

4.3 Comparação dos resultados com a literatura

(KOCA; DOGANAY; TURGUT, 2017) estudaram as propriedades termofísicas de nanofluidos de prata, utilizando o mesmo surfactante utilizado nesse trabalho. A condutividade térmica

dos nanofluidos em seu trabalho foi decrescente com o aumento da concentração de nanopartículas, exibindo valores inferiores ao fluido base para todos os casos, enquanto que para a viscosidade foram observados aumentos de até 343%, como ilustrado na Fig. 4.13. O comportamento das amostras do presente estudo foi similar ao fluido base, o que pode ser explicado pelas baixas concentrações analisadas, que é mais de 10 vezes inferior às concentrações utilizadas no trabalho do autor.

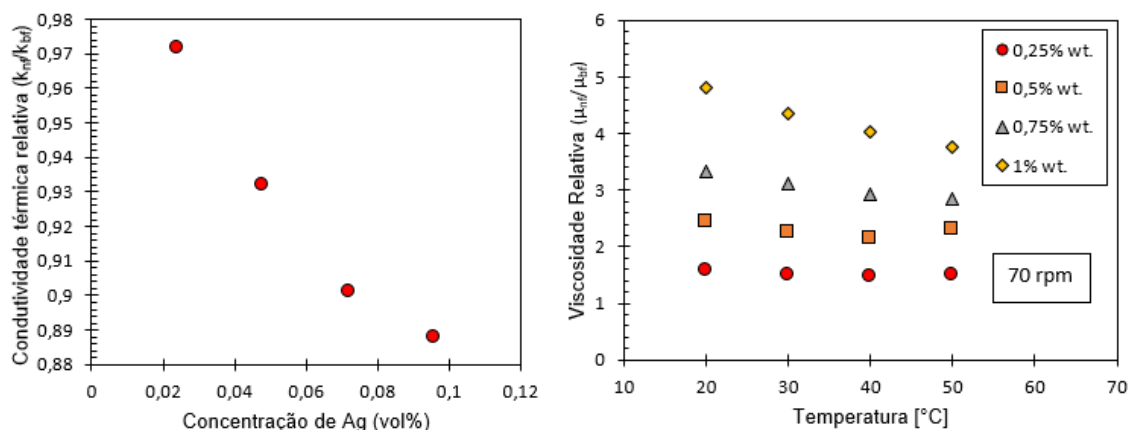


Figura 4.13 – Adaptação dos resultados experimentais de (KOCA; DOGANAY; TURGUT, 2017) para (a) condutividade térmica relativa e (b) viscosidade relativa de nanofluidos de prata.

Muito pouco se é discutido sobre a influência da adição de nanofluidos de prata como fluido de trabalho em trocadores de calor. Em seu trabalho, (OLIVEIRA; FILHO, 2014) observaram que o uso de nanofluidos de prata como fluido de arrefecimento em radiadores automotivos tendem a melhorar a taxa de transferência de calor, sendo que os resultados exibidos foram em sua maioria, melhores que os do fluido base. Foi observado também que aumentar a velocidade do ar melhora a taxa de transferência de calor do nanofluido se comparado ao fluido base, como mostra a Fig. 4.14. Vale ressaltar que a melhoria obtida foi comparável a do presente trabalho, com aumentos na faixa de 2%, sendo que nesse trabalho as concentrações trabalhadas foram inferiores.

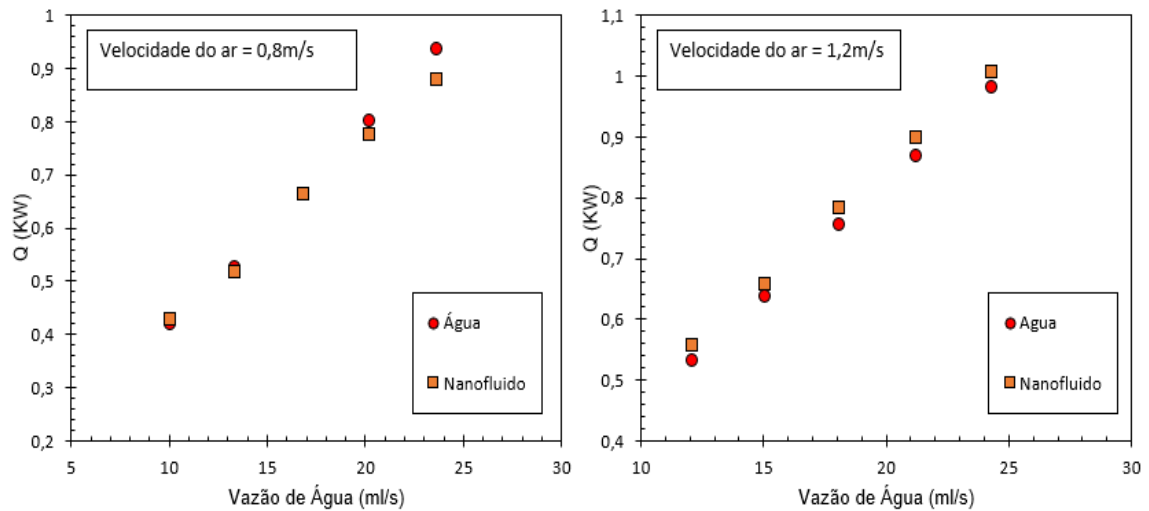


Figura 4.14 – Adaptação dos resultados experimentais de (OLIVEIRA; FILHO, 2014) sobre a influência da velocidade do ar na taxa de transferência de calor de nanofluidos de prata.

(CÁRDENAS CONTRERAS; OLIVEIRA; BANDARRA FILHO, 2019) observaram que a adição de nanofluidos de prata em concentração volumétrica de 0,05% resultaram em uma taxa de transferência de calor até 4% superior se comparada ao fluido base utilizado. Se comparado aos resultados do presente trabalho, é possível inferir que o aumento da concentração pode resultar em melhorias pouco significativas para a taxa de transferência de calor. De forma similar aos resultados obtidos nesse estudo, os maiores incrementos relativos foram obtidos para menores vazões de nanofluido.

Os aumentos obtidos para a taxa de transferência de calor no presente trabalho foram comparáveis aos resultados de (LEONG et al., 2010), que obtiveram um aumento de apenas 1,8% estudando numericamente nanofluidos de cobre em radiadores automotivos. Além disso, o resultado dos seus cálculos mostrou que o aumento da vazão de nanofluido tende a diminuir a taxa de transferência de calor relativa, sendo tais resultados exibidos na Fig. 4.15.

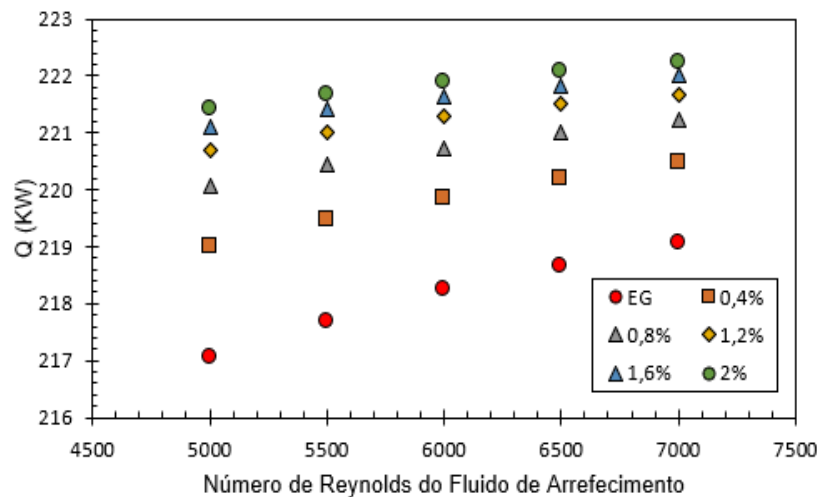


Figura 4.15 – Adaptação dos resultados de (LEONG et al., 2010) para a taxa de transferência de calor de nanofluidos de cobre.

A literatura mostra que o aumento da concentração volumétrica provoca aumentos na perda de carga e conseqüentemente, na potência de bombeamento necessária aos nanofluidos, como mostram (ALI; EL-LEATHY; AL-SOFYANY, 2014), (AMIRI et al., 2016) e (SELVAM et al., 2017). Entretanto, os resultados do presente trabalho mostraram uma tendência inconclusiva sobre a perda de carga em função tanto da temperatura, quanto da concentração de nanopartículas, sendo possível inferir que em baixas concentrações de nanopartículas, o efeito da viscosidade sobre a perda de carga é insignificante. Os resultados de (SELVAM et al., 2017) podem ser vistos na Fig. 4.16.

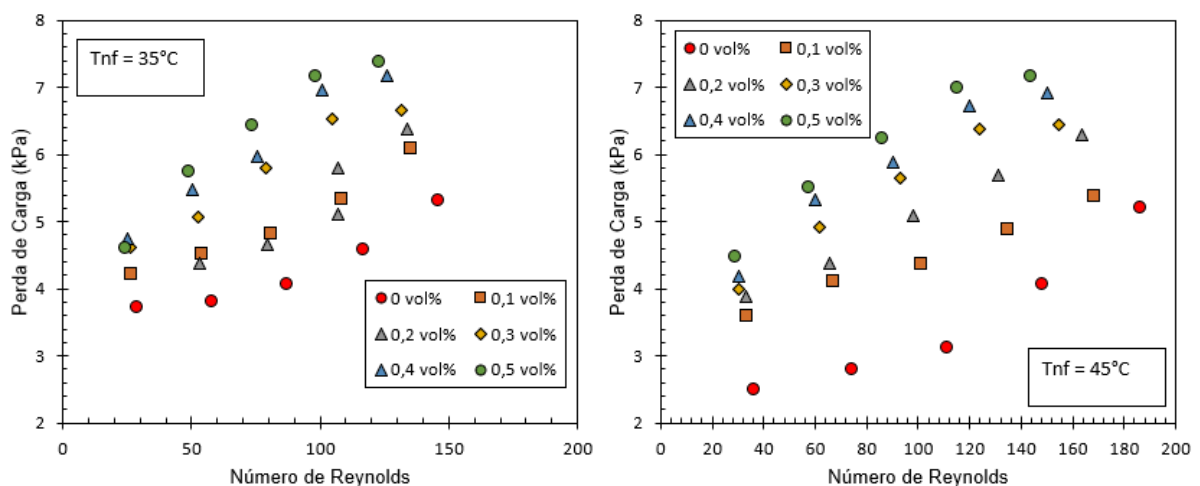


Figura 4.16 – Adaptação dos resultados experimentais de (SELVAM et al., 2017) para a perda de carga em diferentes temperaturas.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

5.1 Conclusões

O presente trabalho teve como objetivo avaliar as propriedades termofísicas e o desempenho termohidráulico de nanofluidos de prata em uma solução de água e etilenoglicol (50:50). Foram feitas avaliações com o intuito de avaliar a influência de diferentes parâmetros sobre as propriedades dos nanofluidos e avaliar seu desempenho comparado ao fluido base.

Em relação aos resultados exibidos no presente trabalho, é possível afirmar que:

- A adição de nanopartículas impactou positivamente a condutividade térmica à 25°C. Para todas as amostras analisadas nessa temperatura, foram observados aumentos se comparado ao fluido base. Para as demais temperaturas, o nanofluidos exibiram resultados muito próximos ou inferiores ao fluido base, sendo que para amostra de $\phi=0,001\%$, uma queda de cerca de 1% foi observada a 35°C.
- Dentre as três concentrações analisadas, aumentar concentração não provocou uma melhoria na condutividade térmica. Os melhores resultados para todas as temperaturas analisadas ocorreram para $\phi=0,002\%$, com um incremento máximo de 1,7%, seguido das concentrações $\phi=0,003\%$ e $\phi=0,001\%$.
- A viscosidade dos nanofluidos foi superior à do fluido base para todas as temperaturas analisadas, exibindo um aumento máximo de cerca de 6% a 85°C. Aumentar a concentração resultou em incrementos na viscosidade em toda a faixa de temperatura dos testes, sendo esse efeito mais pronunciável em elevadas temperaturas.
- Para todas as condições de testes avaliadas, os nanofluidos exibiram uma taxa de transferência de calor superior à do fluido base. Foi observada uma tendência de melhoria dos resultados com o aumento da concentração, exceto à 90°C, onde o desempenho de $\phi=0,002\%$ se mostrou superior às demais concentrações em vazões superiores a 90g/s. O efeito da temperatura também foi analisado, e foi possível concluir que com o aumento desse parâmetro, os nanofluidos estudados mostraram um comportamento cada vez mais similar. Um aumento máximo na taxa de transferência de calor de 3,6% foi obtido à 70°C para $\phi=0,003$.
- Foi possível perceber que o aumento da concentração não necessariamente provocou aumentos na perda de carga, sendo que para a maioria dos testes, os nanofluidos de

$\phi=0,002\%$ exibiram maior perda de carga se comparado aos demais fluidos. Para essa mesma concentração, a 80°C , foi percebido um comportamento anômalo entre 75g/s e 85g/s , podendo caracterizar alguma falha interna na bancada.

- Foi possível perceber que de modo geral, os nanofluidos exibiram comportamento similar ao fluido base. Portanto, os resultados podem ser classificados como insatisfatórios, devido a baixa melhoria que os nanofluidos analisados trariam ao sistema de arrefecimento de veículos, e possíveis maiores custos relacionados à aquisição desses nanofluidos pelos consumidores, refletindo em um baixo custo benefício de implementação no mercado.

5.2 Sugestões e trabalhos futuros

A utilização de nanofluidos em sistemas de troca de calor pode ter um impacto negativo em sua durabilidade. A viabilidade dos nanofluidos é diretamente dependente sobre o quanto os ganhos proporcionados são superiores às implicações devidas ao seu uso. Para isso, sugere-se uma análise de integridade do sistema após a sua utilização prolongada, levando em conta efeitos como a corrosão proporcionada pelas nanopartículas, assim como as implicações que a sedimentação possa ter em um sistema que ficou muito tempo inativo.

Diversos trabalhos ainda podem ser realizados para dar continuidade ao presente trabalho, dentre eles:

- Variar determinadas condições de contorno, como vazão de fluido, concentração volumétrica e temperatura, para descobrir em quais condições os nanofluidos exibem melhor desempenho.
- Avaliar o desempenho termohidráulico dos nanofluidos considerando uma faixa mais abrangente do regime de escoamento do ar, de forma a obter condições semelhantes às condições reais de operação de um sistema de arrefecimento automotivo.
- Estudar a influência de diferentes métodos de estabilização sobre as propriedades dos nanofluidos, estabelecendo condições pelas quais a eficiência de tais métodos possa ser comparada.
- Controlar as propriedades do ar, como temperatura de bulbo úmido, temperatura ambiente e umidade relativa, simulando a operação do sistema em diferentes condições climáticas.
- Realizar a modelagem do radiador para comparar a simulação com os resultados experimentais obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGARWAL, R. et al. Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 102, p. 1024–1036, 2016.
- ALI, H. M. et al. Heat transfer enhancement of car radiator using aqua based magnesium oxide nanofluids. **Thermal Science**, v. 19, n. 6, p. 2039–2048, 2015.
- ALI, M.; EL-LEATHY, A. M.; AL-SOFYANY, Z. The effect of nanofluid concentration on the cooling system of vehicles radiator. **Advances in Mechanical Engineering**, v. 2014, p. 1–13, 2014.
- AMIRI, A. et al. Toward improved engine performance with crumpled nitrogen-doped graphene based water-ethylene glycol coolant. **Chemical Engineering Journal**, v. 289, p. 583–595, 2016.
- AMIRI, A.; SHANBEDI, M.; DASHTI, H. Thermophysical and rheological properties of water-based graphene quantum dots nanofluids. **Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers**, v. 76, p. 132–140, 2017.
- ASHRAE. **Handbook - Fundamentals (SI Edition)**, American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers, Inc.
- ASHRAE STANDARD 41.2. Standard Methods for Laboratory Airflow Measurement. **American Society of Heating, Refrigeration and Air Conditioning Engineers**, 1987.
- BATCHELOR, B. G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. v. 83, 1977.
- BHIMANI, V. L.; RATHOD, P. P.; SORATHIYA, A. S. Experimental Study of Heat Transfer Enhancement Using Water Based Nanofluids as a New Coolant for Car Radiators. **International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering**, v. 3, n. 6, p. 295–302, 2013.
- BRINKMAN, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. v. 571, p. 1–2, 1952.
- BROWN, B. Y. R. A brief account of microscopical observations made in the months of June, July and August 1827, on the particles contained in the pollen of plants; and on the general existence of active molecules in organic and inorganic bodies. **Philosophical Magazine Series**, n. 21, p. 161–173, 1828.

CÁRDENAS CONTRERAS, E. M.; OLIVEIRA, G. A.; BANDARRA FILHO, E. P. Experimental analysis of the thermohydraulic performance of graphene and silver nanofluids in automotive cooling systems. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 132, p. 375–387, 2019.

CEYLAN, A.; JASTRZEMBSKI, K.; SHAH, S. I. Enhanced solubility Ag-Cu nanoparticles and their thermal transport properties. **Metallurgical and Materials Transactions A: Physical Metallurgy and Materials Science**, v. 37, n. 7, p. 2033–2038, 2006.

CHAVAN, D.; PISE, A. T. Performance Investigation of an Automotive Car Radiator Operated With Nanofluid as Coolant. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, 2013.

CHEVALIER, J.; TILLEMENT, O.; AYELA, F. Rheological properties of nanofluids flowing through microchannels. **Applied Physics Letters**, v. 91, n. 23, p. 1–4, 2007.

CHOI, S. Nanofluids for Improved Efficiency in Cooling Systems. 2006.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. **ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition**, v. 66, n. March, p. 99–105, 1995.

CHOUGULE, S. S.; SAHU, S. K. Thermal Performance of Automobile Radiator Using Carbon Nanotube-Water Nanofluid—Experimental Study. **Journal of Thermal Science and Engineering Applications**, v. 6, n. 4, p. 041009, 2014.

DAS, S. K. et al. Temperature Dependence of Thermal Conductivity Enhancement for Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**, v. 125, n. 4, p. 567, 2003.

DE BRUIJN, H. The viscosity of suspensions of spherical particles (The fundamental η - c and φ relations). **Recl Trav Chim Pays-Bas**, p. 863–74, 1942.

DEVIREDDY, S.; MEKALA, C. S. R.; VEEREDHI, V. R. Improving the cooling performance of automobile radiator with ethylene glycol water based TiO₂nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 78, p. 121–126, 2016.

DUANGTHONGSUK, W.; WONGWISES, S. Heat transfer enhancement and pressure drop characteristics of TiO₂-water nanofluid in a double-tube counter flow heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 52, n. 7–8, p. 2059–2067, 2009.

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, 2001.

EINSTEIN, A. EINE NEUE BESTIMMUNG DER MOLEKÜLDIMENSIONEN. 1905.

ELIAS, M. M. et al. Experimental investigation on the thermo-physical properties of Al₂O₃nanoparticles suspended in car radiator coolant. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 48–53, 2014.

HAMILTON, R. L. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Industrial and Engineering Chemistry Fundamentals**, v. 1, n. 3, p. 187–191, 1962.

HATSCHEK, E. The general theory of viscosity of two-phase systems. n. 2, p. 80–92, 1913.

HE, Y. et al. Heat transfer and flow behaviour of aqueous suspensions of TiO₂nanoparticles (nanofluids) flowing upward through a vertical pipe. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 50, n. 11–12, p. 2272–2281, 2007.

HEMMAT ESFE, M. et al. An experimental study on thermal conductivity of MgO nanoparticles suspended in a binary mixture of water and ethylene glycol. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 67, p. 173–175, 2015.

HEMMAT ESFE, M.; SAEDODIN, S. An experimental investigation and new correlation of viscosity of ZnO-EG nanofluid at various temperatures and different solid volume fractions. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 55, p. 1–5, 2014.

HUSSEIN, A. M.; BAKAR, R. A.; KADIRGAMA, K. Study of forced convection nanofluid heat transfer in the automotive cooling system. **Case Studies in Thermal Engineering**, v. 2, p. 50–61, 2014.

ISLAM, R. et al. Experimental investigation of using ZnO nanofluids as coolants in a PEM fuel cell. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 42, n. 30, p. 19272–19286, 2017.

JADAR, R.; SHASHISHEKAR, K. S.; MANOHARA, S. R. ScienceDirect f- MWCNT Nanomaterial Integrated Automobile Radiator. **Materials Today: Proceedings**, v. 4, n. 10, p. 11028–11033, 2017.

JANG, S. P.; CHOI, S. U. S. Role of Brownian motion in the enhanced thermal conductivity of nanofluids. **Applied Physics Letters**, v. 84, n. 21, p. 4316–4318, 2004.

KATHIRAVAN, R. et al. International Journal of Heat and Mass Transfer Preparation and pool boiling characteristics of copper nanofluids over a flat plate heater. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 53, n. 9–10, p. 1673–1681, 2010.

KOCA, H. D.; DOGANAY, S.; TURGUT, A. Thermal characteristics and performance of Ag-water nanofluid: Application to natural circulation loops. **Energy Conversion and Management**, v. 135, p. 9–20, 2017.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. A new thermal conductivity model for nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 6, n. 6, p. 577–588, 2004.

KUMAR, V.; TIWARI, A. K.; GHOSH, S. K. Effect of chevron angle on heat transfer performance in plate heat exchanger using ZnO/water nanofluid. **Energy Conversion and Management**, v. 118, p. 142–154, 2016.

LEBLANC, G. E.; SECCO, R. A.; KOSTIC, M. Viscosity Measurement. **The Measurement Instrumentation and Sensors Handbook**, 1999.

LEE, G. J. et al. Thermal conductivity enhancement of ZnO nanofluid using a one-step physical method. **Thermochimica Acta**, v. 542, p. 24–27, 2012.

LEE, J. H. et al. Effective viscosities and thermal conductivities of aqueous nanofluids containing low volume concentrations of Al₂O₃nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 51, n. 11–12, p. 2651–2656, 2008.

LEE, S. W. et al. Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, n. 1–3, p. 433–438, 2011.

LEONG, K. C.; YANG, C.; MURSHED, S. M. S. A model for the thermal conductivity of nanofluids – the effect of interfacial layer. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 8, n. 2, p. 245–254, 2006.

LEONG, K. Y. et al. Performance investigation of an automotive car radiator operated with nanofluid-based coolants (nanofluid as a coolant in a radiator). **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 17–18, p. 2685–2692, 2010.

LI, C. H.; PETERSON, G. P. Experimental investigation of temperature and volume fraction variations on the effective thermal conductivity of nanoparticle suspensions (nanofluids). **Journal of Applied Physics**, v. 99, n. 8, 2006.

LO, C. H. et al. Fabrication of copper oxide nanofluid using submerged arc nanoparticle synthesis system (SANSS). **Journal of Nanoparticle Research**, v. 7, n. 2–3, p. 313–320, 2005.

M'HAMED, B. et al. Experimental study on thermal performance of MWCNT nanocoolant in Perodua Kelisa 1000cc radiator system. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 76, p. 156–161, 2016.

MALLICK, P.; SAHU, S. Structure, Microstructure and Optical Absorption Analysis of CuO Nanoparticles Synthesized by Sol-Gel Route. **Nanoscience and Nanotechnology**, v. 2, n. 3,

p. 71–74, 2012.

MAXWELL, J. C. A treatise on electricity and magnetism. **Oxford: Clarendon Press**, 1873.

MINTSA, H. A. et al. New temperature dependent thermal conductivity data for water-based nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 48, n. 2, p. 363–371, 2009.

NARAKI, M. et al. Parametric study of overall heat transfer coefficient of CuO/water nanofluids in a car radiator. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 66, p. 82–90, 2013.

NIEH, H. M.; TENG, T. P.; YU, C. C. Enhanced heat dissipation of a radiator using oxide nano-coolant. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 77, p. 252–261, 2014.

OH, D. W. et al. Thermal conductivity measurement and sedimentation detection of aluminum oxide nanofluids by using the 3ω method. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 29, n. 5, p. 1456–1461, 2008.

OLIVEIRA, G. .; FILHO, B. Nanofluid As a Coolant in Automotive Radiators. n. July, p. 1102–1106, 2014.

OLIVEIRA, G. A. Análise Experimental Do Desempenho Térmico De Nanofluidos Em Radiadores Automotivos. p. 165, 2016.

OMRANI, A. N. et al. Effects of multi walled carbon nanotubes shape and size on thermal conductivity and viscosity of nanofluids. **Diamond and Related Materials**, v. 93, p. 96–104, 2019.

OUIKHALFAN, M. et al. Stability and thermal conductivity enhancement of aqueous nanofluid based on surfactant-modified TiO₂. **Journal of Dispersion Science and Technology**, v. 0, n. 0, p. 1–9, 2019.

PAUL, G. et al. Techniques for measuring the thermal conductivity of nanofluids: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 14, n. 7, p. 1913–1924, 2010.

PEYGHAMBARZADEH, S. M. et al. Experimental study of overall heat transfer coefficient in the application of dilute nanofluids in the car radiator. **Applied Thermal Engineering**, v. 52, n. 1, p. 8–16, 2013.

PRASHER, R. et al. Effect of aggregation on thermal conduction in colloidal nanofluids. **Applied Physics Letters**, v. 89, n. 14, p. 12–15, 2006.

PROSPECT. Evaluation and Assignment of Nanoparticle Dispersion / Characterisation Methodologies , to be Developed under PROSPECT. n. July, p. 1–28, 2009.

RANGA BABU, J. A.; KUMAR, K. K.; SRINIVASA RAO, S. State-of-art review on hybrid

nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 77, n. March, p. 551–565, 2017.

SADEGHINEZHAD, E. et al. A comprehensive review on graphene nanofluids: Recent research, development and applications. **Energy Conversion and Management**, v. 111, p. 466–487, 2016.

SAEEDI, A. H.; AKBARI, M.; TOGHRAIE, D. An experimental study on rheological behavior of a nanofluid containing oxide nanoparticle and proposing a new correlation. **Physica E: Low-Dimensional Systems and Nanostructures**, v. 99, n. February, p. 285–293, 2018.

SAID, Z. et al. Enhancing the performance of automotive radiators using nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 112, n. December 2018, p. 183–194, 2019.

SARAFRAZ, M. M.; HORMOZI, F. Heat transfer, pressure drop and fouling studies of multi-walled carbon nanotube nano-fluids inside a plate heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 72, p. 1–11, 2016.

SELVAM, C. et al. Overall heat transfer coefficient improvement of an automobile radiator with graphene based suspensions. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 115, p. 580–588, 2017.

SHARIFPUR, M.; ADIO, S. A.; MEYER, J. P. Experimental investigation and model development for effective viscosity of Al₂O₃-glycerol nanofluids by using dimensional analysis and GMDH-NN methods. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 68, p. 208–219, 2015.

SRINIVAS, V. et al. Nanofluids with CNTs for automotive applications. **Heat and Mass Transfer/Waerme- und Stoffuebertragung**, v. 52, n. 4, p. 701–712, 2016.

SUBHEDAR, D. G.; RAMANI, B. M.; GUPTA, A. Experimental investigation of heat transfer potential of Al₂O₃/Water-Mono Ethylene Glycol nanofluids as a car radiator coolant. **Case Studies in Thermal Engineering**, 2018.

SUGANTHI, K. S.; RAJAN, K. S. Temperature induced changes in ZnO-water nanofluid: Zeta potential, size distribution and viscosity profiles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 55, n. 25–26, p. 7969–7980, 2012.

SYAM SUNDAR, L. et al. Viscosity of low volume concentrations of magnetic Fe₃O₄nanoparticles dispersed in ethylene glycol and water mixture. **Chemical Physics Letters**, v. 554, p. 236–242, 2012.

TAYLOR, B. N.; KUYATT, C. E. Guidelines for Evaluating and Expressing the Uncertainty of NIST Measurement Results: Appendix D1. Terminology. **National Institute for Standards**

and Technology, Gaithersburg, MD, p. D.1.1.2, 2001.

TENG, T. P. et al. The effect of alumina/water nanofluid particle size on thermal conductivity. **Applied Thermal Engineering**, v. 30, n. 14–15, p. 2213–2218, 2010.

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, 2009.

TURGUT, A. et al. Thermal Conductivity and Viscosity Measurements of Water-Based TiO₂ Nanofluids. **International Journal of Thermophysics**, v. 30, n. 4, p. 1213–1226, 2009.

USRI, N. A. et al. **Thermal Conductivity Enhancement of Al₂O₃ Nanofluid in Ethylene Glycol and Water Mixture**. [s.l.] Elsevier B.V., 2015. v. 79

VASUDEVAN NAMBEESAN, K. P. et al. Experimental study of heat transfer enhancement in automobile radiator using Al₂O₃/water-ethylene glycol nanofluid coolants. **International Journal of Automotive and Mechanical Engineering**, v. 12, n. 1, p. 2857–2865, 2015.

WANG, B. X.; ZHOU, L. P.; PENG, X. F. A fractal model for predicting the effective thermal conductivity of liquid with suspension of nanoparticles. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 46, n. 14, p. 2665–2672, 2003.

WANG, X. JU; ZHU, D. SHENG; YANG, S. Investigation of pH and SDBS on enhancement of thermal conductivity in nanofluids. **Chemical Physics Letters**, v. 470, n. 1–3, p. 107–111, 2009.

WILK, J.; SMUSZ, R.; GROSICKI, S. Thermophysical properties of water based Cu nanofluid used in special type of coil heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, v. 127, p. 933–943, 2017.

XIA, G. et al. Effects of surfactant on the stability and thermal conductivity of Al₂O₃/de-ionized water nanofluids. **International Journal of Thermal Sciences**, v. 84, p. 118–124, 2014.

XIE, H.; FUJII, M.; ZHANG, X. Effect of interfacial nanolayer on the effective thermal conductivity of nanoparticle-fluid mixture. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 48, n. 14, p. 2926–2932, 2005.

YU, W.; CHOI, S. U. S. The role of interfacial layers in the enhanced thermal conductivity of nanofluids: A renovated Maxwell model. **Journal of Nanoparticle Research**, v. 5, n. 1–2, p. 167–171, 2003.

ZHU, H. et al. Preparation, characterization, viscosity and thermal conductivity of CaCO₃ aqueous nanofluids. **Science China Technological Sciences**, v. 53, n. 2, p. 360–368, 2010.

ZHU, H. T.; LIN, Y. S.; YIN, Y. S. A novel one-step chemical method for preparation of copper nanofluids. **Journal of Colloid and Interface Science**, v. 277, n. 1, p. 100–103, 2004.

ŻYŁA, G. et al. Nanodiamonds – Ethylene Glycol nanofluids: Experimental investigation of fundamental physical properties. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 121, p. 1201–1213, 2018.

ŻYŁA, G.; FAL, J. Viscosity, thermal and electrical conductivity of silicon dioxide–ethylene glycol transparent nanofluids: An experimental studies. **Thermochemica Acta**, v. 650, p. 106–113, 2017.