

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ**  
**DIRETORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA**

**MARINA BORSUK FOGAÇA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM NANOFUIDO DE OURO EM  
TROCADOR DE CALOR DE CASCO E TUBO HELICOIDAL**

**DISSERTAÇÃO**

**PONTA GROSSA**

**2019**

**MARINA BORSUK FOGAÇA**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM NANOFUIDO DE OURO EM  
TROCADOR DE CALOR DE CASCO E TUBO HELICOIDAL**

Dissertação apresentada como requisito parcial à obtenção do título de Mestra em Engenharia Mecânica, do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, da Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Área de concentração: Fabricação Mecânica e Materiais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rozane de Fátima Turchiello Gómez

Coorientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

**PONTA GROSSA**

**2019**

Ficha catalográfica elaborada pelo Departamento de Biblioteca  
da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus Ponta Grossa  
n.52/19

F655 Fogaça, Marina Borsuk

Avaliação do desempenho de um nanofluido de ouro em trocador de calor de casco e tubo helicoidal. / Marina Borsuk Fogaça. 2019.  
138 f.; il. 30 cm

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rozane de Fátima Turchiello Gómez  
Coorientador: Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2019.

1. Permutadores térmicos. 2. Solos e clima. 3. Energia - Conservação. 4. Análise numérica. I. Gómez, Rozane de Fátima Turchiello. II. Behainne, Jhon Jairo Ramirez. III. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. IV. Título.

CDD 620.1

## **FOLHA DE APROVAÇÃO**

Título de Dissertação Nº 28/2019

### **AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE UM NANOFLUIDO DE OURO EM TROCADOR DE CASCO E TUBO HELICOIDAL**

Por

**Marina Borsuk Fogaça**

Esta dissertação foi apresentada às **9 horas de 6 de junho de 2019** como requisito parcial para a obtenção do título de MESTRA EM ENGENHARIA MECÂNICA, com Área de Concentração em Fabricação Mecânica e Materiais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora, composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho **aprovado**.

---

**Prof. Dr. Gelson Biscaia de Souza**  
(DEFIS-UEPG)

---

**Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne**  
(DAMEC-UTFPR) – Coorientador

---

**Prof. Dr. Thiago Antonini Alves**  
(DAMEC-UTFPR)

---

**Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rozane de Fátima Turchiello Gómez** (DAFIS-UTFPR) – Orientadora



Visto do Coordenador:

---

**Prof. Dr. Gerson Henrique dos Santos**  
Coordenador do PPGEM  
UTFPR – Câmpus Ponta Grossa

**- A Folha de Aprovação assinada encontra-se na Coordenação do Programa -**

Dedico este trabalho aos meus filhos.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço...

A Deus, por tudo.

Aos meus orientadores, Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Rozane de Fátima Turchiello Gómez e Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne, por seus sábios ensinamentos e seu profissionalismo exemplar e inspirador.

Ao Prof. Dr. Anderson Geraldo Marena Pukasiewicz e ao PPGEM, por todas as oportunidades acadêmicas que a mim viabilizaram.

Ao Prof. Dr. Sergio Leonardo Gómez por sua valiosa e constante colaboração.

Ao Dr. Vinicius Mariani Lenart por sua imensa contribuição.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Daniele Toniolo Dias Ferreira Rosa pelos seus esclarecimentos indispensáveis a este trabalho.

À Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Sandra Mara Kaminski Tramontin pela conversa amiga em um momento meu de desânimo.

A todos os professores da UTFPR que fizeram parte de minha formação acadêmica.

Ao Departamento Acadêmico de Física e seus profissionais pelos esforços em meu auxílio.

Aos amigos e aos colegas que colaboraram para meu aprendizado.

Aos servidores da UTFPR por sua contribuição para o funcionamento da instituição.

À Fundação Araucária (Bolsa de Iniciação Científica) e à UTFPR (Bolsas de Iniciação Científica e Mestrado) pelo auxílio financeiro.

Aos meus pais, Lúcia e Alexandre, pelos princípios que formam meu alicerce e por seu amor incondicional.

A Nilton Cesar Fogaça, por sua dedicação aos nossos filhos, Hadassa e Manassés.

A Hadassa e Manassés, simplesmente por existirem.

A mente que se abre a uma nova ideia,  
jamais voltará ao seu tamanho original.  
(EINSTEIN, Albert)

## RESUMO

FOGAÇA, Marina Borsuk. **Avaliação do desempenho de um nanofluido de ouro em trocador de calor de casco e tubo helicoidal**. 2019. 138 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) - Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Nanofluidos, que são suspensões de nanopartículas em fluido-base, têm sido considerados potenciais líquidos de arrefecimento, devido à sua condutividade térmica em alguns casos superior à de líquidos convencionais. Este trabalho teve como objetivo avaliar o desempenho do nanofluido de ouro como líquido de arrefecimento, em um trocador de calor de casco e tubo helicoidal (TCCTH), utilizando-se água como fluido quente. Realizaram-se testes de transferência de calor com água e com nanofluido de ouro, em diferentes condições do sistema, visando-se conhecer, a partir de planejamentos fatoriais multiníveis, os efeitos da fração volumétrica das nanopartículas, da vazão dos fluidos envolvidos e da temperatura de entrada do fluido quente, na efetividade do TCCTH. O nanofluido de ouro foi produzido pelo método de Turkevich modificado, e os resultados da caracterização foram nanopartículas esféricas com diâmetro médio de  $(14\pm 2)$  nm. Foram feitas duas diluições do nanofluido concentrado, cujas frações volumétricas de nanopartículas de ouro no nanofluido diluído foram  $1,63 \times 10^{-5}\%$  (Nanofluido A) e  $6,53 \times 10^{-5}\%$  (Nanofluido B). Os testes de transferência de calor foram realizados às vazões de 20, 30 e 40 L/h para ambos fluidos (quente e frio), e temperaturas de entrada do fluido quente de 40, 50 e 60°C. A máxima efetividade foi observada para o Nanofluido A, à menor vazão e à maior temperatura de entrada do fluido quente. A respeito da comparação dos resultados obtidos a partir dos diâmetros hidráulicos ( $D_{hid}$ ) referentes às proposições de modelos da literatura com os resultados experimentais, verificou-se que o  $D_{hid}$  proposto por Salimpour (2009) apresentou resultados que mais se aproximaram dos valores experimentais, seguido por Incropera et al. (2011), e por último por Jamshidi et al. (2013).

**Palavras-chave:** Nanofluido de ouro. Nanopartículas metálicas. Líquido de arrefecimento. Trocador de calor de casco e tubo helicoidal. Transferência de calor.



## ABSTRACT

FOGAÇA, Marina Borsuk. **Performance assessment of a gold nanofluid in a shell and helically coiled tube heat exchanger**. 2019. 138 p. Dissertation (Master Degree in Mechanical Engineering) - Federal University of Technology - Paraná. Ponta Grossa, 2019.

Nanofluids, which are suspensions of nanoparticles in base-fluid, have been considered potential cooling liquids, due to their thermal conductivity in some cases superior to that of conventional liquids. The goal of this work was to assess the performance of gold nanofluid as a cooling liquid in a shell and helically coiled tube heat exchanger (TCCTH) using water as hot fluid. Heat transfer tests were carried out using water and gold nanofluid under different conditions of the system, aiming to know, from a multilevel factorial experimental design, the effects of the volumetric fraction of the nanoparticles, the flow of the fluids involved and the temperature of the hot fluid, on the effectiveness of TCCTH. The gold nanofluid was produced by the modified Turkevich method, and the results of the characterization were spherical nanoparticles with mean diameter of  $(14\pm 2)$  nm. Two dilutions of the concentrated nanofluid were made, whose volumetric fractions of gold nanoparticles in the diluted nanofluid were  $1.63 \times 10^{-5}\%$  (Nanofluid A) and  $6.53 \times 10^{-5}\%$  (Nanofluid B). Heat transfer tests were performed at 20, 30 and 40 L/h for both fluids (hot and cold), and hot fluid inlet temperatures of 40, 50 and 60 ° C. The maximum effectiveness was observed for Nanofluid A, at the lower flow rate and at the higher hot fluid inlet temperature. With regard to the comparison of the results obtained from the hydraulic diameters ( $D_{hid}$ ) referring to the propositions of models from literature with the experimental results, it was verified that the  $D_{hid}$  proposed by Salimpour (2009) presented results that more approached the experimental values, followed by Incropera et al. (2011), and finally by Jamshidi et al. (2013).

**Keywords:** Gold nanofluid. Metallic nanoparticles. Cooling liquid. Shell and helically coiled tube heat exchanger. Heat transfer.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Ilustração do fenômeno de Ressonância Plasmônica em nanopartículas	30
Figura 2 - Influência da aglomeração de nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos .....	34
Figura 3 - Representação 2D do TCCTH .....	50
Figura 4 - Representação 3D do TCCTH .....	51
Figura 5 - Desenho esquemático do sistema do TCCTH .....	53
Figura 6 - Espectro de absorção da Ressonância Plasmônica do ouro coloidal .....	66
Figura 7 - Medidas de TEM das nanopartículas de ouro com diâmetro médio de $(14\pm 2)$ nm .....	67

## LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Número de artigos sobre nanofluidos publicados entre 2008 e 2018 (Scopus).....	27
Gráfico 2 - Diâmetro médio das nanopartículas de ouro ( $14\pm 2$ nm) obtido por MET.....	67
Gráfico 3 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o $NF_A$ (resposta é efetividade média). A linha vermelha indica a significância estatística de 5%.....	70
Gráfico 4 - Gráfico de contorno de efetividade média versus $\phi$ ; $T_{q,ent}$ ( $NF_A$ ).....	70
Gráfico 5 - Efeito da interação entre $\phi$ e $T_{q,ent}$ na efetividade média ( $NF_A$ ).....	71
Gráfico 6 - Gráfico de contorno de efetividade média versus $\phi$ ; $\dot{V}$ ( $NF_A$ ).....	71
Gráfico 7 - Efeito da interação entre $\phi$ e $\dot{V}$ na efetividade média ( $NF_A$ ).....	72
Gráfico 8 - Gráfico de contorno de efetividade média versus $T_{q,ent}$ ; $\dot{V}$ ( $NF_A$ ).....	72
Gráfico 9 - Efeito da interação entre $T_{q,ent}$ e $\dot{V}$ na efetividade média ( $NF_A$ ).....	73
Gráfico 10 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média ( $NF_A$ ).....	74
Gráfico 11 - Resíduos versus valores ajustados (resposta é efetividade média, para $NF_A$ ).....	75
Gráfico 12 - Gráfico de probabilidade normal (resposta é efetividade média, para o $NF_A$ ).....	75
Gráfico 13 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o $NF_B$ (resposta é efetividade média). A linha vermelha indica a significância estatística de 5%.....	77
Gráfico 14 - Gráfico de contorno de efetividade média versus $\phi$ ; $T_{q,ent}$ ( $NF_B$ ).....	78
Gráfico 15 - Efeito da interação entre $\phi$ e $T_{q,ent}$ na efetividade média ( $NF_B$ ).....	78
Gráfico 16 - Gráfico de contorno de efetividade média versus $\phi$ ; $\dot{V}$ ( $NF_B$ ).....	79
Gráfico 17 - Efeito da interação entre $\phi$ e $\dot{V}$ na efetividade média ( $NF_B$ ).....	79
Gráfico 18 - Gráfico de contorno de efetividade média versus $T_{q,ent}$ ; $\dot{V}$ ( $NF_B$ ).....	80
Gráfico 19 - Efeito da interação entre $T_{q,ent}$ e $\dot{V}$ na efetividade média ( $NF_B$ ).....	80
Gráfico 20 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média ( $NF_B$ ).....	81
Gráfico 21 - Resíduos versus valores ajustados (resposta é efetividade média, para o $NF_B$ ).....	82
Gráfico 22 - Probabilidade normal dos resíduos (resposta é efetividade média, para o $NF_B$ ).....	83
Gráfico 23 - Efetividade média versus Temperatura.....	84
Gráfico 24 - Efetividade média versus Vazão.....	84
Gráfico 25 - Taxa de transferência de calor média versus Temperatura.....	85
Gráfico 26 - Taxa de transferência de calor média versus Vazão.....	85
Gráfico 27 - Condutividade térmica média dos fluidos frios.....	86
Gráfico 28 - Viscosidade dinâmica média dos fluidos frios.....	87
Gráfico 29 - Massa específica média dos fluidos frios.....	87
Gráfico 30 - Calor específico à pressão constante médio dos fluidos frios.....	88
Gráfico 31 - Difusividade térmica média dos fluidos frios.....	88
Gráfico 32 – Comparação entre efetividades experimental e calculada pelo modelo de Salimpour (2009).....	94

Gráfico D.1 - Comparação à $T_{q,ent} = 40^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 20 \text{ L/h}$ .....	118
Gráfico D.2 - Comparação à $T_{q,ent} = 40^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 30 \text{ L/h}$ .....	119
Gráfico D.3 - Comparação à $T_{q,ent} = 40^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 40 \text{ L/h}$ .....	120
Gráfico D.4 - Comparação à $T_{q,ent} = 50^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 20 \text{ L/h}$ .....	121
Gráfico D.5 - Comparação à $T_{q,ent} = 50^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 30 \text{ L/h}$ .....	122
Gráfico D.6 - Comparação à $T_{q,ent} = 50^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 40 \text{ L/h}$ .....	123
Gráfico D.7 - Comparação à $T_{q,ent} = 60^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 20 \text{ L/h}$ .....	124
Gráfico D.8 - Comparação à $T_{q,ent} = 60^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 30 \text{ L/h}$ .....	125
Gráfico D.9 - Comparação à $T_{q,ent} = 60^{\circ}\text{C}$ e $\dot{V} = 40 \text{ L/h}$ .....	126

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Condutividade térmica de sólidos e líquidos utilizados em nanofluidos à temperatura ambiente .....	33
Tabela 2 - Valores de $\beta$ para diferentes nanopartículas .....	38
Tabela 3 - Dimensões do TCCTH .....	51
Tabela 4 - Fatores e níveis dos planejamentos fatoriais multiníveis .....	54
Tabela 5 - Tratamentos do planejamento fatorial multiníveis .....	54
Tabela 6 - Experimento fatorial multiníveis para o Nanofluido A ( $\phi = 1,63 \times 10^{-5}$ ) .....	68
Tabela 7 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média ( $NF_A$ ) .....	73
Tabela 8 - Tabela de análise da variância (ANOVA) para o ajuste de um modelo linear com 3 parâmetros ( $NF_A$ ) .....	74
Tabela 9 - Experimento fatorial multiníveis para o Nanofluido B ( $\phi = 6,53 \times 10^{-5}$ ) .....	76
Tabela 10 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média ( $NF_B$ ) .....	81
Tabela 11 - Tabela de análise da variância (ANOVA) para o ajuste de um modelo linear com 3 parâmetros ( $NF_B$ ) .....	82
Tabela 12 - Condutividade térmica ( $k$ ) de AuNF em relação ao fluido-base conforme a literatura .....	89
Tabela 13 - Efetividade de diferentes tipos de trocadores de calor conforme a literatura .....	92
Tabela 14 - Razão entre variações de viscosidade e condutividade térmica dos nanofluidos em relação ao fluido-base .....	93
Tabela A.1 - Propriedades termofísicas da água quente e água fria ( $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$ ) .....	110
Tabela A.2 - Propriedades termofísicas da água quente e água fria ( $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$ ) .....	110
Tabela A.3 - Propriedades termofísicas da água quente e água fria ( $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$ ) .....	110
Tabela A.4 - Propriedades termofísicas da água quente e do $NF_A$ ( $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$ ) .....	111
Tabela A.5 - Propriedades termofísicas da água quente e do $NF_A$ ( $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$ ) .....	111
Tabela A.6 - Propriedades termofísicas da água quente e do $NF_A$ ( $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$ ) .....	111
Tabela A.7 - Propriedades termofísicas da água quente e do $NF_B$ ( $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$ ) .....	112
Tabela A.8 - Propriedades termofísicas da água quente e do $NF_B$ ( $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$ ) .....	112
Tabela A.9 - Propriedades termofísicas da água quente e do $NF_B$ ( $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$ ) .....	112
Tabela B.1 - Números de Reynolds nos lados quente ( $Re_q$ ) e frio ( $Re_f$ ) .....	114

Tabela C.1 - Faixas de Efetividade do TCCTH .....	116
Tabela F. 1 - Temperaturas médias de entrada e saída dos fluidos e desvios-padrão .....	130
Tabela Anexo A. 1 - Condutividade térmica experimental de nanofluidos e fluidos-base .....	137
Tabela Anexo A. 2 - Viscosidade relativa experimental de nanofluidos e fluidos-base.....	138

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Adim.	Adimensional
AuNF	Nanofluido de ouro
2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AISI	<i>American Iron and Steel Institute</i>
CPU	<i>Central Processing Unit</i>
EES	<i>Engineering Equation Solver</i>
MET	Microscopia Eletrônica de Transmissão
MTH	Microtubo helicoidal
NF <sub>A</sub>	Nanofluido com fração volumétrica de nanopartículas igual a $1,63 \times 10^{-5}\%$
NF <sub>B</sub>	Nanofluido com fração volumétrica de nanopartículas igual a $6,53 \times 10^{-5}\%$
NP	Nanopartícula
pH	Potencial Hidrogeniônico
PVP	Polivinilpirrolidona
RPSL	Ressonância de Plasmon de Superfície Localizado
TCCTH	Trocador de calor de casco e tubo helicoidal
UV	Ultravioleta
Vis.	Visível

## LISTA DE SÍMBOLOS

### Letras latinas

$A_e$	área superficial externa do tubo	[m <sup>2</sup> ]
$A_i$	área superficial interna do tubo	[m <sup>2</sup> ]
$\dot{C}_f$	taxa de capacidade calorífica do fluido frio	[J/s.K]
$C_k$	porcentagem de aumento da condutividade térmica	[%]
$c_p$	calor específico à pressão constante	[J/kg.K]
$c_{p,f}$	calor específico do fluido frio à pressão constante	[J/kg.K]
$c_{p,fb}$	calor específico do fluido-base à pressão constante	[J/kg.K]
$c_{p,nf}$	calor específico do nanofluido à pressão constante	[J/kg.K]
$c_{p,np}$	calor específico da nanopartícula à pressão constante	[J/kg.K]
$c_{p,q}$	calor específico do fluido quente à pressão constante	[J/kg.K]
$\dot{C}_q$	taxa de capacidade calorífica do fluido quente	[J/s.K]
$C_\mu$	porcentagem de aumento da viscosidade	[%]
$De$	número de Dean	[adim.]
$D_{e,a}$	diâmetro externo da seção anular	[m]
$d_{e,b}$	diâmetro externo da bobina helicoidal	[m]
$D_{e,c}$	diâmetro externo do casco	[m]
$d_{e,t}$	diâmetro externo do tubo	[m]
$d_{fb}$	diâmetro equivalente da molécula do fluido-base	[m]
$D_{hid}$	diâmetro hidráulico do casco	[m]
$D_{i,a}$	diâmetro interno da seção anular	[m]
$d_{i,b}$	diâmetro interno da bobina helicoidal	[m]
$D_{i,c}$	diâmetro interno do casco	[m]
$d_{i,t}$	diâmetro interno do tubo	[m]
$d_{np}$	diâmetro da nanopartícula	[m]
$f$	fator de atrito	[adim.]
$h_f$	coeficiente de transferência de calor por convecção no lado do fluido frio	[W/m <sup>2</sup> .K]
$h_q$	coeficiente de transferência de calor por convecção no lado do fluido quente	[W/m <sup>2</sup> .K]
$k$	condutividade térmica	[W/m.K]



$k_{\text{Browniano}}$	condutividade térmica associada ao movimento Browniano	[W/m.K]
$k_{\text{estática}}$	condutividade térmica estática	[W/m.K]
$k_f$	condutividade térmica do fluido frio	[W/m.K]
$k_{fb}$	condutividade térmica do fluido-base	[W/m.K]
$k_{nf}$	condutividade térmica do nanofluido	[W/m.K]
$k_{np}$	condutividade térmica da nanopartícula	[W/m.K]
$k_q$	condutividade térmica do fluido quente	[W/m.K]
$k_t$	condutividade térmica do tubo	[W/m.K]
$L_{e,c}$	comprimento externo do casco	[m]
$L_{i,c}$	comprimento interno do casco	[m]
$L_t$	comprimento do tubo	[m]
$M$	massa molar	[kg/kmol]
$\dot{m}_f$	vazão mássica do fluido frio	[kg/s]
$m_{fb}$	massa do fluido-base	[kg]
$m_{np}$	massa da nanopartícula	[kg]
$Mo$	número de Mouromtseff	[adim.]
$Mo_{fb}$	número de Mouromtseff do fluido-base	[adim.]
$Mo_{nf}$	número de Mouromtseff do nanofluido	[adim.]
$\dot{m}_q$	vazão mássica do fluido quente	[kg/s]
$N$	constante de Avogadro	[kmol <sup>-1</sup> ]
$Nu_f$	número de Nusselt no lado do fluido frio	[adim.]
$Nu_q$	número de Nusselt no lado do fluido quente	[adim.]
$p$	passo das espiras da bobina helicoidal	[m]
$Pr_f$	número de Prantl do fluido frio	[adim.]
$Pr_q$	número de Prantl do fluido quente	[adim.]
$\dot{q}_f$	taxa de transferência de calor do fluido frio	[W]
$\dot{q}_{\text{max}}$	taxa de transferência de calor máxima	[W]
$\dot{q}_{\text{obs}}$	taxa de transferência de calor observada experimentalmente	[W]
$\dot{q}_q$	taxa de transferência de calor do fluido quente	[W]
$R^2$	coeficiente de determinação	[adim.]
$Re_{cr}$	número de Reynolds crítico	[adim.]
$Re_f$	número de Reynolds no lado do fluido frio	[adim.]
$Re_q$	número de Reynolds no lado do fluido quente	adim.

$T$	temperatura	[K]
$T_e$	temperatura de entrada do fluido	[K]
$T_{f,ent}$	temperatura de entrada do fluido frio	[K]
$T_{f,sai}$	temperatura de saída do fluido frio	[K]
$T_m$	temperatura média	[K]
$T_{q,ent}$	temperatura de entrada do fluido quente	[K]
$T_{q,sai}$	temperatura de saída do fluido quente	[K]
$T_{r,ent}$	temperatura de entrada do fluido frio no radiador	[K]
$T_{r,sai}$	temperatura de saída do fluido frio do radiador	[K]
$T_s$	temperatura de saída do fluido	[K]
$U_e$	coeficiente global de transferência de calor	[W/m <sup>2</sup> .K]
$\dot{V}$	vazão volumétrica	[m <sup>3</sup> /s]
$V_c$	volume do casco	[m <sup>3</sup> ]
$\dot{V}_f$	vazão volumétrica do fluido frio	[m <sup>3</sup> /s]
$\dot{V}_q$	vazão volumétrica do fluido quente	[m <sup>3</sup> /s]
$V_t$	volume do tubo	[m <sup>3</sup> ]

### Letras gregas

$u_{sc}$	volume da solução concentrada de nanopartículas	[m <sup>3</sup> ]
$u_{nf}$	volume total do nanofluido após diluição	[m <sup>3</sup> ]
$u_{t,np}$	volume total das nanopartículas	[m <sup>3</sup> ]
$\beta$	coeficiente de expansão térmica	[K <sup>-1</sup> ]
$\gamma$	parâmetro adimensional determinado pelo modelo matemático	[adim.]
$\Delta T$	variação de temperatura	[K]
$\Delta T_f$	variação de temperatura do fluido frio	[K]
$\Delta T_{ml}$	média logarítmica das diferenças das temperaturas	[K]
$\Delta T_q$	variação de temperatura do fluido quente	[K]
$\varepsilon$	efetividade do trocador de calor	[adim.]
$\mu$	viscosidade dinâmica	[N.s/m <sup>2</sup> ]
$\mu_f$	viscosidade dinâmica do fluido frio	[N.s/m <sup>2</sup> ]
$\mu_{fb}$	viscosidade dinâmica do fluido-base	[N.s/m <sup>2</sup> ]
$\mu_{nf}$	viscosidade dinâmica do nanofluido	[N.s/m <sup>2</sup> ]

$\mu_q$	viscosidade dinâmica do fluido quente	[N.s/m <sup>2</sup> ]
$\xi$	aglomeração das nanopartículas	[adim.]
$\rho$	massa específica	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_f$	massa específica do fluido frio	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{fb}$	massa específica do fluido-base	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{fb,0}$	massa específica do fluido-base a 293 K	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{nf}$	massa específica do nanofluido	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_{np}$	massa específica da nanopartícula	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\rho_q$	massa específica do fluido quente	[kg/m <sup>3</sup> ]
$\sigma$	aumento da condutividade térmica	[adim.]
$\phi$	fração volumétrica das nanopartículas	[adim.]
$\phi_{sc}$	número de nanopartículas na solução concentrada	[nanopartículas/ mL]
$\phi_{nf}$	número de nanopartículas no nanofluido após diluição	[nanopartículas/ mL]
$k_B$	constante de Boltzmann	[J/K]

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>20</b>
1.1 OBJETIVOS.....	23
1.1.1 Objetivo Geral.....	23
1.1.2 Objetivos Específicos.....	23
1.2 JUSTIFICATIVA.....	23
1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO .....	24
<b>2 REVISÃO DA LITERATURA.....</b>	<b>26</b>
2.1 NANOPARTÍCULAS PARA PRODUÇÃO DE NANOFLUIDOS .....	26
2.1.1 Obtenção de Nanopartículas .....	27
2.1.1.1 Métodos <i>top-down</i> de obtenção de nanopartículas.....	28
2.1.1.2 Métodos <i>bottom-up</i> de obtenção de nanopartículas .....	28
2.2 CARACTERIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS .....	29
2.3 PREPARAÇÃO DE NANOFLUIDOS .....	31
2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS .....	31
2.4.1 Condutividade Térmica .....	32
2.4.1.1 Determinação da condutividade térmica de nanofluidos .....	36
2.4.1.1.1 <i>Técnicas de medição da condutividade térmica</i> .....	36
2.4.1.1.2 <i>Modelos teóricos de cálculo da condutividade térmica de nanofluidos</i> ....	37
2.4.2 Viscosidade.....	39
2.4.2.1 Técnicas de medição da viscosidade de nanofluidos .....	39
2.4.2.2 Modelos teóricos de cálculo da viscosidade de nanofluidos .....	40
2.4.3 Massa Específica e Calor Específico .....	41
2.5 PESQUISAS UTILIZANDO TROCADORES DE CALOR.....	42
2.5.1 Pesquisas a Respeito dos Parâmetros Geométricos de TCCTH.....	42
2.5.2 Pesquisas Utilizando Nanofluidos em TCCTH.....	43
2.5.3 Pesquisas Utilizando Nanofluidos em Outros Tipos de Trocadores de Calor	45
<b>3 METODOLOGIA.....</b>	<b>48</b>
3.1 MATERIAIS E MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO .....	48
3.1.1 Síntese das Nanopartículas e Produção do Nanofluido.....	48
3.1.2 Caracterização das Nanopartículas .....	49
3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL.....	50
3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS .....	53
3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL .....	56

3.5 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS .....	57
3.5.1 Cálculo das Propriedades Termofísicas dos Fluidos .....	57
3.5.2 Cálculo da Taxa de Transferência de Calor e da Efetividade do TCCTH .....	59
3.5.3 Cálculo do Coeficiente Global de Transferência de Calor .....	61
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>66</b>
4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS.....	66
4.2 ANÁLISE FATORIAL .....	68
4.2.1 Análise Fatorial Multiníveis (Nanofluido A).....	68
4.2.2 Análise Fatorial Multiníveis (Nanofluido B).....	76
4.3 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS NANOFLUIDOS E RELAÇÃO COM SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS .....	83
4.3.1 Comparação com Resultados Disponíveis na Literatura .....	89
4.3.2 Razão entre as Variações de Viscosidade e Condutividade Térmica.....	93
4.4 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO HIDRÁULICO NA EFETIVIDADE CALCULADA.....	94
<b>5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....</b>	<b>96</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE A - Tabelas (Propriedades Termofísicas) .....</b>	<b>109</b>
<b>APÊNDICE B - Faixas de Números de Reynolds .....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE C - Tabela de Faixas de Efetividade do TCCTH.....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE D - Comparação entre <math>\dot{q}</math> teórica e experimental.....</b>	<b>117</b>
<b>APÊNDICE E - Trabalhos apresentados utilizando o TCCTH.....</b>	<b>127</b>
<b>APÊNDICE F - Temperaturas médias de entrada e saída dos fluidos.....</b>	<b>129</b>
<b>APÊNDICE G - Código utilizado no <i>software</i> EES® .....</b>	<b>131</b>
<b>ANEXO A - Propriedades de alguns nanofluidos.....</b>	<b>136</b>

## 1 INTRODUÇÃO

A nanociência tem propiciado diversas inovações ao tratar do estudo da matéria em escala nanométrica; por intermédio da nanotecnologia, possibilita-se a síntese, a manipulação e a aplicação de materiais em nanoescala (BAIT; AMEUR, 2018; NI; SHI; WANG, 2018; CAI et al., 2019; MA et al., 2019).

Embora o desenvolvimento de materiais com propriedades físicas, químicas e biologicamente aperfeiçoadas pareça recente, na realidade ocorre há mais de 4500 anos, quando nanofibras de asbesto eram adicionadas à cerâmica, mesmo que resultados da manipulação da matéria e efeitos da nanoescala ainda não fossem devidamente correlacionados (JEEVANANDAM et al., 2018). Outro exemplo disto são os vitrais medievais, que além de apresentarem coloração diferenciada decorrente da adição de nanopartículas de ouro em sua composição, adquiriram efeito catalítico, purificando o ar (RÓZ et al., 2015, p. 6).

Nanopartículas são materiais com, no mínimo, uma de suas dimensões medindo de 1 a 100 nm (BILIUTA; COSERI, 2019); nesta definição alguns autores também incluem nanotubos, fulerenos e nanofios (LEE, 2008, p. 222-223; NAIK; VINOD, 2018). As nanopartículas podem ser produzidas de diferentes maneiras, via método *bottom-up* (de baixo para cima) ou via *top-down* (de cima para baixo). No primeiro caso trata-se da síntese química, em que há agregação de precursores atômicos, um posterior desenvolvimento de *clusters*, e finalmente a formação de uma nanoestrutura; e no segundo, da síntese física, método que consiste na produção de nanopartículas a partir de um volume maior por meio de desgaste físico (PANDE; BHASKARWAR, 2016, p. 76; VERMA; EBENSO; QURAIISHI, 2019). Destaca-se que as propriedades singulares de uma nanopartícula, de acordo com Lee (2012), dependem do procedimento empregado em sua síntese.

Uma das utilizações das nanopartículas realiza-se na produção de uma outra classe de fluidos, que são suspensões de nanopartículas em fluidos-base, às quais Choi e Eastman (1995) atribuíram a denominação de nanofluidos.

Os nanofluidos têm se destacado pelas suas vantagens proporcionadas na transferência de calor em comparação aos fluidos de arrefecimento comumente utilizados, como por exemplo, água, etileno glicol e óleo de motor (ABDELRAZEK et al., 2018; ZENDEHBOUDI et al., 2019).

A redução do volume das nanopartículas lhes confere aumento de sua área superficial em contato com o fluido-base, favorecendo as trocas térmicas (KOCA et al., 2018). Além disso, partículas metálicas e de óxidos metálicos apresentam condutividade térmica superior à de líquidos, conseqüentemente, elevando a condutividade térmica do fluido-base ao qual forem adicionadas (ALI; TEIXEIRA; ADDALI, 2018). Portanto, ao se misturarem essas duas substâncias, é possível a obtenção de um material que se comporte como fluido, porém com características próximas do metal ou do óxido metálico (BIGLARIAN et al., 2017).

Dados da literatura mostram que a condutividade térmica dos nanofluidos correlaciona-se com a fração volumétrica, a composição, a forma e o tamanho da partícula; e com a composição e temperatura de seu fluido-base (AHMADI et al., 2018; GUO et al., 2018; SALAZAR; NIGAM; SOLORIO, 2018). Acrescentando que a acidez e a presença de aditivos também são fatores que influenciam a condutividade térmica (MINEA, 2017).

A estabilização dos nanofluidos é um dos maiores desafios para sua aplicabilidade; aglomerações de nanopartículas podem causar incrustações nas paredes das tubulações (FRAGELLI et al., 2018). Embora seja possível utilizar surfactantes visando-se evitar aglomerações, em alguns casos, estes afetam propriedades importantes como viscosidade e condutividade térmica (OLIVEIRA et al., 2017). A determinação das propriedades termofísicas dos nanofluidos e a análise das suas características de transferência de calor são, também, desafiadoras (SUKARNO, 2017; SAJID; ALI, 2019).

O aproveitamento dos nanofluidos em sistemas de resfriamento pode ser realizado por trocadores de calor (ZENDEHBOUDI et al., 2019), dispositivos estes que viabilizam a transferência de energia térmica de um fluido quente para um fluido frio através de uma superfície existente entre os mesmos (BARROS et al.; 2019). Os trocadores de calor podem ser aplicados em sistemas de produção de potência mecânica, na recuperação de calor de processos e na climatização de ambientes (INCROPERA et al., 2011, p. 425).

Dentre suas possíveis configurações construtivas, cabe mencionar o trocador de calor com tubo helicoidal, que consiste em um tubo com formato espiral disposto no interior de um casco cilíndrico. Sua taxa de transferência de calor é superior à de tubos retos, pois tubos helicoidais apresentam um padrão de escoamento secundário em planos normais ao seu escoamento principal (BHANVASE et al., 2018). Entretanto,

limita-se a fluidos limpos, pois suas formas dificultam a limpeza do interior de seus tubos (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012, p. 12).

A relevância dos nanofluidos na engenharia deve-se à sua utilização em sistemas de refrigeração, ar condicionado, lubrificação, assim como em diversas aplicações nas quais se necessita dissipar altos fluxos térmicos (HUSSIEN; ABDULLAH; AL-NIMR, 2016), tais como radiadores, dispositivos eletroeletrônicos, sistemas de energia solar, sistemas da nanomedicina, dentre outras.

Radiadores desempenham função essencial na prevenção de superaquecimento ocasionado pela combustão e o atrito em motores automotivos. Em sistemas convencionais, água é bombeada pelo radiador através das câmaras do bloco do motor para absorver o calor e então dissipá-lo. Desde o ano 2000, nanorefrigerantes vêm sendo empregados em radiadores automotivos, visando-se o aumento de sua eficiência no resfriamento, bem como a sua miniaturização. Pesquisas experimentais em arrefecimento de motores automotivos demonstram que a dispersão de nanopartículas em fluido-base pode, por exemplo, aumentar em até 94% o coeficiente de transferência de calor com a adição de 10% em volume de  $Al_2O_3$  a etileno glicol e água (SIDIK; YAZID; MAMAT, 2017).

Outra aplicação importante dos nanofluidos, devido à sua condutividade térmica superior, tem o intuito de prolongar a vida útil de dispositivos eletroeletrônicos, suscetíveis a danos causados por cargas térmicas exacerbadas. Contudo, a melhora do desempenho térmico em sistemas de resfriamento, aliada à redução de sua área superficial, representa um desafio para a indústria eletroeletrônica (BUSCHMANN et al., 2018). Para que seja aplicável em sistemas de resfriamento de computadores, o nanofluido precisa ter estabilidade, não impactar quimicamente nem corroer o sistema, além de apresentar aspectos econômicos favoráveis (GANVIR; WALKE; KRIPLANI, 2017; BAHIRAEI; HESHMATIAN, 2018).

Em coletores solares, nanofluidos desempenham a função de absorção de calor, possibilitando a redução de custos com a elevação da eficiência térmica do sistema, sendo esta influenciada pelo aumento da concentração das nanopartículas (BEICKER, 2016; SHARAFELDIN; GRÓF, 2018; RASIH; SIDIK; SAMION, 2019).

Outras aplicações que abrangem o uso de nanofluidos concentram-se na área médica: em criocirurgia – método inovador que destrói tecidos indesejados pelo seu congelamento, em tratamentos contra o câncer; e em refrigeração de áreas em cirurgia, evitando o risco de danificação do órgão. Além disso, nanofluidos magnéticos



são utilizados em *drug delivery* – conduzindo partículas pela corrente sanguínea até um tumor, por exemplo (TAWFIK, 2017).

## 1.1 OBJETIVOS

### 1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo principal avaliar o desempenho de um nanofluido de ouro como líquido de arrefecimento, em um trocador de calor de casco e tubo helicoidal, utilizando-se água como fluido quente.

### 1.1.2 Objetivos Específicos

Os objetivos específicos deste trabalho são:

- determinar as propriedades termofísicas do nanofluido utilizado;
- realizar testes de transferência de calor com água e com nanofluido de ouro, em diferentes condições do sistema, visando conhecer, a partir de um planejamento fatorial multiníveis, os efeitos da fração volumétrica das nanopartículas, da vazão dos fluidos envolvidos e da temperatura de entrada do fluido quente, sobre a efetividade de um trocador de calor de casco e tubo helicoidal;
- comparar os resultados experimentais com os calculados a partir de modelo matemático existente na literatura para o tipo de trocador de calor analisado.

## 1.2 JUSTIFICATIVA

De acordo com Ali, Teixeira e Addali (2018), o mau funcionamento de microfluidos em sistemas de refrigeração tem estimulado a pesquisa sobre nanofluidos, já que estes reduzem os problemas de obstrução dos equipamentos.

Sharif et al. (2017) destacam as vantagens decorrentes da utilização de nanofluidos, tais como eficiência térmica elevada, miniaturização e leveza dos trocadores de calor, sendo esta última característica determinante na economia de combustível se empregada em aparelhos de ar condicionado automotivos.

Segundo Aljehani et al. (2018), estudos evidenciaram que o consumo de energia elétrica aumenta aproximadamente 20% em Austin - Texas, 30% em Madrid e 50% na Arábia Saudita, em horários de pico no verão; o que é atribuído à utilização

de aparelhos de ar condicionado. O uso de nanofluidos pode diminuir os custos de energia em bilhões de dólares, conforme pesquisa realizada por Mohammed et al. (2011), na qual verificou-se que com o aumento de 1% na eficiência de *chillers*, apenas nos Estados Unidos economizaram-se 320 bilhões de kWh por ano.

Mas, apesar da ampla aplicabilidade dos nanofluidos como líquidos de arrefecimento, os mecanismos de transferência de calor em micro e nanocanais ainda não são completamente compreendidos; estudos experimentais e numéricos relatam um aumento da interação entre as interfaces líquida e sólida com a diminuição das dimensões do sistema, o que afeta a dinâmica do escoamento, impactando também propriedades termodinâmicas do fluido, tais como difusividade e viscosidade (FRANK; DRIKAKIS, 2017). Estas interações entre líquido e sólido produzem uma condição de não equilíbrio no fluido, e ainda não há uma teoria que a caracterize satisfatoriamente, gerando resultados controversos entre diversos grupos de pesquisa (KALYONCU; BARISIK, 2017).

Além disso, de acordo com Murshed e Estellé (2017), há escassez de estudos sobre nanofluidos metálicos, possivelmente devido ao seu maior custo e à maior dificuldade de sua dispersão, em comparação aos não metálicos.

Dessa forma, embora se conheçam os fatores que influenciam as propriedades termofísicas dos nanofluidos, as informações disponíveis sobre o tema são insuficientes, e em cada caso específico é necessário que se faça uma análise particular de suas propriedades, para então se observarem as variáveis mais relevantes em seu desempenho (OLIVEIRA et al., 2017).

Os benefícios de se utilizar nanofluidos como líquido de arrefecimento e a falta de consenso entre seus pesquisadores quanto aos mecanismos de transferência de calor nessa classe de fluidos (RUDYAK; MINAKOV, 2018; XIAN; SIDIK; NAJAFI, 2019), motivam novas investigações sobre o assunto, como o presente trabalho.

### 1.3 ESTRUTURA DO TRABALHO

O Capítulo 1 apresenta uma introdução ao tema do presente trabalho, além dos objetivos e da justificativa para a sua realização.

O Capítulo 2 expõe uma revisão da literatura sobre nanopartículas, nanofluidos e sua utilização em experimentos com trocadores de calor.

O Capítulo 3 descreve os materiais e métodos empregados para síntese e caracterização das nanopartículas de ouro, testes de transferência de calor e determinação das propriedades termofísicas dos fluidos utilizados no presente trabalho.

O Capítulo 4 aborda os resultados de caracterização das nanopartículas, da análise fatorial e do tratamento dos dados experimentais obtidos nos testes de transferência de calor.

O Capítulo 5 discute as conclusões do presente estudo e sugestões para trabalhos futuros.

O Apêndice A apresenta as tabelas com propriedades termofísicas dos fluidos; o Apêndice B, as faixas de números de Reynolds atingidas pelos fluidos; o Apêndice C, tabela de faixas de efetividade do TCCTH; o Apêndice D, a comparação entre as taxas de transferência de calor teórica e experimental; o Apêndice E, os trabalhos apresentados utilizando o TCCTH e o Apêndice F, as temperaturas de entrada e de saída dos fluidos.

O Anexo A dispõe de valores de propriedades de alguns nanofluidos, conforme resultados de pesquisas de diversos autores.

## 2 REVISÃO DA LITERATURA

Neste capítulo apresenta-se uma revisão da literatura sobre nanopartículas, sua obtenção e caracterização, os métodos de preparação de nanofluidos e suas propriedades termofísicas. Aborda-se também a descrição de alguns trabalhos encontrados na literatura sobre experiências realizadas com nanofluidos em trocadores de calor.

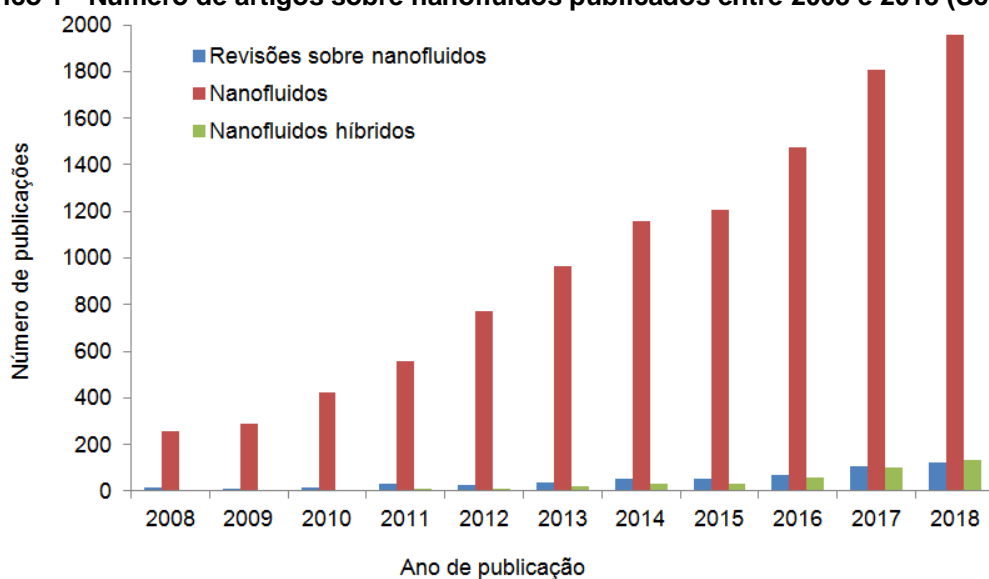
### 2.1 NANOPARTÍCULAS PARA PRODUÇÃO DE NANOFLUIDOS

Nanofluidos são dispersões coloidais de partículas sólidas em fluidos-base; tais nanopartículas podem ser metálicas (ouro, cobre, níquel, alumínio, prata, etc.), e de óxidos metálicos, como óxido de titânio ( $\text{TiO}_2$ ), dióxido de zircônio ( $\text{ZrO}_2$ ), titanato de bário ( $\text{BaTiO}_3$ ), óxido de alumínio ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ), óxido cúprico ( $\text{CuO}$ ), magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ), dióxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) e óxido de zinco ( $\text{ZnO}$ ). Carbetos de silício ( $\text{SiC}$ ), nanotubos de carbono, nitreto de alumínio ( $\text{AlN}$ ), grafeno, carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ), dentre outros, também são utilizados na produção de nanofluidos (DAS, 2017; ABDELRAZEK et al., 2018, p. 161).

Além disso, nanofluidos híbridos têm sido investigados por serem convenientes quando um único tipo de nanopartículas não apresenta propriedades favoráveis, tais como condutividade térmica e viscosidade. Sua preparação é realizada por meio da suspensão de dois ou mais tipos de nanopartículas em um fluido-base, ou pela suspensão de nanocompósitos híbridos em fluido-base (SAJID; ALI, 2018).  $\text{Al}_2\text{O}_3$ -Cu/água, Cu- $\text{TiO}_2$  e CuO-Cu/água são alguns exemplos de nanofluidos híbridos; contudo, como ainda se encontram em estágio de desenvolvimento, requer-se extensa pesquisa sobre suas propriedades termofísicas, síntese e caracterização, até que sua aplicação comercial se torne viável (BABU; KUMAR; RAO, 2017).

O Gráfico 1 apresenta o número de publicações sobre nanofluidos e nanofluidos híbridos durante a década de 2008 a 2018.

**Gráfico 1 - Número de artigos sobre nanofluidos publicados entre 2008 e 2018 (Scopus)**



Fonte: Autoria própria

Pode-se observar, por meio da Figura 1, o avanço contínuo em estudos publicados sobre nanofluidos. Com base no número de publicações sobre o tema, que foi de aproximadamente 255 no ano de 2008, e cresceu para 1958 no ano de 2018, houve um aumento de 768% no número de trabalhos sobre nanofluidos, publicados durante o referido decênio. Estes dados demonstram o crescente interesse da comunidade científica pelas potencialidades dos nanofluidos e sua relevância.

### 2.1.1 Obtenção de Nanopartículas

Existem duas vias de obtenção de nanopartículas: *top-down* (de cima para baixo) e *bottom-up* (de baixo para cima) (PANDE; BHASKARWAR, 2016).

Na via *top-down* ocorre uma remoção de massa de um determinado material, e a conseqüente formação da nanoestrutura. A via *bottom-up* consiste na agregação de unidades em escala nanométrica, que podem ser átomos, moléculas, polímeros e coloides, e a subsequente formação de um sistema nanoestruturado (LEE, 2008, p. 174).

Há também métodos híbridos, em que se inicia o processo de síntese pela via *top-down* e em seguida adota-se a via *bottom-up*; ou de modo contrário, inicia-se a síntese pela via *bottom-up* para então empregar-se a via *top-down*, de acordo com a especificidade do sistema pretendido (LEE, 2008, p. 174).

Cada sistema nanoestruturado apresenta aspectos oriundos de sua forma de fabricação; em escala industrial as características geradas por cada uma das vias

(*top-down* e *bottom-up*) podem ser melhoradas ao se realizar a preparação híbrida. Precisão e controle exato das unidades construtivas são exemplos de fatores importantes propiciados pela via *top-down*, enquanto diversidade das unidades construtivas e quiralidade (propriedade de assimetria) provêm da via *bottom-up*. Ao se aliarem as duas vias é possível a obtenção de nanopartículas que apresentem as vantagens de ambas, além de processabilidade e integridade estrutural do sistema nanoestruturado (LEE, 2012, p. 351).

#### 2.1.1.1 Métodos *top-down* de obtenção de nanopartículas

Um dos métodos *top-down* de obtenção de nanopartículas mais empregados na indústria consiste no desgaste mecânico (ou moagem mecânica). A moagem mecânica de alta energia permite que partículas com diâmetros de aproximadamente 50  $\mu\text{m}$  sofram diminuição de tamanho, ao serem dispostas com esferas de aço ou de compostos de tungstênio, em câmaras seladas sob intensa agitação (RÓZ et al., 2015, p. 151).

Uma das desvantagens do processo de moagem é a contaminação do material devido ao atrito com as esferas, que, entretanto, pode ser minimizada com menores rotações de agitação (PANJIAR; GAKKHAR; DANIEL, 2015). Para se diminuirmos os níveis de contaminação, uma alternativa é a redução da razão entre a massa da esfera e a massa inicial da partícula, pois quanto maior for essa razão maior será o número de colisões em relação ao tempo (CIPOLLONI et al., 2015).

#### 2.1.1.2 Métodos *bottom-up* de obtenção de nanopartículas

Nestes métodos ocorre a união de precursores atômicos ou iônicos, formando partículas maiores, por meio de precipitação ou condensação dos produtos; ou por separação destes através de solventes (PANDE; BHASKARWAR, 2016).

De acordo com a teoria de Lamer e Dinegar (1950), a formação de nanopartículas se dá por nucleação e crescimento. O aumento da concentração dos monômeros (até atingir a supersaturação) dá início à formação de núcleos, seguida da agregação contínua desses monômeros no núcleo e diminuição gradativa de sua concentração na solução. Por fim, a adição de surfactantes estabiliza a superfície das partículas (WASEDA; MURAMATSU, 2004, p. 26).

A síntese via sol-gel é um exemplo de técnica *bottom-up*, muito utilizada para a produção de dispersões coloidais de óxidos e de nanoestruturas *core-shell* (com um núcleo e uma casca). Consiste na dissolução de um precursor, que pode ser um sal metálico inorgânico (acetato, cloreto, nitrato, sulfato) ou um alcóxido metálico (precursor para alumina, sílica, titânio, zircônio, etc.) em um solvente aquoso ou orgânico, e posterior adição de um catalisador para provocar hidrólise e condensação. A hidrólise transforma o precursor em sol (dispersão coloidal de partículas em líquido) e a subsequente condensação o transforma em gel; essas duas etapas formam agregados de óxidos ou hidróxidos metálicos (LUNGU et al., 2015, p. 107; RÓZ et al., 2015, p. 156).

A redução metálica é outra técnica *bottom-up* para produção de suspensões coloidais de nanopartículas metálicas. Emprega diversos tipos de sais metálicos adicionados a surfactantes e agentes redutores, podendo ser realizada à temperatura ambiente, a depender do agente redutor utilizado na reação. O método de Turkevich, Stevenson e Hillier (1951) é uma das técnicas mais comuns de redução metálica; refere-se à redução de ácido cloroáurico ( $\text{HAuCl}_4$ ) em meio aquoso de citrato de sódio ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ), resultando na formação de nanopartículas de ouro da ordem de 20 nm. Técnicas modificadas de redução de ouro foram desenvolvidas posteriormente, com o emprego de outros estabilizantes e a variação da proporção entre estes e o sal precursor, a fim de se controlar não apenas o tamanho das nanopartículas formadas, mas também sua estabilidade (AGUNLOYE; GAVRIILIDIS; MAZZEI, 2017).

## 2.2 CARACTERIZAÇÃO DE NANOPARTÍCULAS

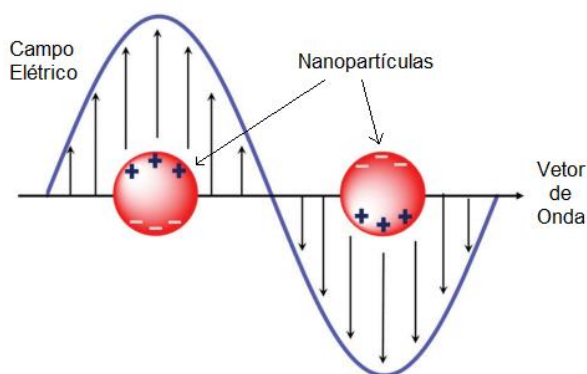
A partir do progresso da síntese de nanopartículas percebeu-se a primordialidade de se determinar suas características físico-morfológicas, já que nanomateriais exibem propriedades diferentes daquelas de sistemas com maiores dimensões (LUNGU et al., 2015, p. 236).

Espectroscopia de Absorção no Ultravioleta e Visível (UV-Vis), Método de Obtenção do Potencial Zeta e Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) são algumas das ferramentas empregadas na caracterização de nanopartículas.

De acordo com Sajid e Ali (2018), a Espectroscopia de Absorção no Ultravioleta e Visível (UV-Vis) é um método que monitora a intensidade das bandas

de absorção da radiação ultravioleta/visível pelo material analisado, na faixa de 190 a 1100 nm, e permite a avaliação da estabilidade de nanofluidos. Incide-se luz através de uma solução da amostra, sendo que a absorção da mesma promove elétrons do estado fundamental para o estado excitado. A obtenção do espectro de absorção se dá por meio da razão entre as intensidades da luz transmitida e incidente. Segundo Olson et al. (2015), a oscilação dos elétrons livres nas nanopartículas cria uma densidade de carga superficial, que por sua vez, gera o aparecimento de um campo elétrico restaurador do equilíbrio após a distorção das cargas (Figura 1); esse fenômeno, denominado Ressonância Plasmônica ou Ressonância de Plasmon de Superfície Localizado (RPSL), causa intensa absorção de luz na região visível do espectro eletromagnético.

**Figura 1 - Ilustração do fenômeno de Ressonância Plasmônica em nanopartículas**



**Fonte: Olson et al. (2015)**

A técnica para avaliação do Potencial Zeta, outra técnica utilizada para caracterização de nanopartículas, mede a magnitude das cargas entre o fluido-base e a camada em contato com as nanopartículas em suspensão. Este parâmetro é apropriado para predição da estabilidade do nanofluido, que é sua capacidade de se conservar inalterado por um tempo determinado e em condições pré-definidas (SAJID; ALI, 2018).

Na Microscopia Eletrônica de Transmissão, outra técnica utilizada na caracterização das nanopartículas, os elétrons acelerados (a partir de 100 keV) são incididos e espalhados sobre a amostra a ser analisada, para se conhecer a estrutura interna do material; ressaltando que a espessura da amostra deve ser de no máximo 1  $\mu\text{m}$  (WASEDA; MURAMATSU, 2004, p. 163). Em regiões heterogêneas (limites de grãos, defeitos, variações de densidades, etc.) ocorre espalhamento inelástico dos



elétrons, resultando em intensidades diferentes dos elétrons transmitidos. É uma das técnicas mais utilizadas em análise de nanopartículas (RÓZ et al., 2015, p. 161).

Outras técnicas também podem ser empregadas na caracterização de nanopartículas, tais como Difração de Raio-X, Espectroscopia Raman e Microscopia de Força Atômica, no entanto, não serão contempladas no presente estudo.

### 2.3 PREPARAÇÃO DE NANOFLUIDOS

A preparação de nanofluidos é de grande relevância em transferência de calor. Erros no procedimento podem resultar em transferência de calor bifásica (sólido-líquido), e agregação de nanopartículas, que por sua vez podem gerar partículas maiores e instabilidade, além de obstrução de tubos, bombas, e de outros componentes do ciclo térmico. Os nanofluidos podem ser preparados pelos métodos de uma ou duas etapas (GANVIR; WALKE; KRIPLANI, 2017).

O método de uma etapa consiste no processo simultâneo de produção e dispersão das nanopartículas no fluido-base, que evita problemas relacionados a secagem, armazenamento e transporte das nanopartículas. Devido à dificuldade de se obter nanofluidos estáveis pelo método de duas etapas, diversas técnicas de uma etapa têm sido desenvolvidas, tais como a ablação a *laser* e síntese de nanopartículas por arco submerso, de forma que nanofluidos são produzidos mediante a vaporização do metal e seu resfriamento no mesmo recipiente que contém o fluido-base (GANVIR; WALKE; KRIPLANI, 2017).

No método de duas etapas, os nanomateriais, produzidos previamente pelas vias *top-down* ou *bottom-up* de síntese de nanopartículas, são introduzidos em um fluido-base. Para a obtenção do nanofluido, em geral mistura-se o fluido-base a um dispersante, ajusta-se o potencial hidrogeniônico (pH) dessa mistura que em seguida recebe as nanopartículas, sendo então agitada por vibrações ultrassônicas com intuito de se minimizarem as aglomerações (YANG; DU, 2017).

O método de duas etapas é notadamente o mais econômico para produção de nanofluidos em larga escala (GANVIR; WALKE; KRIPLANI, 2017).

### 2.4 PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS DOS NANOFLUIDOS

A suspensão de nanopartículas em um fluido-base altera suas propriedades termofísicas, tais como condutividade térmica ( $k$ ), viscosidade ( $\mu$ ), massa específica

( $\rho$ ) e calor específico ( $c_p$ ), que por sua vez influenciam na transferência de calor por convecção (BAIT; AMEUR, 2018).

Dados da literatura evidenciam que o aumento da fração volumétrica das nanopartículas eleva a condutividade térmica do nanofluido, mas afeta também a viscosidade do mesmo; um aumento excessivo da viscosidade suprime o escoamento, elevando assim a potência de bombeamento requerido pelo sistema (LAUKKANEN; SEPPÄLÄ, 2018).

Embora o efeito da temperatura nas propriedades termofísicas venha sendo extensamente estudado para diversos tipos de nanofluidos, os resultados dos experimentos não são homogêneos e muitas vezes são contraditórios, devido à ausência de padronização dos parâmetros envolvidos nos testes, tais como tamanho e material das nanopartículas, composição do fluido-base, escala de temperatura, dentre outros (HUSSEIN; KADIRGAMA; NOOR, 2017).

Apesar dos esforços na tentativa de se prever o efeito de cada parâmetro em transferência de calor, os dados de pesquisas sobre nanofluidos ainda são insuficientes para identificação de suas tendências no aumento da transferência de calor (GUPTA et al., 2017).

Na sequência serão apresentadas e discutidas as principais propriedades termofísicas dos nanofluidos.

#### 2.4.1 Condutividade Térmica

A condutividade térmica é classificada como uma propriedade de transporte que indica a capacidade da matéria para transferir energia por difusão, e depende da estrutura física do material (INCROPERA et al., 2011, p. 39).

Os fatores que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos são: material da nanopartícula e do fluido-base; tamanho, formato e fração volumétrica das nanopartículas; temperatura; aglomerações; pH e movimento Browniano (GUPTA et al., 2017; BAIT; AMEUR, 2018).

A condutividade térmica de sólidos é geralmente maior que a de líquidos, e a destes é maior que a de gases. Devido ao espaçamento intermolecular maior, nos gases o transporte de energia térmica ocorre por ondas vibracionais em vez de se dar por migração de elétrons livres, como no caso dos metais puros, nos quais a contribuição dos elétrons é dominante na transferência de calor por condução. Nos

metais impuros, os elétrons e fônons apresentam contribuições equivalentes (KITTEL, 1978, p. 174). Devido à diferença no espaçamento intermolecular, um sólido pode apresentar condutividade térmica maior do que a de um líquido em até três ordens de grandeza (PATEL et al., 2003), e do que a de um gás em até quatro ordens de grandeza (INCROPERA et al., 2011, p. 39, 40).

Conseqüentemente, a adição de partículas sólidas a um líquido pode contribuir para o aumento da condutividade térmica do nanofluido produzido (ABDELRAZEK et al., 2018). Para efeito de comparação, os valores da condutividade térmica de alguns sólidos e líquidos utilizados na preparação de nanofluidos são mostrados na Tabela 1. A condutividade térmica relativa de alguns nanofluidos é apresentada no Anexo A.

**Tabela 1 - Condutividade térmica de sólidos e líquidos utilizados em nanofluidos à temperatura ambiente**

Sólidos/Líquidos	Materiais	k (W/m.K)
Sólidos metálicos	Prata	429
	Cobre	401
	Ouro	317
	Alumínio	237
	Óxido cúprico (CuO)	20
Sólidos não metálicos	Diamante	3300
	Nanotubos de carbono	3000
	Alumina (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )	40
Líquidos metálicos	Sódio @644 K	72,3
Líquidos não metálicos	Água	0,613
	Etileno glicol	0,253
	Óleo de motor	0,144

**Fonte: Adaptado de Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012)**

Quanto aos líquidos de arrefecimento, de acordo com a base de dados *Scopus*, em publicações de 2008 até janeiro de 2018, os mais comumente empregados como fluidos-base para a produção de nanofluidos, são: água (2258 artigos), etileno glicol (385 artigos) e óleo (485 artigos).

A respeito da condutividade térmica do fluido-base, diversos autores, ao comparar o uso de diferentes fluidos-base para um mesmo tipo de nanopartículas, perceberam que os fluidos-base com menores condutividades térmicas conferem maior condutividade térmica ao nanofluido (DAS, 2017).

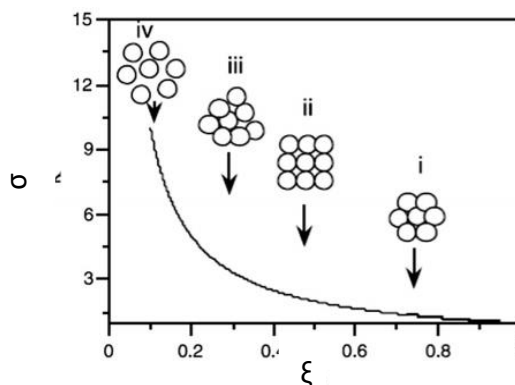
Em geral, nanofluidos compostos por partículas com formato cilíndrico apresentam maior condutividade térmica em comparação aos compostos por partículas esféricas, pois partículas com formato alongado possuem maior área superficial e, portanto, maior área de contato com o fluido-base (SUGANTHI; RAJAN, 2017). Quanto ao tamanho, afirma-se que nanopartículas menores apresentam condutividade maior, também devido à sua maior área superficial (TAWFIK, 2017).

De acordo com Gupta et al. (2017), geralmente, elevando-se a temperatura dos nanofluidos, estes apresentam maiores aumentos de condutividade térmica. Há exceções, como o estudo de Suganthi et al. (2014), no qual o nanofluido mostrou resultado inverso; salientando que o fluido-base era etileno glicol e tal comportamento foi atribuído ao aumento da espessura de sua camada molecular com a diminuição da temperatura; esse arranjo ordenado das moléculas apresenta condutividade térmica superior.

O maior desafio para o desenvolvimento de nanofluidos apropriados é a sua estabilização, já que nanomateriais dispersos em líquidos tendem a se aglomerar devido às forças atrativas de van der Waals (GANVIR; WALKE; KRIPLANI, 2017; SUGANTHI; RAJAN, 2017; MOTEVASEL; NAZAR; JAMIALAHMADI, 2018).

Consequentemente, aglomerações levam à diminuição da condutividade térmica, prejudicando a transferência de calor. A Figura 2, baseada em estudos experimentais, na qual  $\sigma$  representa o aumento da condutividade térmica (adimensional) e  $\xi$  a aglomeração das partículas (adimensional), ilustra que aglomerações menos compactas permitem um maior aumento na transferência de calor em comparação a aglomerações mais compactas (PINTO; FIORELLI, 2016).

**Figura 2 - Influência da aglomeração de nanopartículas na condutividade térmica de nanofluidos**



Fonte: Adaptado de Pinto e Fiorelli (2016)

Wang, Shi e Chai (2018) observaram, em um estudo numérico sobre convecção natural de nanofluido de  $Al_2O_3$  em fluido-base de água, que o acréscimo de nanopartículas acima da fração volumétrica responsável pelo aumento máximo da transferência de calor, causou diminuição na transferência de calor, o que é atribuído pelos autores à aglomeração de nanopartículas.

Visando-se evitar as aglomerações, banho de ultrassonografia, sonda de ultrassonografia, agitação mecânica e agitação magnética são algumas das ferramentas que utilizam energia mecânica para dispersar nanomateriais em líquidos. Estabilização eletrostática (alteração da dispersão do pH de modo a mudar a carga superficial das nanopartículas, criando forças repulsivas entre as mesmas) e estabilização estérica ou eletroestérica (adição de surfactantes) também têm sido empregadas a fim de minimizar as interações entre as nanopartículas e assim atingir a estabilidade coloidal (SUGANTHI; RAJAN, 2017).

Surfactantes são aditivos que desempenham a função de estabilizar o nanofluido, diminuindo a tensão interfacial entre as nanopartículas suspensas e o fluido-base, criando afinidade entre ambos (SAJID; ALI, 2018). Além disso, aumentam a repulsão elétrica entre as nanopartículas e o fluido-base ao formarem uma camada superficial na nanopartícula e uma camada difusiva no fluido-base, conseqüentemente diminuindo a aglomeração (BABU; KUMAR; RAO, 2017).

Surfactantes, que são moléculas anfífilas (possuem uma região hidrofílica e uma região hidrofóbica), possibilitam o crescimento de nanopartículas em uma etapa; e são responsáveis por arranjá-las em nanoestruturas altamente organizadas, além de influenciar sua forma e tamanho (NIEDERBERGER; PINNA, 2009, p. 31).

Os surfactantes convertem quimicamente as nanopartículas de hidrofóbicas a hidrofílicas ou vice-versa, dependendo do tipo do fluido-base e das nanopartículas (SAJID; ALI, 2018). Também podem aumentar o Potencial Zeta do nanofluido, incrementando a carga superficial das nanopartículas dispersas no fluido-base, levando à repulsão das partículas circunvizinhas (ALI; TEIXEIRA; ADDALI, 2018).

Dodecil benzeno sulfonato de sódio, sulfato de dodecil de sódio, brometo de cetil trimetil amônio, brometo de dodecil trimetil amônio, brometo de hexa-dicetil-trimetil amônio, octalato de sódio olicácido, polivinilpirrolidona, goma arábica e octilsilano são alguns exemplos de surfactantes convencionalmente utilizados. Sua seleção relaciona-se com a combinação entre as nanopartículas e o fluido-base, para obtenção dos resultados pretendidos (BABU; KUMAR; RAO, 2017).

Quanto ao pH, apesar de não existirem muitos estudos sobre sua influência na condutividade térmica de nanofluidos, observa-se que um fluido-base com pH mais ácido resulta em maior elevação da condutividade térmica. Um nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  com pH igual a 11,5 mostrou condutividade térmica 19% superior em relação ao seu fluido-base (água), enquanto para o mesmo nanofluido, porém com pH igual a 2, o aumento foi de 23% (GUPTA et al., 2017).

A adição de nanopartículas a fluidos-base demonstra aumentar a sua condutividade térmica e esse fato é associado ao movimento Browniano – movimento aleatório de partículas suspensas em um líquido (GUPTA et al., 2017). Afirma-se que o deslocamento aleatório das nanopartículas transporta energia destas, além da movimentação ao seu redor ocasionar o efeito de microconvecção (KAKAÇ; LIU; PRAMUANJAROENKIJ, 2012, p. 191).

#### 2.4.1.1 Determinação da condutividade térmica de nanofluidos

O valor da condutividade térmica dos nanofluidos é imprescindível para se determinar o número de Nusselt ( $Nu$ ), que de acordo com Bergman e Lavine (2017), fornece a razão entre a transferência de calor por convecção e por condução. Existem técnicas de medição da condutividade térmica e modelos matemáticos de predição do valor dessa propriedade.

##### 2.4.1.1.1 Técnicas de medição da condutividade térmica

Algumas das técnicas mais comuns para medir a condutividade térmica de nanofluidos são: método do fio quente transiente, método de oscilação da temperatura e método  $3-\omega$  (DAS, 2017).

O método do fio quente transiente consiste em medir a elevação da temperatura de uma fonte linear de calor, imersa em material de teste, e em relacionar essa variação de temperatura com sua condutividade térmica. O fio quente funciona simultaneamente como fonte de calor e termômetro. Este método é fundamentado na equação de condução de calor de Fourier. Assume-se o fio quente como ideal (infinitamente longo e com diâmetro infinitamente reduzido), em um meio isotrópico com temperatura inicial constante (GUO et al., 2018).

O método de oscilação da temperatura define-se por medir a temperatura das extremidades de um cilindro contendo nanofluido ao qual é aplicado um fluxo térmico.

As variações de temperatura fornecem o valor da difusividade térmica, e permitem calcular a condutividade térmica do nanofluido, se sua massa específica e seu calor específico forem conhecidos (MOTTA, 2012).

O método 3- $\omega$  apresenta similaridade ao método do fio quente transiente, por utilizar também um fluxo radial de calor proveniente de um único elemento, atuando como fonte de calor e termômetro simultaneamente. Porém, no método 3- $\omega$  a resposta não depende da temperatura como no método do fio quente transiente, mas da corrente elétrica (de frequência  $\omega$ ) a passar pelo fio metálico, gerando uma onda de calor (TAWFIK, 2017).

Além destas, também são utilizadas técnicas ópticas para medição da condutividade térmica de nanofluidos, tais como Espectroscopia de Lente Térmica e a Técnica Fotoacústica.

O efeito de Lente Térmica ocorre ao se aplicar um feixe de *laser* com perfil de intensidade gaussiano na amostra, gerando uma distribuição radial de temperatura na mesma, e conseqüentemente uma variação no seu índice de refração em função do aquecimento. À variação do índice de refração relacionam-se as propriedades ópticas e térmicas da amostra, como por exemplo, sua condutividade térmica (SILVA, 2018).

O Efeito Fotoacústico é ocasionado devido à amostra absorver radiação periodicamente modulada e, dessa forma, ter seus níveis eletrônicos excitados causando um aquecimento periódico local ao decaírem (não radioativamente). Um microfone detecta a variação de pressão periódica devido a efeitos como difusão térmica, expansão térmica e flexão termoelástica, gerados pelo calor propagado (SOMER, 2016).

#### 2.4.1.1.2 Modelos teóricos de cálculo da condutividade térmica de nanofluidos

A condutividade térmica dos nanofluidos pode ser calculada por meio da Equação 1, que considera a condutividade estática e a condutividade relacionada ao movimento Browniano das nanopartículas (BABU; KUMAR; RAO, 2017):

$$k_{nf} = k_{estática} + k_{Browniano} \quad (1)$$

A parcela estática é dada pela equação de Maxwell (1881):

$$k_{estática} = k_{fb} \left[ \frac{k_{np} + 2k_{fb} + 2(k_{np} - k_{fb})\phi}{k_{np} + 2k_{fb} - (k_{np} - k_{fb})\phi} \right] \quad (2)$$

sendo  $k_{fb}$  a condutividade do fluido-base,  $\phi$  a fração volumétrica das nanopartículas e  $k_{np}$  a condutividade térmica do material que constitui a nanopartícula.

A condutividade térmica associada ao movimento Browniano, desenvolvida por Koo e Kleinstreuer (2004) é dada por:

$$k_{Browniano} = 5 \times 10^4 \beta \phi \rho_{fb} c_{p,fb} \sqrt{\frac{\kappa_B T_m}{\rho_{np} d_{np}}} f \quad (3)$$

em que  $\beta$  é o coeficiente de expansão térmica das nanopartículas,  $\rho_{fb}$  é a massa específica do fluido-base,  $c_{p,fb}$  o calor específico do fluido-base à pressão constante,  $\kappa_B$  a constante de Boltzmann ( $1,3806503 \times 10^{-23}$  J/K),  $T_m$  a temperatura média do nanofluido e  $f$  o seu fator de atrito,  $\rho_{np}$  a massa específica e  $d_{np}$  o diâmetro da nanopartícula.

As relações empíricas para obtenção dos valores de  $\beta$  de algumas nanopartículas, de acordo com a sua fração volumétrica, estão dispostas na Tabela 2.

<b>Tabela 2 - Valores de <math>\beta</math> para diferentes nanopartículas</b>		
<b>Tipo de partículas</b>	<b><math>\beta</math></b>	<b>Fração volumétrica</b>
Au-citrato		
Ag-citrato	$0,0137(100 \Phi)^{-0,8229}$	$\Phi < 1\%$
CuO		
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	$0,0011(100 \Phi)^{-0,7272}$	
CuO	$0,0017(100 \Phi)^{-0,0841}$	$\Phi > 1\%$

**Fonte: Kakaç, Liu e Pramuanjaroenkij (2012, p. 192)**

O valor do fator de atrito ( $f$ ) para nanofluidos de CuO, de acordo com Kakaç e Pramuanjaroenkij (2016) é dado pela expressão determinada empiricamente:

$$f = (-134,63 + 1722,3 \phi) + (0,475 - 6,04 \phi)T \quad (4)$$



sendo que  $T$  representa a temperatura do nanofluido.

Para os demais nanofluidos  $f$  assume o valor igual a 1 (KAKAÇ; PRAMUANJAROENKIJ, 2016).

#### 2.4.2 Viscosidade

A viscosidade dos nanofluidos, ao lado da condutividade térmica, é também uma propriedade de transporte relevante em aplicações de transferência de calor (GANVIR; WALKE; KRIPLANI, 2017).

Sua importância se reflete na potência de bombeamento adequada, nos números de Reynolds ( $Re$ ) – que relaciona as forças de inércia e viscosas de um fluido, e determina o seu regime de escoamento, e de Prandtl ( $Pr$ ) – que representa a razão entre as difusividades de momento e térmica; assim como no comportamento do escoamento dos nanofluidos. Os efeitos da fração volumétrica, da temperatura do fluido-base e do diâmetro das partículas suspensas são fundamentais no estudo da viscosidade de nanofluidos (ABDELRAZEK et al., 2018). Aglomerações, presença de surfactantes e tempo empregado na dispersão das nanopartículas durante a preparação do nanofluido, também afetam sua viscosidade (KOCA et al., 2018).

Existem técnicas com a finalidade de se medir a viscosidade dos nanofluidos, e também modelos teóricos para se calcular o seu valor.

##### 2.4.2.1 Técnicas de medição da viscosidade de nanofluidos

Usualmente as medições de viscosidade de nanofluidos são feitas com reômetros, nos quais o fluido de teste é colocado em um espaço entre cilindros ou cones concêntricos e placas paralelas em condição estável e submetido a uma taxa de cisalhamento constante; a tensão de cisalhamento e a viscosidade são obtidas como uma função da taxa de cisalhamento.

Viscosímetros capilares também são utilizados com este intuito, mas neste caso o fluido de teste escoar através de um tubo capilar, sendo observadas sua vazão volumétrica e queda de pressão; a viscosidade é então calculada por meio da equação de Hagen-Poiseuille, sendo necessário um líquido de referência com viscosidade conhecida (SUGANTHI; RAJAN, 2017).

#### 2.4.2.2 Modelos teóricos de cálculo da viscosidade de nanofluidos

Outra forma de se determinar a viscosidade dinâmica do nanofluido é por meio de relações desenvolvidas empiricamente (HUSSEIN; KADIRGAMA; NOOR, 2017), tais como a equação de Einstein (1906), para frações volumétricas maiores que 2%:

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

sendo  $\mu_{fb}$  a viscosidade dinâmica do fluido-base.

Batchelor (1977) considerou o efeito do movimento Browniano de partículas esféricas rígidas em suspensão isotrópica e obteve a equação a seguir:

$$\mu_{nf} = \mu_{fb} (1 + 2,5 \phi + 6,5 \phi^2) \quad (6)$$

Corcione (2010), considerando que um aumento da fração volumétrica das nanopartículas eleva a razão entre as viscosidades dinâmicas do nanofluido e do fluido-base, desenvolveu a expressão:

$$\mu_{nf} = \frac{\mu_{fb}}{1 - 34,87 \phi^{1,03} \left( \frac{d_{np}}{d_{fb}} \right)^{-0,3}} \quad (7)$$

em que  $d_{fb}$  representa o diâmetro equivalente da molécula do fluido-base, que pode ser calculado por:

$$d_{fb} = \sqrt[3]{\frac{6M}{N\pi\rho_{fb,0}}} \quad (8)$$

sendo  $M$  a massa molar do fluido-base,  $N$  a constante de Avogadro ( $6,022 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$ ) e  $\rho_{fb,0}$  a massa específica do fluido-base a 293 K. Destaca-se que a Equação 8 é válida para temperaturas entre 293 e 333 K, fração volumétrica entre 0,1 e 7,1% e diâmetro das nanopartículas entre 25 e 200 nm (KOCA et al., 2018).

O comportamento reológico de um nanofluido depende de fatores como fração volumétrica, tamanho e tipo de nanopartículas que o compõem, temperatura e composição do fluido-base, sua tensão e taxa de cisalhamento, bem como a presença de surfactantes. Dessa forma, um mesmo nanofluido pode exibir comportamento Newtoniano ou não Newtoniano, de acordo com a combinação desses fatores (LU;

DUAN; WANG, 2014; MURSHED; ESTELLÉ, 2017). Fluidos Newtonianos apresentam uma relação linear entre tensão de cisalhamento e gradiente local de velocidade, em que a viscosidade é a sua constante de proporcionalidade (FOX; McDONALD, 2001, p. 16, 142).

#### 2.4.3 Massa Específica e Calor Específico

Sólidos em geral possuem massa específica maior que líquidos, conseqüentemente, a adição de nanopartículas a fluidos-base tende a elevar a massa específica do nanofluido. O calor específico da maioria dos nanofluidos diminui com o aumento da fração volumétrica de nanopartículas e aumenta com a elevação da temperatura (DEVENDIRAN; AMIRTHAN, 2016).

A massa específica e o calor específico de nanofluidos foram estimados experimentalmente por Pak e Cho (1998) com base no princípio da regra da mistura (propriedades obtidas a partir da combinação das propriedades dos constituintes individuais), assumindo a existência de equilíbrio térmico entre as nanopartículas suspensas e o fluido-base (BABU; KUMAR; RAO, 2017).

A massa específica de um nanofluido constituído por apenas um tipo de nanopartículas (não híbrido/mononanofluido) é dada por:

$$\rho_{nf} = (1 - \phi)\rho_{fb} + (\phi\rho_{np}) \quad (9)$$

A fração volumétrica de nanopartículas em um nanofluido,  $\phi$ , é obtida por:

$$\phi = \frac{v_{t,np}}{v_{nf}} \quad (10)$$

em que  $v_{t,np}$  é o volume total das nanopartículas e  $v_{nf}$  o volume total do nanofluido.

O calor específico do nanofluido é dado por:

$$c_{p,nf} = \frac{(1 - \phi)\rho_{fb}c_{p,fb} + (\phi\rho_{np}c_{p,np})}{\rho_{nf}} \quad (11)$$

sendo  $c_{p,np}$  o calor específico da nanopartícula à pressão constante.

## 2.5 PESQUISAS UTILIZANDO TROCADORES DE CALOR

Nos últimos anos, muitas pesquisas têm sido realizadas aplicando-se nanofluidos em trocadores de calor com diversas finalidades. Alguns desses trabalhos são descritos a seguir, assim como trabalhos sobre a influência dos parâmetros geométricos de trocadores de calor de casco e tubo helicoidal (TCCTH) na transferência de calor, já que o presente estudo tem como objetivo principal avaliar o desempenho de um nanofluido em um TCCTH.

### 2.5.1 Pesquisas a Respeito dos Parâmetros Geométricos de TCCTH

Salimpour (2009) estudou experimentalmente a transferência de calor em 3 trocadores de calor de casco e tubo helicoidal (TCCTH) com diferentes passos das espiras, em escoamento paralelo e contracorrente, utilizando água como fluidos quente e frio. O autor observou que para maiores passos, os coeficientes de transferência de calor por convecção ( $h$ ) do lado do casco foram maiores. Relatou também concordância entre os seus resultados e os da literatura, propondo, assim, correlações empíricas para o cálculo de  $h$  dos fluidos no interior do tubo e no casco, que serão adotadas na metodologia do presente trabalho.

Aliabadi, Pazdar e Sartipzadeh (2016) utilizaram, em uma investigação experimental, nanofluido aquoso contendo nanopartículas de cobre, escoando em diferentes microtubos helicoidais (MTH), com diâmetros da bobina iguais a  $0,96 \times 10^{-2}$  m (MTH-I),  $1,42 \times 10^{-2}$  m (MTH-II),  $2,13 \times 10^{-2}$  m (MTH-III) e  $2,87 \times 10^{-2}$  m (MTH-IV). As frações volumétricas de nanopartículas foram de 0,1%, 0,2% e 0,3%, e a maior dentre as três foi responsável pelo melhor desempenho. Observou-se que o menor diâmetro da bobina (MTH-I) obteve coeficiente de transferência de calor de 14,3%, 34,1% e 60,7% superior em relação aos MTH-II, MTH-III e MTH-IV, respectivamente.

Alimoradi (2017b) estudou o efeito dos parâmetros geométricos e operacionais na efetividade térmica de um TCCTH com água como fluidos de trabalho no casco e no tubo, utilizando tanto um método numérico quanto a validação experimental. Dentre suas conclusões, destacou que o aumento de 50% no diâmetro da bobina helicoidal e de 50% na sua altura, resultou em elevação na efetividade do TCCTH em 26,5% e 21,4%, respectivamente. O aumento de 100% no passo ocasionou 25,3% de diminuição da efetividade térmica. A altura e o diâmetro do casco

apresentaram aproximadamente a mesma influência na efetividade; esta foi diminuída em 11,4% com o aumento em 50% nesses parâmetros.

Etghani e Baboli (2017) determinaram os níveis ótimos de quatro fatores (passo das espiras, diâmetro do tubo, vazão do fluido frio e vazão do fluido quente) por meio do método de Taguchi. Dentre os quatro níveis estudados para cada fator, o menor nível do passo e o maior nível dos demais fatores promoveram o maior incremento no número de Nusselt.

### 2.5.2 Pesquisas Utilizando Nanofluidos em TCCTH

Hashemi e Behabadi (2012), em estudo sobre as características de transferência de calor e de queda de pressão, compararam o desempenho do nanofluido de cobre em fluido-base de óleo de motor, com óleo de motor puro, tanto em tubo reto quanto em tubo helicoidal. Notaram um aumento considerável no coeficiente de transferência de calor do nanofluido comparado ao fluido-base em tubo helicoidal, para as mesmas condições de escoamento, porém o nanofluido apresentou também aumento da queda de pressão. Mantendo-se a fração volumétrica constante das nanopartículas, a taxa de transferência de calor foi maior em tubo helicoidal comparado ao tubo reto.

Behabadi, Pakdaman e Ghazvini (2012), em investigação experimental sobre transferência de calor convectiva de nanofluido em TCCTH, com temperatura uniforme na parede, utilizando nanotubos de carbono em fluido-base de óleo, em diferentes concentrações volumétricas, constataram um aumento considerável na transferência de calor ao se utilizar o nanofluido em comparação ao fluido-base. Em tubos retos o aumento do número de Nusselt chegou a 45%; houve aumento da taxa de transferência de calor de acordo com aumento na concentração de nanopartículas ou aumento do número de Reynolds, o que pode ser atribuído ao movimento Browniano das partículas. Quanto a tubos helicoidais, observaram os parâmetros geométricos que afetam a transferência de calor substancialmente; ao se reduzir a razão entre os diâmetros da bobina helicoidal e do tubo, ou se aumentar a razão entre o passo e o diâmetro do tubo, houve aumento da taxa de transferência de calor, tanto para o fluido-base como para o nanofluido. Além disso, nos tubos helicoidais percebeu-se um aumento de 3 a 7 vezes no número de Nusselt do fluido-base em

comparação com tubos retos; e aumento em 60% do número de Nusselt do nanofluido em relação ao fluido-base na mesma geometria.

Em uma investigação experimental, Kumar et al. (2014) analisaram as características de transferência de calor e de queda de pressão de um TCCTH, utilizando nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /água, sob regime de escoamento turbulento. As frações volumétricas das nanopartículas, preparadas pelo método de duas etapas, foram de 0,1%, 0,4% e 0,8%. Perceberam a elevação do número de Nusselt em 28%, 36% e 56% para as frações volumétricas de 0,1%, 0,4% e 0,8%, respectivamente, em relação à água. Os autores atribuíram esses aumentos à condutividade térmica superior do nanofluido, a uma maior mistura do fluido, bem como à formação de um escoamento secundário no tubo helicoidal. O aumento na queda de pressão em comparação com a água foi de 4%, 6% e 9% para as frações volumétricas de 0,1%, 0,4% e 0,8%, respectivamente, o que é atribuído a uma maior viscosidade do nanofluido devido à presença das nanopartículas. Concluíram, dessa forma, que o nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ /água pode ser aplicado como líquido de arrefecimento, já que consideraram o aumento na queda de pressão pequeno, em relação ao aumento da transferência de calor proporcionado.

Bahrehmand e Abbassi (2016) analisaram numericamente o escoamento de nanofluido de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  em TCCTH, considerando as propriedades termofísicas dependentes da temperatura. A fração volumétrica das nanopartículas de 0,2% resultou em elevação de 14% da taxa de transferência de calor; e para 0,3% de nanopartículas, esse aumento foi de 18%. O desempenho do TCCTH permitiu as seguintes conclusões: a diminuição da vazão mássica e o aumento da fração volumétrica, do diâmetro do tubo e do diâmetro da bobina, resultaram em aumento da efetividade do trocador de calor.

Em investigação numérica e experimental utilizando nanofluido de  $\text{TiO}_2$  em água, sendo a fração volumétrica das nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  igual a 0,5%, Mahmoudi et al. (2017) concluíram que a aplicação desse fluido de trabalho resultou em aumento significativo na taxa de transferência de calor, em alguns casos de até 30%, em comparação com água destilada no mesmo TCCTH.

Nazari et al. (2017) compararam experimentalmente a transferência de calor de nanofluido de  $\text{CuO}$ /água como líquido de arrefecimento em frações volumétricas entre 0 e 0,2%, em diferentes trocadores de calor. A 0,2% perceberam, em relação ao tubo reto, aumento de 42% na transferência de calor em tubo helicoidal e 45% em

tubo de espuma metálica. Concluíram que trocadores de calor fabricados em espuma metálica e formato helicoidal podem favorecer ainda mais a transferência de calor.

Bhanvase et al. (2018) investigaram o coeficiente de transferência de calor de nanofluido de polianilina tendo água como fluido-base, em um TCCTH vertical. As frações volumétricas de nanofibras de polianilina variaram de 0 a 0,5%, e o número de Reynolds de 812 a 1896. Em relação ao coeficiente de transferência de calor da água, houve um aumento de 10,5% à fração volumétrica de 0,1% de nanofibras de polianilina; e de 70% à fração volumétrica de 0,5%.

Naik e Vinod (2018) compararam três diferentes nanofluidos não Newtonianos, compostos de nanopartículas de  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  e  $\text{CuO}$  quanto ao aumento da transferência de calor em relação ao fluido-base de solução aquosa de carboximetilcelulose, em um TCCTH. Foram utilizadas frações mássicas de 0,2 a 1%. O nanofluido e a água percorreram o casco e o tubo, respectivamente, em diferentes condições, tais como vazão da água (0,5 a 5 L/min), temperatura do nanofluido (40 a 60°C) e velocidade de agitação da turbina axial localizada no casco a fim de uniformizar a temperatura do nanofluido (500 a 1500 rpm). Constataram acréscimo no número de Nusselt conforme as condições aumentaram, e que o nanofluido de  $\text{CuO}$  foi o que apresentou maior aumento na transferência de calor.

### 2.5.3 Pesquisas Utilizando Nanofluidos em Outros Tipos de Trocadores de Calor

Nanofluidos têm sido empregados também em outras configurações de trocadores de calor. Murian et al. (2017) estudaram o aumento do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ) promovidos por nanofluidos de ouro e por nanofluidos de prata em relação ao seu fluido-base (água), em trocador de calor de tubos concêntricos. As frações volumétricas de nanopartículas foram 0,015, 0,045 e 0,0667%, em escoamento laminar. Verificou-se aumento de  $h$  para ambos nanofluidos com a elevação da fração volumétrica.

Visando a substituição do etileno glicol misturado à água por nanofluido como líquido de arrefecimento, Diglio et al. (2018) em estudo numérico avaliaram qual o melhor nanofluido com baixa concentração volumétrica de nanopartículas (de 0,1 a 1%) que possibilite as maiores diminuições da resistência térmica de um trocador de calor de poço (*Borehole*) e menores aumentos na queda de pressão. Os nanofluidos analisados foram de prata, cobre, alumínio, alumina, óxido de cobre, grafite e sílica.

O nanofluido de cobre apresentou a maior diminuição da resistência térmica, e embora tenha também a segunda maior elevação da queda de pressão, foi tido como o mais viável financeiramente para o sistema.

Kim et al. (2018) compararam resultados experimentais e de simulação computacional quanto às características de transferência de calor do nanofluido de alumina em água, com diâmetro nominal das nanopartículas de 40 nm e frações mássicas iguais a 0,25%, 0,5% e 1%, em uma seção de teste constituída por um tubo de cobre com diâmetro interno de 4,5 mm, aquecido por uma fonte de alimentação em corrente contínua. Os resultados mostraram que o aumento do número de Reynolds elevou o coeficiente de transferência de calor por convecção e o número de Nusselt; e o aumento da concentração das nanopartículas diminuiu o número de Prandtl.

Pourhoseini, Naghizadeh e Hoseinzadeh (2018) examinaram as características térmicas do nanofluido de prata em água em um trocador de calor de placas, variando-se a sua vazão volumétrica entre 2 e 8 L/min, e sua concentração entre 0 a 10 mg/L. Perceberam a máxima taxa de transferência de calor à concentração crítica de 2,5 mg/L, já que a maiores concentrações ocorre agregação de nanopartículas que diminuem essa taxa. À concentração crítica a condutividade térmica foi 36,6% maior que da água pura. Os aumentos da vazão e da concentração das nanopartículas elevaram o coeficiente global de transferência de calor, ressaltando que a vazão tem maior influência.

Wang et al. (2018) investigaram as características de transferência de calor e de queda de pressão de um nanofluido de nanoplaquetas de grafeno em etileno glicol e água, utilizando um trocador de calor de placas em miniatura. As frações mássicas das nanoplaquetas foram 0,01%, 0,1%, 0,5% e 1%. Primeiramente empregou-se água em ambos os lados do trocador de calor; em seguida utilizaram-se o nanofluido como fluido quente e água como fluido frio. Em todas as frações mássicas teve-se queda de pressão aceitável considerando-se o desempenho superior em transferência de calor do nanofluido em comparação com o fluido-base.

Alsarraf et al. (2019) exploraram o efeito do formato das nanopartículas (cilíndrico, *brick*, lâmina, plaqueta e esférico) no nanofluido de alumina boemita em uma mistura de água e etileno glicol, em um trocador de calor de tubos concêntricos, utilizando água na seção anular e o nanofluido no interior do tubo. A maior condutividade térmica foi proporcionada pelas nanopartículas de formato cilíndrico; e a elevação da condutividade térmica foi verificada com o aumento da concentração



das nanopartículas, que variou entre 0,5 a 2%; e a menor condutividade térmica foi propiciada pelas nanopartículas em formato de plaqueta. A maior efetividade foi conferida pelo nanofluido contendo nanopartículas com formato de plaqueta, e a menor efetividade pelas nanopartículas esféricas.

Bahiraei, Salmi e Safaei (2019) estudaram as características hidrotérmicas de um nanofluido ecoamigável de grafeno, atuando como fluido quente em sentido contracorrente, em um trocador de calor espiral tendo água como fluido frio. Variaram-se a concentração das nanopartículas e o número de Reynolds; constatou-se que a taxa de transferência de calor e o coeficiente global de transferência de calor aumentaram com a elevação do número de Reynolds ou da concentração; e a efetividade diminuiu com a elevação do número de Reynolds.

Percebe-se a ausência de padronização dos estudos apresentados nesta seção em relação aos parâmetros geométricos dos trocadores de calor, à composição dos fluidos e às condições operacionais. Além disso, a metodologia de cálculo da fração volumétrica das nanopartículas, utilizadas nestas publicações, não foi explicitada, podendo gerar resultados controversos.

### 3 METODOLOGIA

Esta pesquisa tem natureza exploratória e delineamento experimental; a análise dos dados foi realizada por meio de procedimentos quantitativos (GIL, 2002, p. 162). No presente capítulo são apresentados os materiais, os métodos e os equipamentos empregados neste trabalho.

#### 3.1 MATERIAIS E MÉTODOS DE CARACTERIZAÇÃO

Os materiais, necessários para se contemplarem os objetivos do presente trabalho, relacionam-se à síntese das nanopartículas e à sua caracterização.

##### 3.1.1 Síntese das Nanopartículas e Produção do Nanofluido

O nanofluido de ouro, utilizado como fluido de arrefecimento (denominado daqui para frente, fluido frio), foi produzido pelo método de dois passos – síntese das nanopartículas e sua posterior suspensão em fluido-base, no laboratório do Grupo de Fenômenos Fototérmicos em Fluidos Complexos, na Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG).

A síntese das nanopartículas de ouro foi realizada pela via *bottom-up*, por meio do método padrão de Turkevich, Stevenson e Hillier (1951) modificado, utilizando-se 20 mL de solução de 1,0 mM de ácido cloroáurico ( $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$ ) como agente precursor e 2 mL de solução aquosa de 1% de citrato de sódio ( $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ) como agente redutor.

Inicialmente, o agente precursor foi aquecido em um erlenmeyer sob agitação magnética até sua ebulição, colocando-se um vidro relógio sobre o frasco para se evitar a perda de água por evaporação. À solução em ebulição e sob agitação adicionou-se o agente redutor.

A solução de nanopartículas foi gradualmente formada até atingir uma cor vermelho rubi, característica do ouro coloidal. O produto final foi nanopartículas esféricas em sua maioria, dispersas em um fluido-base, neste caso, água. Para promover a estabilização do nanofluido utilizou-se o surfactante polivinilpirrolidona (abreviadamente povidona ou PVP), que é um polímero solúvel em água, formado por cadeias de múltiplas vinilpirrolidonas.

Para se determinar o volume de fluido-base necessário à obtenção da fração volumétrica desejada no nanofluido, utilizou-se a equação:

$$\phi_{sc} \nu_{sc} = \phi_{nf} \nu_{nf} \quad (12)$$

sendo que  $\phi_{sc}$  e  $\nu_{sc}$  representam a concentração inicial de nanopartículas e o volume da solução concentrada, respectivamente;  $\phi_{nf}$  é a concentração das nanopartículas após diluição, e  $\nu_{nf}$  o volume total do nanofluido após a diluição em água bidestilada.

### 3.1.2 Caracterização das Nanopartículas

A caracterização das nanopartículas ocorreu por meio da técnica de Espectroscopia de Absorção na região UV-Visível, de medições de Potencial Zeta e da técnica de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET).

A Espectroscopia de Absorção na região UV-Visível foi realizada por meio de um espectrômetro de modelo Cary 50/Varian, no complexo de laboratórios multiusuários da UEPG (C-LABMU UEPG), para determinação da Ressonância Plasmônica das nanopartículas de ouro e avaliação da estabilidade do nanofluido de ouro.

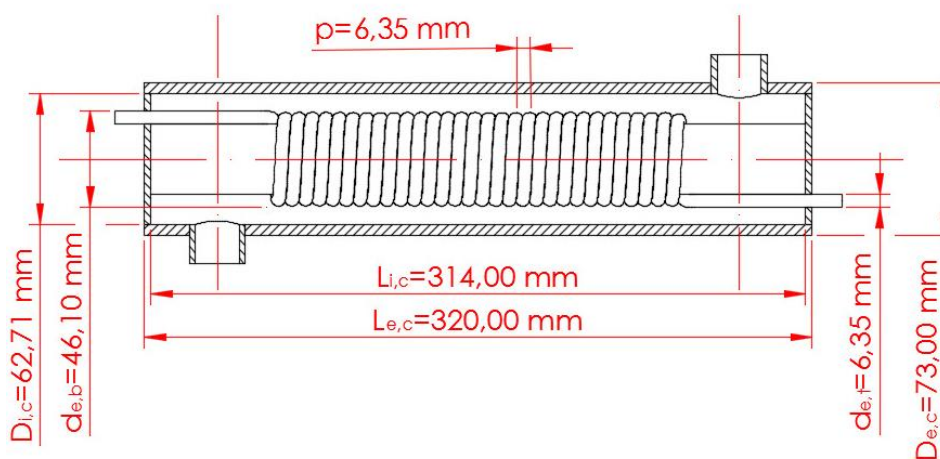
As medições de Potencial Zeta e Espalhamento Dinâmico de Luz foram realizadas com um analisador de partículas de modelo Nano Zs90/Malvern, no C-LABMU UEPG, com a técnica Micro-Eletroforese de *Laser Doppler*, que consiste em se aplicar um campo elétrico na dispersão de nanopartículas a serem caracterizadas para que estas se movimentem. A medida da velocidade desses movimentos com técnica de interferômetro a *laser* permite o cálculo da mobilidade eletroforética das amostras, e conseqüentemente de seu Potencial Zeta, que avalia a estabilidade do nanofluido.

A Técnica de Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET) foi realizada no Centro de Microscopia Eletrônica da Universidade Federal do Paraná (UFPR), para determinação do formato das nanopartículas e sua concentração no fluido-base (água). Colocou-se certo volume de solução concentrada de nanofluido no porta-amostra, realizaram-se as medidas de MET, contou-se o número de nanopartículas de ouro e fez-se uma média aritmética, para assim se determinar o número de nanopartículas por mL.

### 3.2 EQUIPAMENTO EXPERIMENTAL

O trocador de casco e tubo helicoidal (TCCTH) é considerado um dos trocadores de calor mais importantes em aplicações industriais (ALIMORADI, 2017a; BARROS et al., 2019). A Figura 3 mostra alguns dos parâmetros geométricos do TCCTH utilizado no presente estudo, tais como: comprimento externo do casco ( $L_{e,c}$ ), comprimento interno do casco ( $L_{i,c}$ ), diâmetro externo do casco ( $D_{e,c}$ ), diâmetro interno do casco ( $D_{i,c}$ ), diâmetro externo da bobina helicoidal ( $d_{e,b}$ ), diâmetro externo do tubo ( $d_{e,t}$ ) e passo das espiras ( $p$ ).

**Figura 3 - Representação 2D do TCCTH**



**Fonte: Adaptado de Salimpour (2009)**

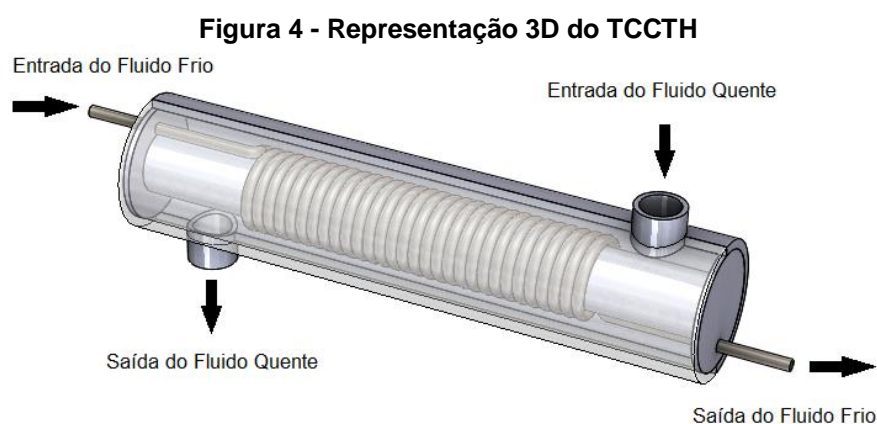
O TCCTH empregado no presente trabalho, protótipo projetado por Ferreira (2015) para estudos de transferência de calor utilizando nanofluidos, foi fabricado em aço inoxidável AISI 304, pela empresa Multiman, localizada na cidade de Ponta Grossa/PR. O tubo utilizado para formar a bobina helicoidal possui diâmetro externo de 6,35 mm ( $\frac{1}{4}$ "), comprimento ( $L_t$ ) de 4000 mm e espessura de 1 mm. A bobina helicoidal possui diâmetro externo de 46,1 mm e 30,5 espiras, sendo o passo das espiras igual ao diâmetro externo do tubo (6,35 mm). O casco possui comprimento externo ( $L_{e,c}$ ) de 320 mm e diâmetro externo ( $D_{e,c}$ ) de 73 mm (Tubo *Schedule 40* de 2"½). Seu comprimento interno ( $L_{i,c}$ ) é de 314 mm. As dimensões do TCCTH são exibidas na Tabela 3.

Tabela 3 - Dimensões do TCCTH

Parâmetro geométrico	Símbolo	Medida ( $\pm 0,02$ mm)
Comprimento do tubo	$L_t$	4000,00
Diâmetro externo do tubo	$d_{e,t}$	6,35
Diâmetro interno do tubo	$d_{i,t}$	4,35
Comprimento externo do casco	$L_{e,c}$	320,00
Comprimento interno do casco	$L_{i,c}$	314,00
Diâmetro externo do casco	$D_{e,c}$	73,00
Diâmetro interno do casco	$D_{i,c}$	62,71
Diâmetro externo da bobina helicoidal	$d_{e,b}$	46,10
Diâmetro interno da bobina helicoidal	$d_{i,b}$	33,40
Passo das espiras	$p$	6,35

Fonte: Autoria própria

No centro do casco, em sentido longitudinal, há um cilindro com diâmetro de 33,4 mm (1"), a fim de dar suporte à bobina helicoidal, configurando, assim, um tipo de TCCTH modificado (Figura 4).



Fonte: Autoria própria

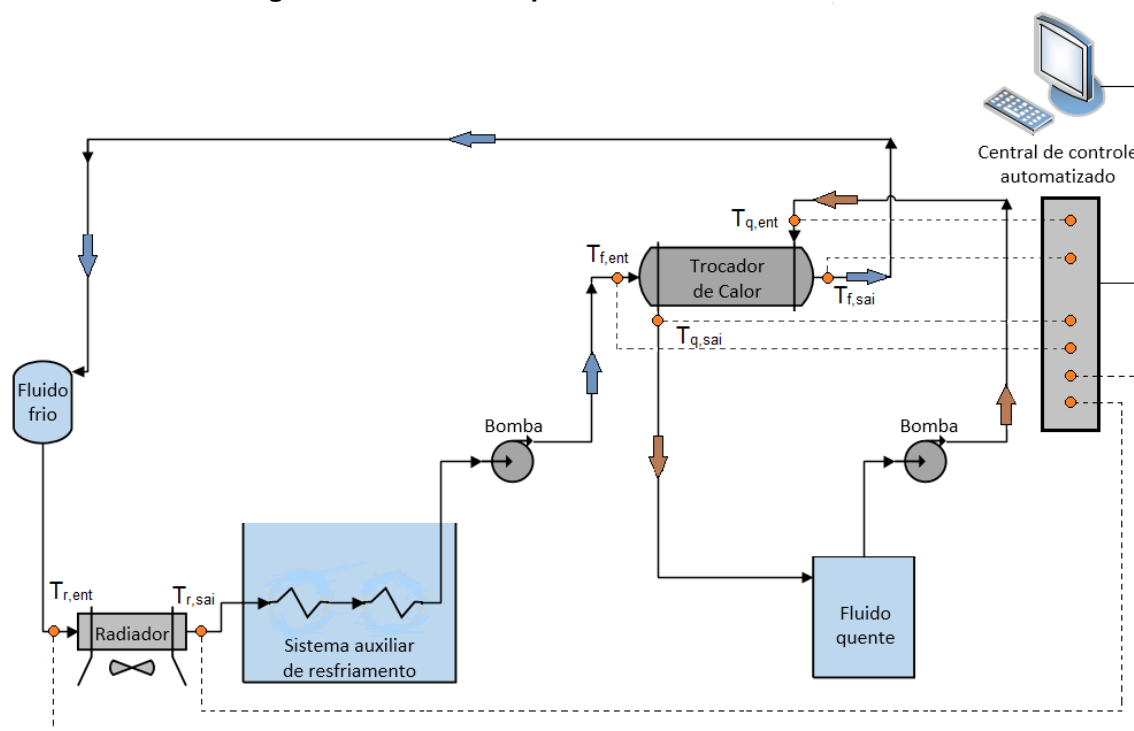
O sistema inicialmente proposto e testado por Ferreira (2015) foi alterado para a realização do presente estudo. O sistema de aquisição de dados, de controle da vazão, e de controle da temperatura de entrada dos fluidos quente e frio foi automatizado com a aplicação de um microcontrolador PID (Proporcional-Integral-Derivativo) Arduino Mega 2560. As mangueiras e conectores foram substituídos, sendo atualmente de poliuretano, que é um material isolante térmico. O revestimento de fibra de vidro, que isolava termicamente o TCCTH, foi substituído por uma manta de fibra cerâmica; além disso, o TCCTH e o reservatório de fluido quente foram agora mantidos em caixas de isopor.

O microcontrolador PID visa o controle preciso de variáveis contínuas de um sistema, como por exemplo, vazão, temperatura e rotação. Cada ação de seu algoritmo desempenha uma determinada função: a proporcional elimina as oscilações da variável; a integral elimina o desvio entre o valor desejado (*setpoint*) e o valor real da variável, além de promover a estabilidade de cada variável em seu *setpoint* mesmo com distúrbios nas condições operacionais; e a derivativa evita antecipadamente que o desvio aumente (SMITH, 2009, p. 13).

Uma resistência térmica em reservatório de vidro com capacidade de 2 L aquece a água que atua como fluido quente. Uma bomba d'água de diafragma (Modelo RS 385) conduz o fluido quente ao casco do trocador de calor, que, em seguida, retorna ao seu reservatório, reiniciando o ciclo. O fluido frio é mantido em reservatório com capacidade de 250 mL, e é conduzido ao interior do tubo helicoidal por bomba similar à do fluido quente; ao sair do trocador de calor o fluido frio passa por um radiador com 18 aletas para CPU (*Central Processing Unit*) a fim de ceder calor ao meio, em seguida percorre um sistema auxiliar de resfriamento composto por duas serpentinas imersas em água com gelo, antes de reiniciar o ciclo. Optou-se pelo escoamento do fluido frio no tubo helicoidal visando-se a economia de material, já que além da água serão utilizados nanofluidos como fluidos frios, e o casco possui volume superior ao tubo. As bombas foram calibradas cronometrando-se o tempo de escoamento de 1 L de água.

Termopares do tipo K aferem as temperaturas de entrada do fluido quente ( $T_{q,ent}$ ), saída do fluido quente ( $T_{q,sai}$ ), entrada do fluido frio ( $T_{f,ent}$ ) e saída do fluido frio ( $T_{f,sai}$ ), conforme ilustrado na Figura 5. Há também outros dois termopares, que aferem as temperaturas na entrada e na saída do radiador ( $T_{r,ent}$  e  $T_{r,sai}$ , respectivamente); entretanto, as leituras registradas a partir deles não são consideradas nos cálculos do presente trabalho. Os valores das temperaturas são exibidos graficamente na interface de um computador, e o sistema de aquisição gera uma tabela com os mesmos.

Figura 5 - Desenho esquemático do sistema do TCCTH



Fonte: Autoria própria

A seleção da temperatura de entrada do fluido quente, das vazões dos fluidos quente e frio, bem como do tempo de duração do ciclo, é feita na interface do computador ao qual o microcontrolador está conectado. O sistema opera nas temperaturas de entrada do fluido quente iguais a 40, 50 e 60°C; temperatura de entrada do fluido frio (fixa) igual a 25°C; e vazões iguais a 20, 30 e 40 L/h.

### 3.3 PLANEJAMENTO DOS EXPERIMENTOS

De acordo com Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010), planejamentos estatísticos permitem a redução no número de experimentos a serem realizados, otimizando o estudo das informações deles extraídas, economizando recursos e tempo.

Planejamentos fatoriais são eficientes em experimentos que envolvem a investigação dos efeitos de dois ou mais fatores, uma vez que todas as combinações possíveis dos níveis desses fatores são estudadas (MONTGOMERY, 2012, p. 183). Dessa forma, optou-se pelo planejamento fatorial multiníveis a fim de se estudar a influência de três fatores na variável resposta. Os fatores foram: fração volumétrica das nanopartículas ( $\phi$ ) em dois níveis; temperatura de entrada do fluido quente no

volume de controle ( $T_{q,ent}$ ), ou seja, no casco do trocador de calor, em três níveis; e vazão dos fluidos quente e frio em três níveis. Destaca-se que em cada nível as vazões foram iguais para os fluidos quente e frio. A variável resposta foi a efetividade do trocador de calor.

Nos testes de transferência de calor utilizaram-se água bidestilada como fluido quente, e três diferentes fluidos frios: água bidestilada ( $\phi = 0$ ), nanofluido de ouro com  $\phi = 1,63 \times 10^{-5}\%$  (NF<sub>A</sub>) e nanofluido de ouro com  $\phi = 6,53 \times 10^{-5}\%$  (NF<sub>B</sub>). Por esse motivo, foram realizados 2 planejamentos fatoriais multiníveis separadamente. Os fatores e níveis dos planejamentos fatoriais são apresentados na Tabela 4. Os níveis baixo (-1), médio (0) e alto (+1) foram selecionados de acordo com testes preliminares.

**Tabela 4 - Fatores e níveis dos planejamentos fatoriais multiníveis**

<b>Fatores</b>	<b>(-1)</b>	<b>(0)</b>	<b>(+1)</b>
Fração volumétrica das nanopartículas (%)	0	–	1,63x10 <sup>-5</sup> (NF <sub>A</sub> ); 6,53x10 <sup>-5</sup> (NF <sub>B</sub> )
Temperatura de entrada do fluido quente (°C)	40	50	60
Vazão de ambos fluidos (L/h)	20	30	40

**Fonte: Autoria própria**

Cada análise fatorial multiníveis consistiu em 18 tratamentos, de acordo com a Tabela 5; para se verificar a reprodutibilidade do estudo experimental e para se calcular o erro-padrão foram feitas duplicatas, totalizando 36 tratamentos.

**Tabela 5 - Tratamentos do planejamento fatorial multiníveis (continua)**

<b>Tratamento</b>	<b>Fatores e níveis</b>		
	<b><math>\phi</math></b>	<b><math>T_{q,ent}</math></b>	<b>Vazão</b>
1	-1	-1	-1
2	-1	-1	0
3	-1	-1	+1
4	-1	0	-1
5	-1	0	0
6	-1	0	+1
7	-1	+1	-1
8	-1	+1	0
9	-1	+1	+1



**Tabela 5 - Tratamentos do planejamento fatorial multiníveis (conclusão)**

Tratamento	Fatores e níveis		
	$\phi$	$T_{q,ent}$	Vazão
10	+1	-1	-1
11	+1	-1	0
12	+1	-1	+1
13	+1	0	-1
14	+1	0	0
15	+1	0	+1
16	+1	+1	-1
17	+1	+1	0
18	+1	+1	+1

Fonte: Adaptado de Barros Neto, Scarminio e Bruns (2010)

Os dados experimentais foram processados por meio do *software* Minitab®, na versão *trial*, para obtenção do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), gráfico de Pareto, regressão linear e resultado do teste F.

O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) representa a proporção da variabilidade da resposta explicada pelos fatores; quanto mais próximo de 1 for o seu valor, maior é a explicação da resposta pelo modelo de regressão ajustado. O gráfico de Pareto é um gráfico de barras que permite uma visualização e identificação da influência dos fatores na resposta. A regressão linear é uma equação que permite se estimar a resposta, dados os valores dos fatores. O teste F determina se existe relação linear entre a resposta e os fatores; seu resultado deve ser maior do que o valor tabelado para o mesmo nível de confiança, para que a regressão seja considerada estatisticamente significativa. O efeito de um fator representa a alteração na resposta, produzida por uma alteração no nível desse fator.

No presente estudo, os efeitos da fração volumétrica ( $A$ ), da temperatura de entrada do fluido quente ( $B$ ) e da vazão ( $C$ ), denominados efeitos principais, são dados pelas equações 13, 14 e 15, respectivamente.

$$A = \bar{y}_+ - \bar{y}_- \quad (13)$$

$$B = (\bar{y}_+ - \bar{y}_-)_B + (\bar{y}_+ - \bar{y}_0)_B + (\bar{y}_0 - \bar{y}_-)_B \quad (14)$$

$$C = (\bar{y}_+ - \bar{y}_-)_C + (\bar{y}_+ - \bar{y}_0)_C + (\bar{y}_0 - \bar{y}_-)_C \quad (15)$$

Nessas equações,  $\bar{y}$ -,  $\bar{y}_0$  e  $\bar{y}_+$  correspondem à média das respostas (efetividade) nos níveis baixo, médio e alto, respectivamente, em relação a cada fator.

### 3.4 PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL

Como já descrito, os testes foram realizados utilizando água bidestilada como fluido quente, e três diferentes fluidos frios: água bidestilada, nanofluido com fração volumétrica igual a  $1,63 \times 10^{-5}\%$  (NF<sub>A</sub>) e nanofluido com fração volumétrica igual a  $6,53 \times 10^{-5}\%$  (NF<sub>B</sub>). As vazões volumétricas ( $\dot{V}$ ) foram 20, 30 e 40 L/h para os fluidos quente e frio, e as temperaturas de entrada do fluido quente ( $T_{q,ent}$ ) iguais a 40, 50 e 60°C. A temperatura de entrada do fluido frio ( $T_{f,ent}$ ) foi mantida fixa em 25°C.

Primeiramente, água bidestilada foi colocada nos reservatórios, 2 L no reservatório de fluido quente e 250 mL no de fluido frio; ligou-se o sistema de controle automatizado com interface em um computador, acionando-se as bombas e a resistência térmica no interior do reservatório de fluido quente, selecionando-se  $\dot{V}$  e  $T_{q,ent}$  de acordo com o planejamento dos experimentos. Iniciou-se  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$  e  $\dot{V} = 20$  L/h. O sistema de aquisição exibiu os valores das temperaturas de todos os termopares na tela do computador. Foi adicionado gelo ao tanque contendo água e duas serpentinas até que  $T_{f,ent}$  se mantivesse em 25°C.

Verificou-se a ocorrência do regime permanente de transferência de calor entre os fluidos quente e frio, por meio da observação das temperaturas na tela do computador, para posteriormente iniciar-se a aquisição dos dados a cada minuto, selecionando-se a duração de 30 minutos na interface do sistema, totalizando 30 valores de cada uma das temperaturas ( $T_{q,ent}$ ,  $T_{q,sai}$ ,  $T_{f,ent}$  e  $T_{f,sai}$ ); sendo o teste interrompido automaticamente após 30 minutos de duração. Em seguida, mantendo-se  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$  selecionou-se  $\dot{V} = 30$  L/h, e após observar-se o regime permanente, realizou-se o teste e a aquisição dos dados nestas condições operacionais. Ainda com  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$  selecionou-se  $\dot{V} = 40$  L/h; o teste e a aquisição dos dados ocorreu de maneira similar às demais vazões já descritas. Na sequência, selecionou-se  $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$  e seguiu-se a mesma ordem de seleção das vazões, ou seja, da menor para a maior, assim como ocorreu com  $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$ . As temperaturas do fluido quente foram mantidas aproximadamente constantes pelo sistema de controle automatizado. A temperatura do fluido frio, após este passar pelo radiador, foi monitorada e mantida

aproximadamente no valor pré-estabelecido de 25°C com a adição de gelo à água. Repetiram-se os testes com água bidestilada como fluido frio, para que os testes tivessem duplicatas.

Após os testes com água bidestilada como fluido frio, os procedimentos acima descritos se repetiram para o NF<sub>A</sub>, e em seguida para o NF<sub>B</sub>, totalizando 54 testes de transferência de calor.

### 3.5 TRATAMENTO DOS DADOS EXPERIMENTAIS

Os cálculos das propriedades termofísicas do nanofluido, da taxa de transferência de calor ( $q$ ), do coeficiente global de transferência de calor ( $U_e$ ) e da efetividade do trocador de calor ( $\epsilon$ ), foram realizados com o auxílio do *software Engineering Equation Solver – EES®*.

#### 3.5.1 Cálculo das Propriedades Termofísicas dos Fluidos

As propriedades da água, tais como condutividade térmica ( $k$ ), massa específica ( $\rho$ ), viscosidade ( $\mu$ ) e calor específico à pressão constante ( $c_p$ ), foram fornecidas pelo *software EES®*, para sua temperatura média, à pressão atmosférica. A temperatura média de cada fluido (quente e frio) é dada por:

$$T_m = \frac{T_e + T_s}{2} \quad (16)$$

sendo que  $T_e$  e  $T_s$  referem-se às temperaturas de entrada e saída dos fluidos, respectivamente.

As propriedades do ouro sólido, tais como condutividade térmica, massa específica e calor específico à pressão constante, necessárias para o cálculo das propriedades do nanofluido, foram fornecidas pelo *software EES®* de maneira similar ao caso da água.

A condutividade térmica do nanofluido ( $k_{nf}$ ) foi calculada por meio da Equação 1, que considera as parcelas de condutividade estática (Equação 2) e de condutividade relacionada ao movimento Browniano das nanopartículas (Equação 3).

A viscosidade dinâmica do nanofluido foi calculada pela Equação 7, que utiliza a Equação 8 para determinação do diâmetro equivalente da molécula do fluido-base.

A massa específica do nanofluido foi obtida pela Equação 9 e o calor específico pela Equação 11.

A presença de nanopartículas, em geral, aumenta a viscosidade do fluido, requerendo assim uma maior potência de bombeamento; em contrapartida, eleva a sua condutividade térmica. Assim, faz-se necessário avaliar o desempenho do nanofluido em relação ao seu fluido-base, considerando-se propriedades termofísicas de ambos. Em regime laminar, onde as forças de inércia são pequenas em relação às viscosas, justifica-se utilizar nanofluido em comparação ao seu fluido-base se a razão do aumento da viscosidade ( $C_\mu$ ) e do aumento da condutividade térmica ( $C_k$ ) destes for menor do que 4 (MURSHED; ESTELLÉ; 2017), ou seja:

$$\frac{C_\mu}{C_k} < 4 \quad (17)$$

Quando distúrbios na direção de escoamento, originados por flutuações na corrente livre, pela rugosidade ou por vibrações superficiais são amplificados e desencadeiam o regime turbulento, a avaliação da eficácia do nanofluido em transferência de calor em comparação ao seu fluido-base é mensurada pelo número de Mouromtseff ( $Mo$ ). De acordo com Timofeeva et al. (2011), Halelfadl, Maré e Estellé (2014), e Murshed e Estellé (2017),  $Mo$  é dado por:

$$Mo = \frac{\rho^{0,8} k^{0,67} c_p^{0,33}}{\mu^{0,47}} \quad (18)$$

Para se justificar a utilização do nanofluido, a razão do seu número de Mouromtseff e do fluido-base (Equação 19) deve ser no mínimo igual a 1; quanto maior for esta razão, melhor é a eficiência do nanofluido em relação ao fluido comparado (MURSHED; ESTELLÉ, 2017).

$$\frac{Mo_{nf}}{Mo_{fb}} \geq 1 \quad (19)$$

sendo que  $Mo_{nf}$  e  $Mo_{fb}$  referem-se aos números de Mouromtseff do nanofluido e do fluido-base (água, no caso do presente trabalho), respectivamente.

De acordo com Bergman e Lavine (2017), escoamentos secundários resultantes do formato espiral de tubos helicoidais, enrolados de forma compacta, não apenas intensificam o coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ), e consequentemente a taxa de transferência de calor ( $\dot{q}$ ), mas também retardam a transição do regime laminar para o turbulento. Essa transição é representada pelo número de Reynolds crítico, que para tubos helicoidais, é dado por:

$$Re_c = 2300 \left[ 1 + 12 \left( \frac{d_{e,t}}{d_{e,b}} \right)^{0,5} \right] \quad (20)$$

sendo que  $d_{e,t}$  e  $d_{e,b}$  correspondem aos diâmetros externos do tubo e da bobina helicoidal, respectivamente; 2300 é o valor de Reynolds crítico referente ao surgimento da turbulência em tubos retos.

### 3.5.2 Cálculo da Taxa de Transferência de Calor e da Efetividade do TCCTH

A taxa de transferência de energia térmica no trocador de calor é obtida a partir do balanço da Primeira Lei da Termodinâmica, aplicado a um volume de controle com fronteiras rígidas, adiabático e apenas envolvendo troca de calor por mudança de entalpia entre os fluidos presentes. Assim, a taxa de transferência de calor experimentada pelo fluido frio é dada por:

$$\dot{q}_f = \dot{m}_f c_{p,f} \Delta T_f \quad (21)$$

em que  $\dot{m}_f$  refere-se à vazão mássica do fluido frio e  $c_{p,f}$  ao seu calor específico à pressão constante. A variação de temperatura experimentada pelo fluido é:

$$\Delta T_f = T_{f,sai} - T_{f,ent} \quad (22)$$

Analogamente, a taxa de transferência de calor experimentada pelo fluido quente é dada por:

$$\dot{q}_q = \dot{m}_q c_{p,q} \Delta T_q \quad (23)$$

em que  $\dot{m}_q$  refere-se à vazão mássica do fluido quente e  $c_{p,q}$  ao seu calor específico à pressão constante. A variação de temperatura experimentada pelo fluido é:

$$\Delta T_q = T_{q,ent} - T_{q,sai} \quad (24)$$

As vazões mássicas dos fluidos frio e quente são dadas pelas seguintes equações:

$$\dot{m}_f = \dot{V}_f \rho_f \quad (25)$$

$$\dot{m}_q = \dot{V}_q \rho_q \quad (26)$$

sendo que  $\dot{V}_f$  representa a vazão volumétrica do fluido frio e  $\rho_f$  a sua massa específica; e  $\dot{V}_q$  representa a vazão volumétrica do fluido quente e  $\rho_q$  a sua massa específica.

A taxa de transferência de calor observada experimentalmente entre as correntes dos fluidos é aproximada por (ELSHAZLY et al., 2017; POURHOSEINI; NAGHIZADEH; HOSEINZADEH, 2018):

$$\dot{q}_{obs} = \frac{|\dot{q}_f| + |\dot{q}_q|}{2} \quad (27)$$

sendo  $\dot{q}_f$  a taxa de transferência de calor do fluido frio, dada pela Equação 21 e  $\dot{q}_q$  a taxa de transferência de calor do fluido quente, dada pela Equação 23.

A efetividade do trocador de calor, de acordo com Bergman e Lavine (2017), é dada por:

$$\varepsilon \equiv \frac{\dot{q}_{obs}}{\dot{q}_{max}} \quad (28)$$

sendo  $\dot{q}_{max}$  a taxa de transferência de calor máxima, que ocorreria para o fluido com a taxa de capacidade calorífica mínima.

A taxa de capacidade calorífica do fluido frio e do fluido quente é dada pelas seguintes equações:

$$\dot{C}_f = \dot{m}_f c_{p,f} \quad (29)$$

$$\dot{C}_q = \dot{m}_q c_{p,q} \quad (30)$$

Se a taxa de capacidade calorífica do fluido frio ( $\dot{C}_f$ ) for menor que a do fluido quente, tem-se:

$$\dot{q}_{max} = \dot{C}_f (T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad (31)$$

Ou se, ao contrário, a taxa de capacidade calorífica do fluido quente ( $\dot{C}_q$ ) for menor que a do fluido frio, tem-se:

$$\dot{q}_{max} = \dot{C}_q (T_{q,ent} - T_{f,ent}) \quad (32)$$

A seguir é apresentado o modelo matemático que fornece os parâmetros necessários ao cálculo da taxa de transferência de calor, a ser comparada à  $\dot{q}_{obs}$ .

### 3.5.3 Cálculo do Coeficiente Global de Transferência de Calor

Segundo Bergman e Lavine (2017), o coeficiente global de transferência de calor ( $U_e$ ) mede a capacidade das barreiras convectivas e condutivas em transferirem calor, sendo imprescindível para o cálculo da taxa de transferência de calor.

O modelo matemático empregado para o cálculo das variáveis necessárias à obtenção de  $U_e$  em TCCTH, tais como Número de Nusselt e equações a este relacionadas, foi desenvolvido por Salimpour (2009).  $U_e$  é dado por:

$$\frac{1}{U_e} = \frac{A_e}{A_i h_f} + \frac{A_e \ln(d_{e,t} / d_{i,t})}{2 \pi k_t L_t} + \frac{1}{h_q} \quad (33)$$

sendo  $A_e$  a área superficial externa do tubo,  $A_i$  a área superficial interna do tubo,  $h_f$  o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido frio (que escoará no interior do tubo helicoidal),  $h_q$  o coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente (água, que escoará na seção anular do casco),  $d_{e,t}$  o diâmetro externo do tubo,  $d_{i,t}$  o diâmetro interno do tubo,  $k_t$  a condutividade térmica do tubo e  $L_t$  o comprimento do tubo.

Como mencionado anteriormente, foram utilizados como fluido frio: água, NF<sub>A</sub> e NF<sub>B</sub>.

O coeficiente de transferência de calor por convecção no lado do fluido frio é fornecido por:

$$h_f = \frac{Nu_f k_f}{d_{i,t}} \quad (34)$$

em que  $Nu_f$  refere-se ao número de Nusselt no lado do fluido frio e  $k_f$  à sua condutividade térmica.

O número de Nusselt no lado do fluido frio é obtido por:

$$Nu_f = 0,152 De^{0,431} \gamma^{-0,277} Pr_f^{1,06} \quad (35)$$

sendo  $De$  o número de Dean,  $\gamma$  um parâmetro adimensional determinado pelo modelo matemático e  $Pr_f$  o número de Prandtl do fluido frio.

O número de Dean, que relaciona a força da viscosidade atuante sobre um fluido que escoar em tubo curvado e a força centrífuga, é calculado pela equação:

$$De = Re_f \sqrt{\frac{d_{i,t}}{d_{e,b}}} \quad (36)$$

em que  $Re_f$  é o número de Reynolds no lado do fluido frio, dado por:

$$Re_f = \frac{4 \dot{m}_f}{\pi d_{i,t} \mu_f} \quad (37)$$

sendo  $\mu_f$  a viscosidade dinâmica do fluido frio.

O parâmetro adimensional referente ao modelo matemático é obtido por:

$$\gamma = \frac{\rho}{\pi d_{e,b}} \quad (38)$$

O número de Prandtl do fluido frio é obtido por:

$$Pr_f = \frac{c_{p,f} \mu_f}{k_f} \quad (39)$$

sendo  $c_{p,f}$  o calor específico do fluido frio à pressão constante.

O coeficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente pode ser obtido pela equação:



$$h_q = \frac{Nu_q k_q}{D_{hid}} \quad (40)$$

em que  $Nu_q$  refere-se ao número de Nusselt do fluido quente,  $k_q$  à sua condutividade térmica e  $D_{hid}$  ao diâmetro hidráulico do casco.

O número de Nusselt no lado do fluido quente é calculado pela equação:

$$Nu_q = 19,64 Re_q^{0,513} \gamma^{0,938} Pr_q^{0,129} \quad (41)$$

sendo  $Re_q$  e  $Pr_q$  o número de Reynolds do escoamento e o número de Prandtl do fluido quente, respectivamente.

O número de Prandtl do fluido quente é fornecido por:

$$Pr_q = \frac{c_{p,q} \mu_q}{k_q} \quad (42)$$

sendo  $\mu_q$  a viscosidade dinâmica do fluido quente à pressão constante.

Para o escoamento do fluido quente, o número de Reynolds é calculado por:

$$Re_q = \frac{4 \dot{m}_q}{\pi D_{hid} \mu_q} \quad (43)$$

De acordo com Salimpour (2009), o diâmetro hidráulico é dado por:

$$D_{hid} = \frac{D_{i,c}^2 - \pi d_{e,b} d_{e,t}^2 \gamma^{-1}}{D_{i,c} + \pi d_{e,b} d_{e,t} \gamma^{-1}} \quad (44)$$

Jamshidi et al. (2013) propõem a seguinte equação para o cálculo do diâmetro hidráulico:

$$D_{hid} = \frac{4(V_c - V_t) / (L_{i,c} - L_t)}{\pi (D_{i,c} + d_{e,t})} \quad (45)$$

sendo que  $V_c$  refere-se ao volume do casco e  $L_{i,c}$  ao seu comprimento interno;  $V_t$  refere-se ao volume do tubo helicoidal e  $L_t$  ao seu comprimento.

O volume do casco é dado por:

$$V_c = \frac{\pi D_{i,c}^2 L_{i,c}}{4} \quad (46)$$

E o volume do tubo é fornecido pela equação a seguir:

$$V_t = \frac{\pi d_{i,t}^2 L_t}{4} \quad (47)$$

Embora o trocador de calor utilizado no presente estudo seja de casco e tubo helicoidal, o cilindro de sustentação em sentido longitudinal permite a passagem do fluido no casco apenas pelo espaço anular externo à bobina.

Nesse caso, de acordo com Incropera et al. (2011), o diâmetro hidráulico para seção anular pode ser determinado por:

$$D_{hid} = D_{e,a} - D_{i,a} \quad (48)$$

sendo que  $D_{e,a}$  refere-se ao diâmetro externo da seção anular, que neste caso é igual ao diâmetro interno do casco.  $D_{i,a}$  refere-se ao diâmetro interno da seção anular, considerada igual ao diâmetro externo da bobina helicoidal.

A área superficial externa do tubo é dada por:

$$A_e = \pi d_{e,t} L_t \quad (49)$$

A área superficial interna do tubo é calculada por:

$$A_i = \pi d_{i,t} L_t \quad (50)$$

Pode-se comparar o valor da efetividade obtida a partir da taxa de transferência de calor experimental, dada pela Equação 27, com os valores calculados para os três diâmetros hidráulicos supracitados, determinados por Salimpour (2009), Jamshidi et al. (2013) e Incropera et al. (2011), a partir da equação:

$$\dot{q} = U_e A_e \Delta T_{ml} \quad (51)$$

em que  $\Delta T_{ml}$  representa a média logarítmica das diferenças de temperaturas que, para escoamento em sentido contracorrente, é dada pela Equação 52:

$$\Delta T_{ml} = \frac{(T_{q,ent} - T_{f,sai}) - (T_{q,sai} - T_{f,ent})}{\ln\left[\frac{(T_{q,ent} - T_{f,sai})}{(T_{q,sai} - T_{f,ent})}\right]} \quad (52)$$

Destaca-se que a configuração de sentido contracorrente, por possibilitar maiores diferenças de temperatura de entrada e de saída, confere maior eficiência ao trocador de calor, em comparação à de sentido paralelo.

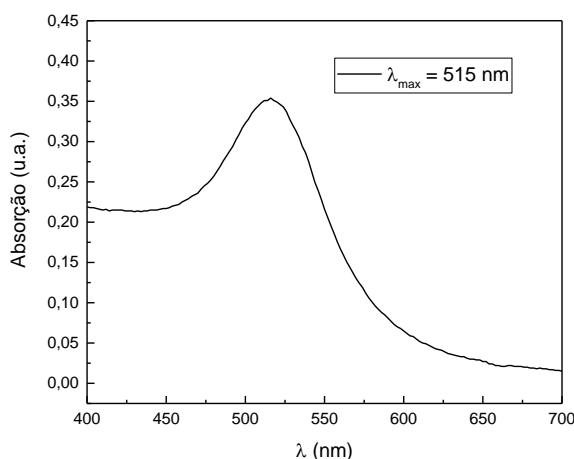
## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os principais resultados do presente estudo, quanto à caracterização das nanopartículas, ao tratamento dos dados experimentais obtidos nos testes de transferência de calor, e à análise fatorial, são apresentados a seguir.

### 4.1 CARACTERIZAÇÃO DAS NANOPARTÍCULAS

Como resultado da Espectroscopia de Absorção na região do UV-Visível, a Figura 6 apresenta o espectro de absorção referente à Ressonância Plasmônica das nanopartículas de ouro que compõem o nanofluido. Observa-se que o máximo de absorção da Ressonância Plasmônica ocorre para o comprimento de onda de 515 nm, que é característico das nanopartículas de ouro.

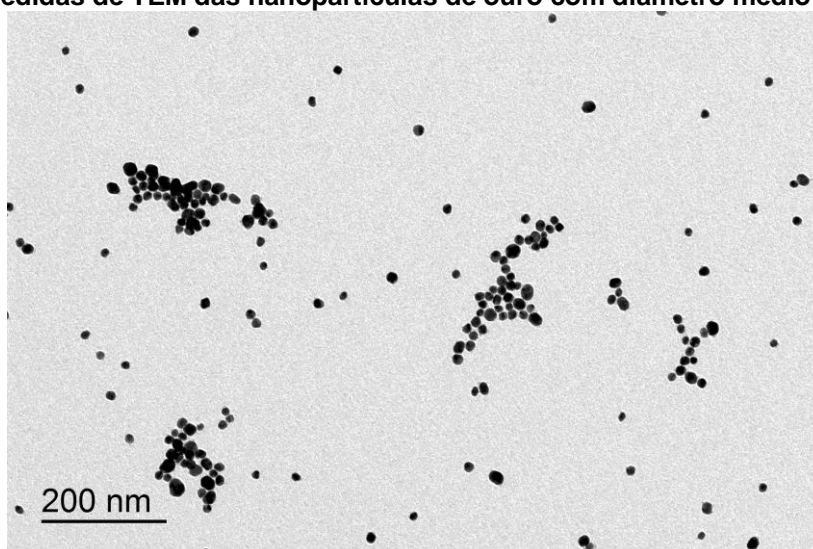
**Figura 6 - Espectro de absorção da Ressonância Plasmônica do ouro coloidal**



**Fonte: Autoria própria**

Como resultado da Microscopia Eletrônica de Transmissão (MET), na micrografia das nanopartículas de ouro (Figura 7), percebe-se o seu formato predominantemente esférico. Diferentes amostras e diferentes regiões das mesmas foram utilizadas para a determinação do diâmetro médio das nanopartículas de ouro.

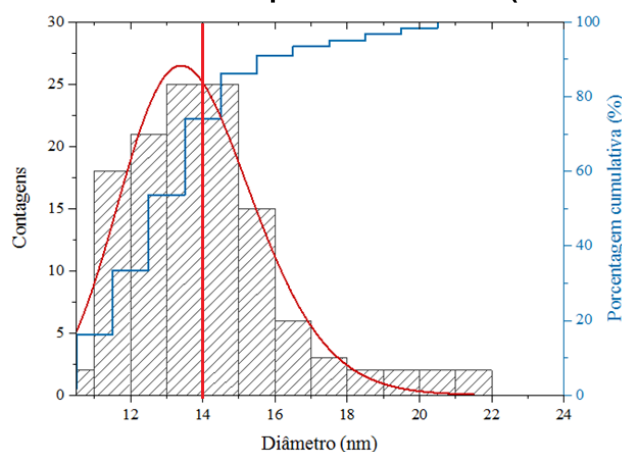
**Figura 7 - Medidas de TEM das nanopartículas de ouro com diâmetro médio de  $(14\pm 2)$  nm**



**Fonte: Autoria própria**

O Gráfico 2, realizado a partir de MET, mostra o diâmetro médio das nanopartículas de ouro (linha vertical vermelha), que foi de  $(14\pm 2)$  nm; este valor representa a metade do somatório das áreas sob a curva, também em vermelho.

**Gráfico 2 - Diâmetro médio das nanopartículas de ouro  $(14\pm 2)$  nm obtido por MET**



**Fonte: Autoria própria**

As medições de Potencial Zeta tiveram como resultado o valor de  $-22$  mV, que indicam estabilidade satisfatória do nanofluido de ouro, pois o valor negativo sugere que as nanopartículas de ouro estão carregadas negativamente na água, e assim se mantêm afastadas umas das outras; isto se deve à repulsão eletrostática entre as nanopartículas, primordial na estabilização de nanofluidos de ouro em água (KIM; BANG; ONOE, 2009).

## 4.2 ANÁLISE FATORIAL

Os resultados experimentais de efetividade representam a média dos 30 valores de cada teste de transferência de calor, utilizando o trocador de calor de casco e tubo helicoidal modificado, como mencionado na Seção 3.4. A efetividade é dada pela Equação 28.

Foram realizadas duas análises fatoriais multiníveis independentes, com diferentes frações volumétricas de nanopartículas (Nanofluido A e Nanofluido B), por meio do *software* Minitab® na versão *trial*, apresentadas a seguir.

### 4.2.1 Análise Fatorial Multiníveis (Nanofluido A)

A análise fatorial multiníveis no presente estudo tem como resposta a efetividade. O fator fração volumétrica ( $\phi$ ) apresenta 2 níveis: baixo (-1) referente à água fria, e alto (+1) referente ao nanofluido de ouro com fração volumétrica de nanopartículas igual a  $1,63 \times 10^{-5}\%$  (NF<sub>A</sub>). Os fatores temperatura de entrada do fluido quente ( $T_{q,ent}$ ) e vazão ( $\dot{V}$ ) apresentam 3 níveis: baixo (-1), médio (0) e alto (+1), conforme a Tabela 6.

**Tabela 6 - Experimento fatorial multiníveis para o Nanofluido A ( $\phi = 1,63 \times 10^{-5}$ ) (continua)**

Tratamento	Fatores e níveis			$\phi$ (% em volume)	$T_{q,ent}$ (°C)	V (L/h)	Efetividade
	$\phi$	$T_{q,ent}$	$\dot{V}$				
1	-1	-1	-1	0	40	20	<b>0,41590</b>
2	-1	-1	0	0	40	30	<b>0,35914</b>
3	-1	-1	+1	0	40	40	<b>0,34776</b>
4	-1	0	-1	0	50	20	<b>0,41421</b>
5	-1	0	0	0	50	30	<b>0,38988</b>
6	-1	0	+1	0	50	40	<b>0,37708</b>
7	-1	+1	-1	0	60	20	<b>0,41557</b>
8	-1	+1	0	0	60	30	<b>0,40168</b>
9	-1	+1	+1	0	60	40	<b>0,38763</b>
10	+1	-1	-1	$1,63 \times 10^{-5}$	40	20	<b>0,42144</b>
11	+1	-1	0	$1,63 \times 10^{-5}$	40	30	<b>0,38798</b>
12	+1	-1	+1	$1,63 \times 10^{-5}$	40	40	<b>0,36932</b>
13	+1	0	-1	$1,63 \times 10^{-5}$	50	20	<b>0,43580</b>
14	+1	0	0	$1,63 \times 10^{-5}$	50	30	<b>0,40026</b>

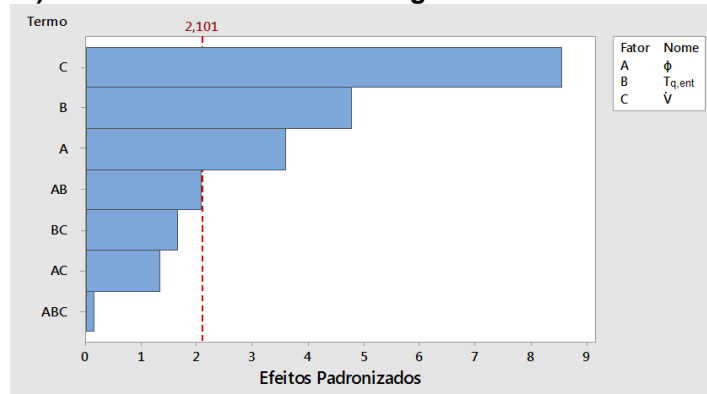
**Tabela 6 - Experimento fatorial multiníveis para o Nanofluido A ( $\phi = 1,63 \times 10^{-5}$ ) (conclusão)**

Tratamento	Fatores e níveis			$\phi$ (% em volume)	$T_{q,ent}$ (°C)	$\dot{V}$ (L/h)	Efetividade
	$\phi$	$T_{q,ent}$	$\dot{V}$				
15	+1	0	+1	$1,63 \times 10^{-5}$	50	40	<b>0,38436</b>
16	+1	+1	-1	$1,63 \times 10^{-5}$	60	20	<b>0,43835</b>
17	+1	+1	0	$1,63 \times 10^{-5}$	60	30	<b>0,40750</b>
18	+1	+1	+1	$1,63 \times 10^{-5}$	60	40	<b>0,40663</b>
19	-1	-1	-1	0	40	20	<b>0,41590</b>
20	-1	-1	0	0	40	30	<b>0,35914</b>
21	-1	-1	+1	0	40	40	<b>0,33899</b>
22	-1	0	-1	0	50	20	<b>0,41587</b>
23	-1	0	0	0	50	30	<b>0,38307</b>
24	-1	0	+1	0	50	40	<b>0,37836</b>
25	-1	+1	-1	0	60	20	<b>0,44706</b>
26	-1	+1	0	0	60	30	<b>0,41192</b>
27	-1	+1	+1	0	60	40	<b>0,38949</b>
28	+1	-1	-1	$1,63 \times 10^{-5}$	40	20	<b>0,43204</b>
29	+1	-1	0	$1,63 \times 10^{-5}$	40	30	<b>0,39523</b>
30	+1	-1	+1	$1,63 \times 10^{-5}$	40	40	<b>0,39558</b>
31	+1	0	-1	$1,63 \times 10^{-5}$	50	20	<b>0,39865</b>
32	+1	0	0	$1,63 \times 10^{-5}$	50	30	<b>0,38304</b>
33	+1	0	+1	$1,63 \times 10^{-5}$	50	40	<b>0,40249</b>
34	+1	+1	-1	$1,63 \times 10^{-5}$	60	20	<b>0,42495</b>
35	+1	+1	0	$1,63 \times 10^{-5}$	60	30	<b>0,41682</b>
36	+1	+1	+1	$1,63 \times 10^{-5}$	60	40	<b>0,39138</b>

**Fonte: Autoria própria**

O gráfico de Pareto dos efeitos (Gráfico 3) apresenta a influência de cada fator, e das interações entre fatores, na resposta (efetividade); constata-se que o fator de maior influência na resposta (efetividade) foi a vazão dos fluidos ( $\dot{V}$ ), seguida pela temperatura de entrada do fluido quente ( $T_{q,ent}$ ), e por último pela fração volumétrica das nanopartículas ( $\phi$ ). Estes três fatores isolados proporcionaram efeitos reais (não atribuídos ao erro experimental) sobre a efetividade do trocador de calor ao nível de significância de 5%, uma vez que apenas as barras desses três fatores ultrapassaram a linha pontilhada vermelha de significância estatística.

**Gráfico 3 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o  $NF_A$  (resposta é efetividade média). A linha vermelha indica a significância estatística de 5%**

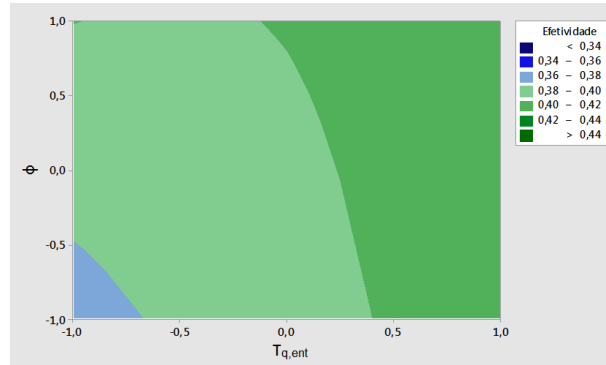


Fonte: Autoria própria

Os efeitos das interações entre os fatores na efetividade são exibidos nos Gráficos 4 a 9.

Observa-se, por meio do Gráfico 4, que a maior efetividade promovida pela interação entre  $\phi$  e  $T_{q,ent}$  ocorreu nos níveis altos de ambos fatores. O *software* Minitab® estimou os contornos a partir do modelo estatístico armazenado.

**Gráfico 4 - Gráfico de contorno de efetividade média versus  $\phi$ ;  $T_{q,ent}$  ( $NF_A$ )**

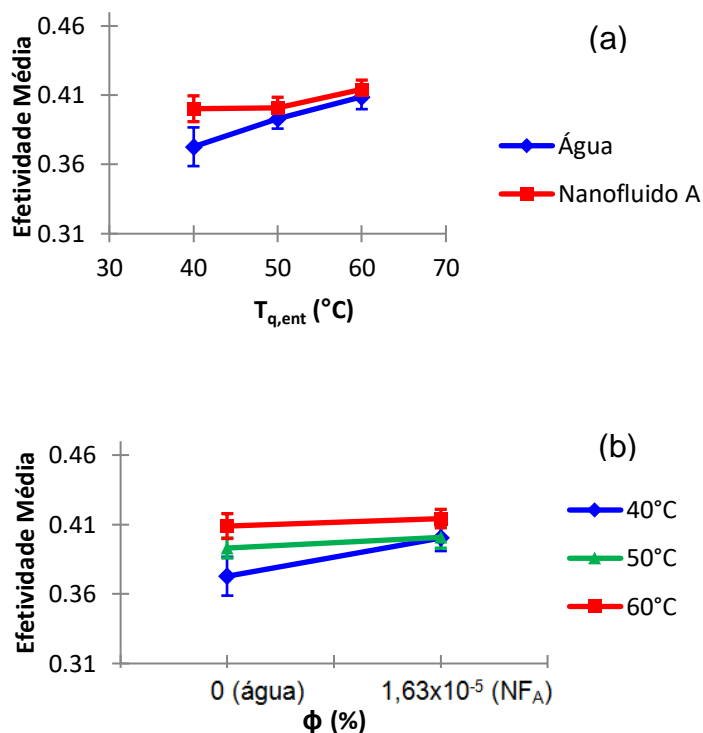


Fonte: Autoria própria

No entanto, numa análise mais detalhada, o Gráfico 5 mostra que a temperatura de entrada do fluido quente foi a principal responsável pelo incremento na efetividade.



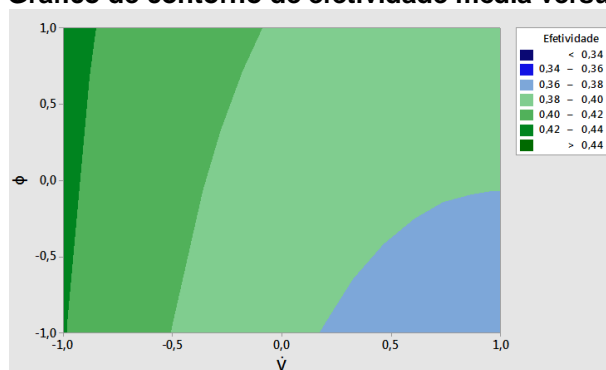
**Gráfico 5 - Efeito da interação entre  $\phi$  e  $T_{q,ent}$  na efetividade média ( $NF_A$ )**



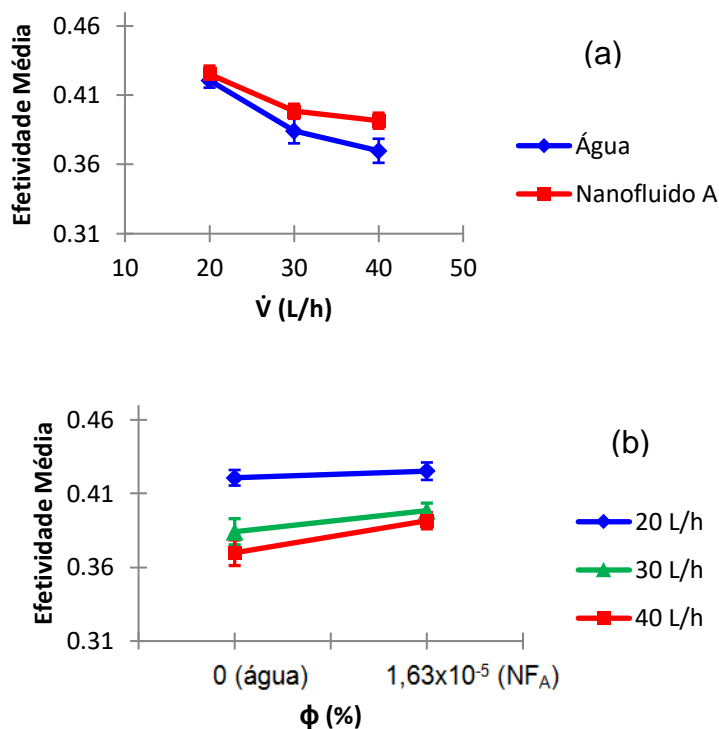
Fonte: Autoria própria

Percebe-se, por meio do Gráfico 6, que a maior efetividade promovida pela interação entre  $\phi$  e  $\dot{V}$  foi verificada no nível alto de  $\phi$  e no nível baixo de  $\dot{V}$ .

**Gráfico 6 - Gráfico de contorno de efetividade média versus  $\phi$ ;  $\dot{V}$  ( $NF_A$ )**

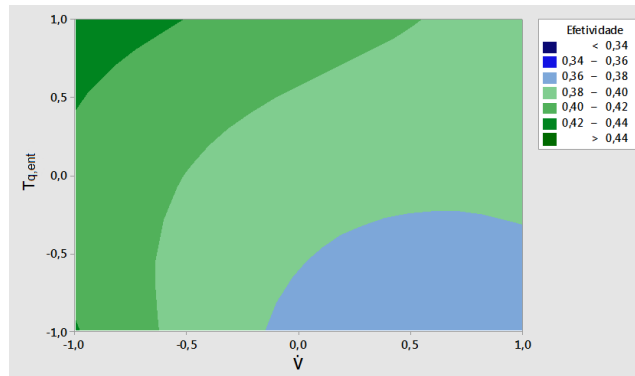


Porém, o Gráfico 7 mostra que neste caso a vazão dos fluidos foi o fator mais determinante na efetividade.

Gráfico 7 - Efeito da interação entre  $\phi$  e  $\dot{V}$  na efetividade média (NF<sub>A</sub>)

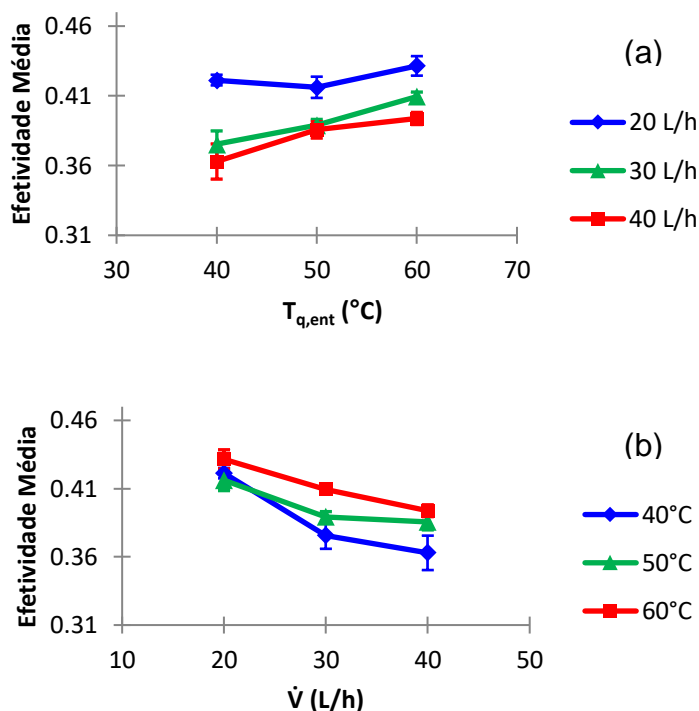
Fonte: Autoria própria

Nota-se, por meio do Gráfico 8, que a maior efetividade promovida pela interação entre  $T_{q,ent}$  e  $\dot{V}$  ocorreu no nível alto de  $T_{q,ent}$  e no nível baixo de  $\dot{V}$ .

Gráfico 8 - Gráfico de contorno de efetividade média versus  $T_{q,ent}$ ;  $\dot{V}$  (NF<sub>A</sub>)

Fonte: Autoria própria

O Gráfico 9 mostra que a diminuição de  $\dot{V}$  e o aumento de  $T_{q,ent}$  promovem incrementos na efetividade média.

Gráfico 9 - Efeito da interação entre  $T_{q,ent}$  e  $\dot{V}$  na efetividade média ( $NF_A$ )

Fonte: Autoria própria

Ao desconsiderar as interações não significativas dos fatores envolvidos, a regressão linear fornece:

$$Efetividade = 0,39835 + 0,00675\phi + 0,01252T_{e,q} - 0,02111\dot{V} \quad (53)$$

Os efeitos dos fatores A, B e C na efetividade do trocador de calor, calculados a partir das Equações 13, 14 e 15, respectivamente, são exibidos na Tabela 7.

Tabela 7 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média ( $NF_A$ )

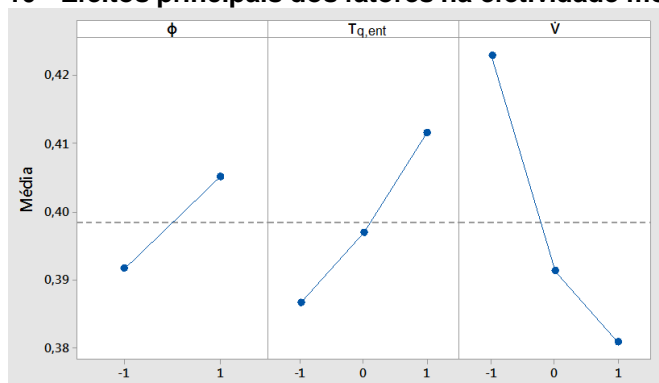
Fator	Efeito	Variação da resposta	
$\phi$	A	0,01350	3,4%
$T_{q,ent}$	B	0,02504	6,3%
$\dot{V}$	C	-0,04222	-10,6%

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que o aumento do nível da fração volumétrica das nanopartículas (efeito A) produziu um incremento de 3,4% na efetividade média; o aumento dos níveis da temperatura de entrada do fluido quente (efeito B) produziu um incremento de 6,3% na efetividade média; enquanto o aumento dos níveis da vazão dos fluidos (efeito C)

produziu uma diminuição de 10,6% na efetividade média. O Gráfico 10 mostra os perfis desses efeitos.

**Gráfico 10 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média (NF<sub>A</sub>)**



Fonte: Autoria própria

A Tabela 8 apresenta a análise da variância (ANOVA), fundamental para a avaliação de aceitabilidade do modelo de regressão do experimento fatorial.

**Tabela 8 - Tabela de análise da variância (ANOVA) para o ajuste de um modelo linear com 3 parâmetros (NF<sub>A</sub>)**

Fonte de variação	$\nu$	Soma Quadrática	Média Quadrática	Contribuição	Valor F
Regressão	3	0,016103	0,005368	73,57%	29,70
$\phi$	1	0,001643	0,001643	7,51%	9,09
$T_{q,ent}$	1	0,003764	0,003764	17,20%	20,82
$\dot{V}$	1	0,010697	0,010697	48,87%	59,18
Resíduos	32	0,005784	0,000181	26,43%	-
Total	35	0,021887	-	100,00%	-

% variação explicada:  $R^2 = 73,57\%$

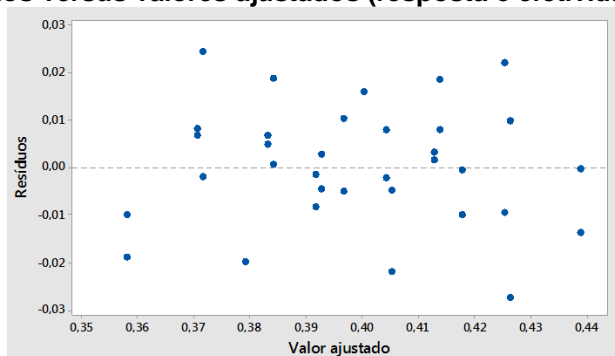
Fonte: Autoria própria

A porcentagem de variação da resposta explicada pelos fatores, ou seja, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), foi de 73,57%, sendo, desse total, a contribuição do fator  $\phi$  igual a 7,51%, do fator  $T_{q,ent}$  igual a 17,20% e do fator  $\dot{V}$  igual a 48,87%.

Embora  $R^2$  seja inferior a 90%, que seria o mínimo recomendado, o ajuste da regressão tem sua qualidade validada pelo teste F, já que o valor calculado ( $F_{3,32}=29,7$ ) é maior que o tabelado ( $F_{3,32}=2,904$ ) para o mesmo nível de significância de 5%.

O Gráfico 11 exibe os resíduos, que representam a diferença entre as respostas previstas pela regressão (valores ajustados) e as respostas experimentais, e auxiliam na avaliação da qualidade do ajuste do modelo estatístico.

**Gráfico 11 - Resíduos versus valores ajustados (resposta é efetividade média, para NF<sub>A</sub>)**

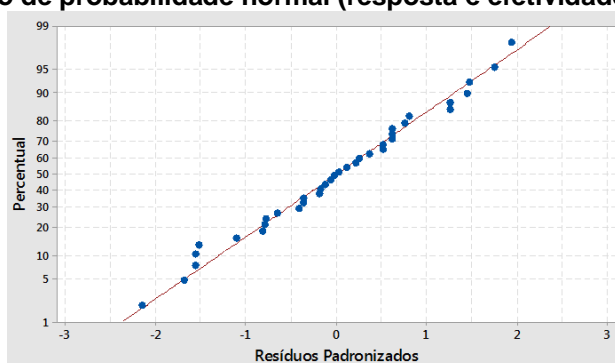


**Fonte: Autoria própria**

Verifica-se que os resíduos se situam aleatoriamente em torno do valor zero, de maneira a não se aglomerarem em um único valor, apresentando uma adequada distribuição, sugerindo significância estatística do modelo linear (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS, 2010; MONTGOMERY, 2012).

O gráfico de probabilidade normal (Gráfico 12) pode indicar se os resíduos se distribuem normalmente.

**Gráfico 12 - Gráfico de probabilidade normal (resposta é efetividade média, para o NF<sub>A</sub>)**



**Fonte: Autoria própria**

Como o gráfico de probabilidade normal dos resíduos segue aproximadamente uma linha reta, sugere que os resíduos são independentes e distribuídos normalmente, indicando qualidade do modelo estatístico (RODRIGUES; IEMMA, 2005, p. 104; MONTGOMERY, 2012).

#### 4.2.2 Análise Fatorial Multiníveis (Nanofluido B)

A análise fatorial multiníveis no presente estudo tem como resposta a efetividade. O fator fração volumétrica ( $\phi$ ) apresenta 2 níveis: baixo (-1) referente à água fria, e alto (+1) referente ao nanofluido de ouro com fração volumétrica de nanopartículas igual a  $6,53 \times 10^{-5}\%$  (NF<sub>B</sub>). Os fatores temperatura de entrada do fluido quente ( $T_{q,ent}$ ) e vazão ( $\dot{V}$ ) apresentam 3 níveis: baixo (-1), médio (0) e alto (+1), conforme a Tabela 9.

**Tabela 9 - Experimento fatorial multiníveis para o Nanofluido B ( $\phi = 6,53 \times 10^{-5}$ ) (continua)**

Tratamento	Fatores e níveis			$\phi$ (% em volume)	$T_{q,ent}$ (°C)	$\dot{V}$ (L/h)	Efetividade
	$\phi$	$T_{q,ent}$	$\dot{V}$				
1	-1	-1	-1	0	40	20	<b>0,41590</b>
2	-1	-1	0	0	40	30	<b>0,35914</b>
3	-1	-1	+1	0	40	40	<b>0,34776</b>
4	-1	0	-1	0	50	20	<b>0,41421</b>
5	-1	0	0	0	50	30	<b>0,38988</b>
6	-1	0	+1	0	50	40	<b>0,37708</b>
7	-1	+1	-1	0	60	20	<b>0,41557</b>
8	-1	+1	0	0	60	30	<b>0,40168</b>
9	-1	+1	+1	0	60	40	<b>0,38763</b>
10	+1	-1	-1	$6,53 \times 10^{-5}$	40	20	<b>0,40690</b>
11	+1	-1	0	$6,53 \times 10^{-5}$	40	30	<b>0,35247</b>
12	+1	-1	+1	$6,53 \times 10^{-5}$	40	40	<b>0,36194</b>
13	+1	0	-1	$6,53 \times 10^{-5}$	50	20	<b>0,43272</b>
14	+1	0	0	$6,53 \times 10^{-5}$	50	30	<b>0,41442</b>
15	+1	0	+1	$6,53 \times 10^{-5}$	50	40	<b>0,37845</b>
16	+1	+1	-1	$6,53 \times 10^{-5}$	60	20	<b>0,44622</b>
17	+1	+1	0	$6,53 \times 10^{-5}$	60	30	<b>0,41867</b>
18	+1	+1	+1	$6,53 \times 10^{-5}$	60	40	<b>0,40307</b>
19	-1	-1	-1	0	40	20	<b>0,41590</b>
20	-1	-1	0	0	40	30	<b>0,35914</b>
21	-1	-1	+1	0	40	40	<b>0,33899</b>
22	-1	0	-1	0	50	20	<b>0,41587</b>
23	-1	0	0	0	50	30	<b>0,38307</b>
24	-1	0	+1	0	50	40	<b>0,37836</b>
25	-1	+1	-1	0	60	20	<b>0,44706</b>

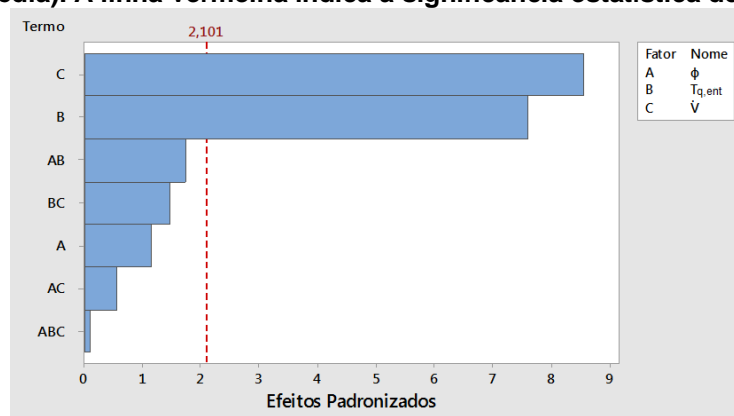
**Tabela 9 - Experimento fatorial multiníveis para o Nanofluido B ( $\phi = 6,53 \times 10^{-5}$ ) (conclusão)**

Tratamento	Fatores e níveis			$\phi$ (% em volume)	$T_{q,ent}$ (°C)	$\dot{V}$ (L/h)	Efetividade
	$\phi$	$T_{q,ent}$	$\dot{V}$				
26	-1	+1	0	0	60	30	<b>0,41192</b>
27	-1	+1	+1	0	60	40	<b>0,38949</b>
28	+1	-1	-1	$6,53 \times 10^{-5}$	40	20	<b>0,39471</b>
29	+1	-1	0	$6,53 \times 10^{-5}$	40	30	<b>0,37021</b>
30	+1	-1	+1	$6,53 \times 10^{-5}$	40	40	<b>0,29580</b>
31	+1	0	-1	$6,53 \times 10^{-5}$	50	20	<b>0,42309</b>
32	+1	0	0	$6,53 \times 10^{-5}$	50	30	<b>0,40806</b>
33	+1	0	+1	$6,53 \times 10^{-5}$	50	40	<b>0,39205</b>
34	+1	+1	-1	$6,53 \times 10^{-5}$	60	20	<b>0,44060</b>
35	+1	+1	0	$6,53 \times 10^{-5}$	60	30	<b>0,41126</b>
36	+1	+1	+1	$6,53 \times 10^{-5}$	60	40	<b>0,39206</b>

Fonte: Autoria própria

O gráfico de Pareto dos efeitos (Gráfico 13) apresenta a influência de cada fator, e das interações entre fatores, na resposta (efetividade); constata-se que o fator de maior influência na resposta (efetividade) foi a vazão volumétrica dos fluidos ( $\dot{V}$ ), seguida da temperatura de entrada do fluido quente ( $T_{q,ent}$ ), enquanto que a fração volumétrica das nanopartículas ( $\phi$ ) não teve, neste caso, participação importante, situando-se abaixo da linha de significância estatística, possivelmente devido à aglomeração das nanopartículas, que, em geral, decrementa a condutividade térmica do nanofluido.

**Gráfico 13 - Gráfico de Pareto dos efeitos padronizados para o NF<sub>B</sub> (resposta é efetividade média). A linha vermelha indica a significância estatística de 5%**

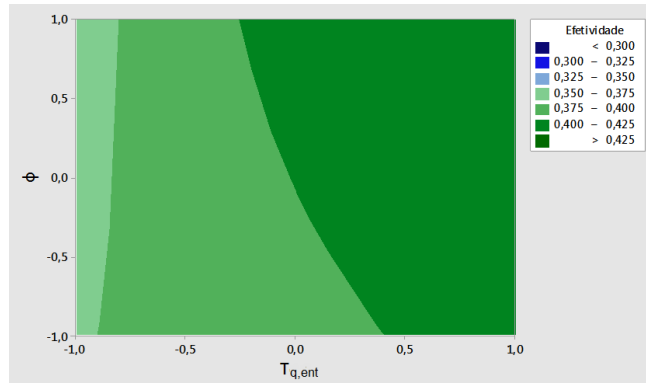


Fonte: Autoria própria

Os efeitos das interações entre os fatores na efetividade são exibidos nos Gráficos 14 a 19.

De acordo com o Gráfico 14, a maior efetividade promovida pela interação entre  $\phi$  e  $T_{q,ent}$  ocorreu no nível alto de  $T_{q,ent}$ .

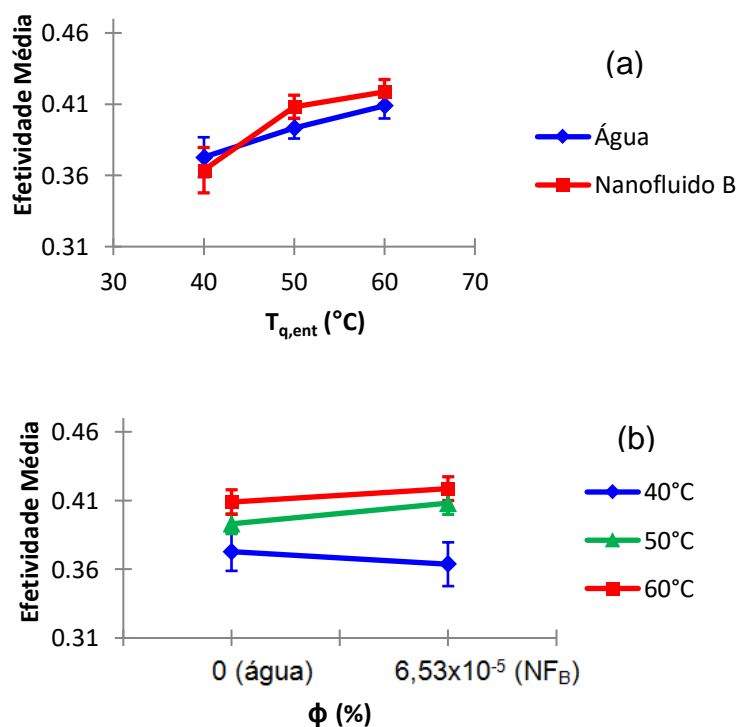
**Gráfico 14 - Gráfico de contorno de efetividade média versus  $\phi$ ;  $T_{q,ent}$  (NF<sub>B</sub>)**



Fonte: Autoria própria

Em análise mais detalhada, o Gráfico 15 indica que neste caso a temperatura foi a principal responsável pelo incremento na efetividade.

**Gráfico 15 - Efeito da interação entre  $\phi$  e  $T_{q,ent}$  na efetividade média (NF<sub>B</sub>)**

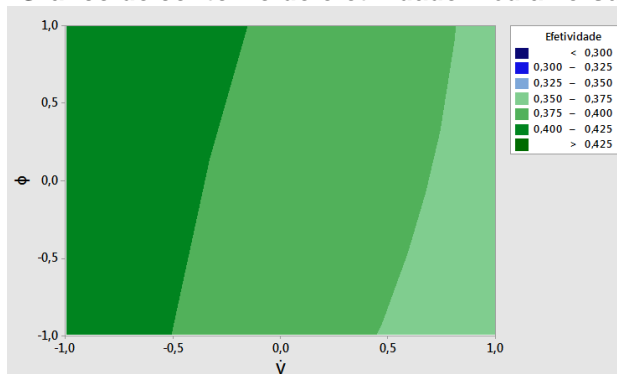


Fonte: Autoria própria



Percebe-se por meio do Gráfico 16 que a maior efetividade promovida pela interação entre  $\phi$  e  $\dot{V}$  foi verificada no nível baixo de  $\dot{V}$ .

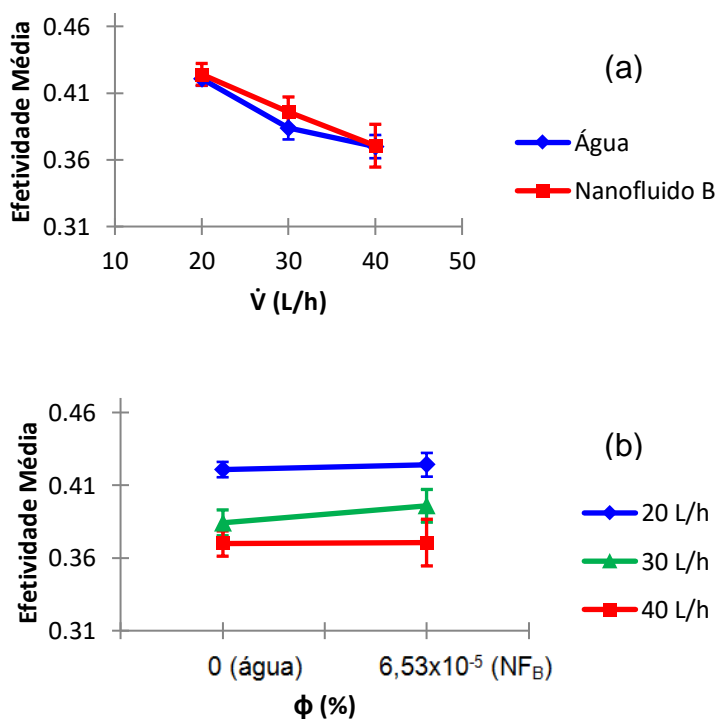
**Gráfico 16 - Gráfico de contorno de efetividade média versus  $\phi$ ;  $\dot{V}$  (NF<sub>B</sub>)**



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 17 confirma que em todos os níveis de  $\dot{V}$ , torna-se indiferente o uso de água ou de nanofluido, sendo  $\dot{V}$  o fator mais determinante na efetividade.

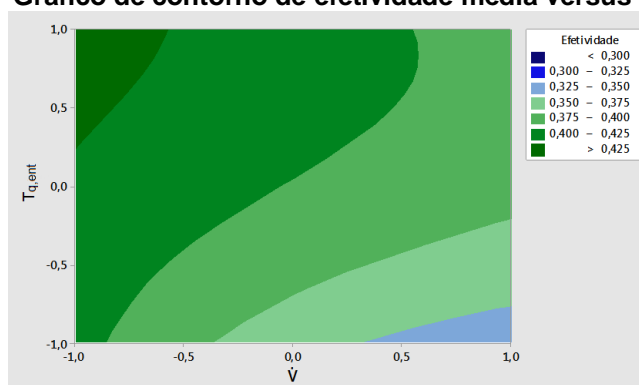
**Gráfico 17 - Efeito da interação entre  $\phi$  e  $\dot{V}$  na efetividade média (NF<sub>B</sub>)**



Fonte: Autoria própria

Nota-se, por meio do Gráfico 18, que a maior efetividade promovida pela interação entre  $T_{q,ent}$  e  $\dot{V}$  ocorreu no nível alto de  $T_{q,ent}$  e no nível baixo de  $\dot{V}$ .

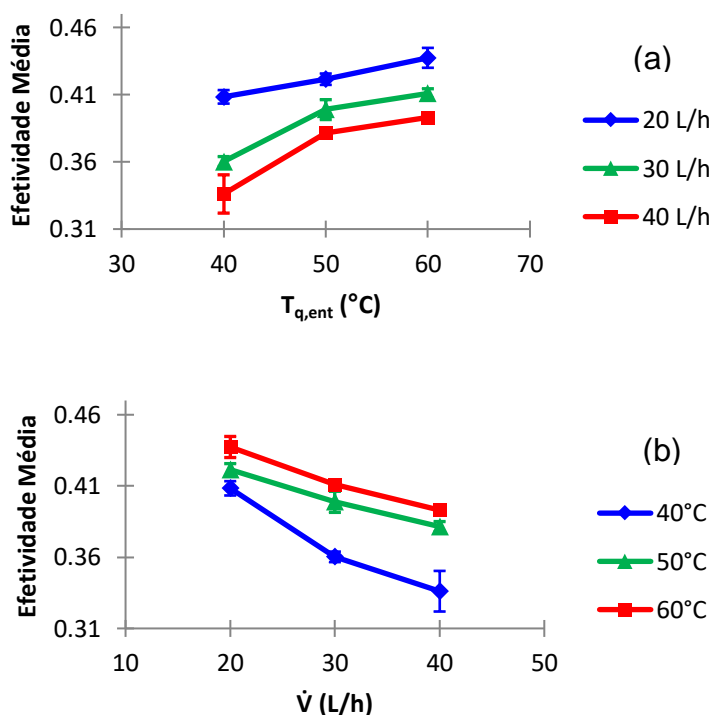
**Gráfico 18 - Gráfico de contorno de efetividade média versus  $T_{q,ent}$ ;  $\dot{V}$  (NF<sub>B</sub>)**



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 19 mostra que a diminuição de  $\dot{V}$  e o aumento de  $T_{q,ent}$  promovem incrementos na efetividade média.

**Gráfico 19 - Efeito da interação entre  $T_{q,ent}$  e  $\dot{V}$  na efetividade média (NF<sub>B</sub>)**



Fonte: Autoria própria

Uma vez que, como indicado no Gráfico de Pareto (Gráfico 13), os efeitos produzidos pelas interações entre fatores, bem como o da fração volumétrica das nanopartículas situam-se acima do nível de 5% de significância estatística ( $p > 0,05$ ), estes não são considerados, e a regressão linear é dada por:

$$Efetividade = 0,39420 + 0,02276T_{e,q} - 0,02609\dot{V} \quad (54)$$

Os efeitos dos fatores B e C na efetividade do trocador de calor, calculados a partir das Equações 14 e 15, respectivamente, são exibidos na Tabela 10.

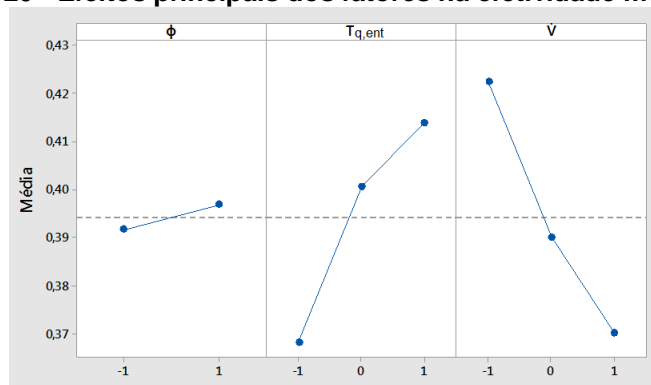
**Tabela 10 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média (NF<sub>B</sub>)**

Fator	Efeito		Variação da resposta
$T_{q,ent}$	B	0,04552	11,6%
$\dot{V}$	C	-0,05218	-13,2%

Fonte: Autoria própria

Percebe-se que o aumento dos níveis da temperatura de entrada do fluido quente (efeito B) produziu um incremento de 11,6% na efetividade média, enquanto o aumento dos níveis da vazão dos fluidos (efeito C) produziu um decréscimo de 13,2% na efetividade média. Os perfis dos efeitos isolados referentes aos três fatores estudados são ilustrados no Gráfico 20.

**Gráfico 20 - Efeitos principais dos fatores na efetividade média (NF<sub>B</sub>)**



Fonte: Autoria própria

A Tabela 11 apresenta a análise de variância (ANOVA), fundamental para a avaliação de aceitabilidade do modelo de regressão do experimento fatorial.

**Tabela 11 - Tabela de análise da variância (ANOVA) para o ajuste de um modelo linear com 3 parâmetros (NF<sub>B</sub>)**

Fonte de variação	$\nu$	Soma Quadrática	Média Quadrática	Contribuição	Valor F
Regressão	3	0,029015	0,009672	80,5%	43,98
$\phi$	1	0,000246	0,000246	0,7%	1,12
$T_{q,ent}$	1	0,012438	0,012438	34,5%	56,55
$\dot{V}$	1	0,016331	0,016331	45,3%	74,26
Resíduos	32	0,007038	0,000220	19,5%	-
Total	35	0,036053	-	100,0%	-

% variação explicada:  $R^2 = 80,5\%$

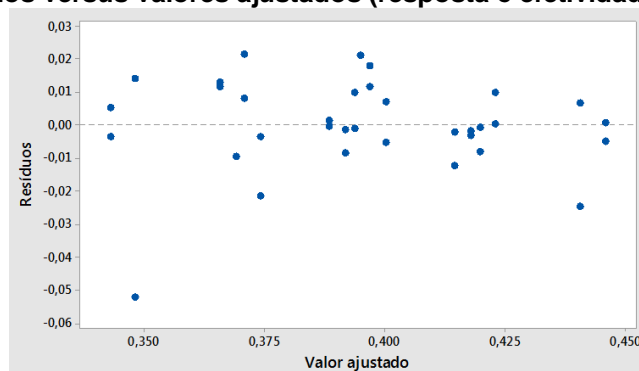
**Fonte: Autoria própria**

A porcentagem de variação da resposta explicada pelos fatores, ou seja, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), foi de 80,5%, sendo, desse total, a contribuição do fator  $\phi$  igual a 0,7%, do fator  $T_{q,ent}$  igual a 34,5% e do fator  $\dot{V}$  igual a 45,3%.

Embora  $R^2$  seja inferior a 90%, o ajuste da regressão tem sua qualidade validada pelo teste F, já que o valor calculado ( $F_{3,32}=43,98$ ) é maior que o tabelado ( $F_{3,32}=2,904$ ) para o mesmo nível de significância de 5%.

O Gráfico 21 exibe os resíduos, ferramenta auxiliar no diagnóstico da qualidade do ajuste do modelo estatístico, e que representam a diferença entre as respostas previstas pela regressão (valores ajustados) e as respostas experimentais.

**Gráfico 21 - Resíduos versus valores ajustados (resposta é efetividade média, para o NF<sub>B</sub>)**



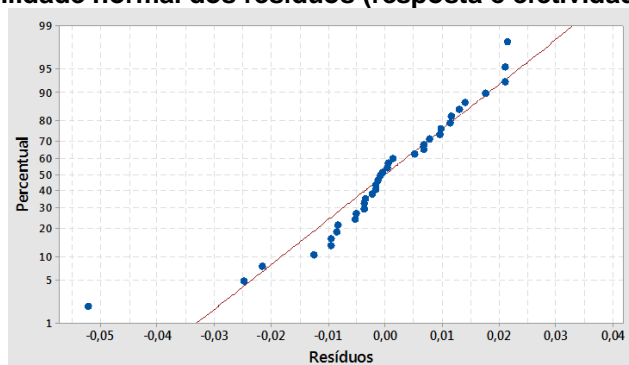
**Fonte: Autoria própria**

Verifica-se que, embora os resíduos se situem aleatoriamente em torno do valor zero, de maneira a não se aglomerarem em um único valor, sugerindo significância estatística do modelo linear (BARROS NETO; SCARMINIO; BRUNS,

2010; MONTGOMERY, 2012), estes não são tão bem distribuídos quanto no caso do Nanofluido A.

O gráfico de probabilidade normal (Gráfico 22) pode indicar se os resíduos se distribuem normalmente.

**Gráfico 22 - Probabilidade normal dos resíduos (resposta é efetividade média, para o NF<sub>B</sub>)**



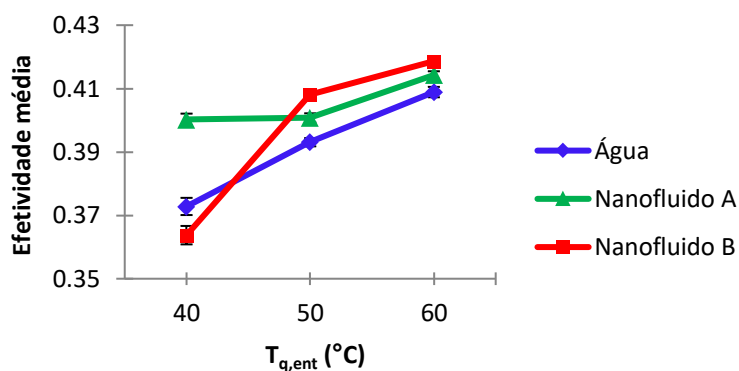
**Fonte: Autoria própria**

O gráfico de probabilidade normal dos resíduos, que segue aproximadamente uma linha reta, sugere que os resíduos são independentes e distribuídos normalmente, e indica qualidade do modelo estatístico (RODRIGUES; IEMMA, 2005, p. 104; MONTGOMERY, 2012), no entanto apresenta menos normalidade que o Gráfico 11, referente ao Nanofluido A.

#### 4.3 COMPARAÇÃO DO DESEMPENHO DOS NANOFLUIDOS E RELAÇÃO COM SUAS PROPRIEDADES TERMOFÍSICAS

A elevação da temperatura promoveu incremento na efetividade ( $\epsilon$ ) do trocador de calor, como pode ser observado por meio do Gráfico 23, cujos resultados foram obtidos da Equação 28 ( $\epsilon = \dot{q}_{obs} / \dot{q}_{max}$ ). Este comportamento está relacionado à alteração das propriedades termofísicas dos fluidos utilizados, influenciada pela variação da temperatura. O NF<sub>B</sub> apresentou um incremento de 15,1% em  $\epsilon$  com a elevação da temperatura de 40°C para 60°C, enquanto para o NF<sub>A</sub> este incremento foi de 3,5% e para a água foi de 9,7%.

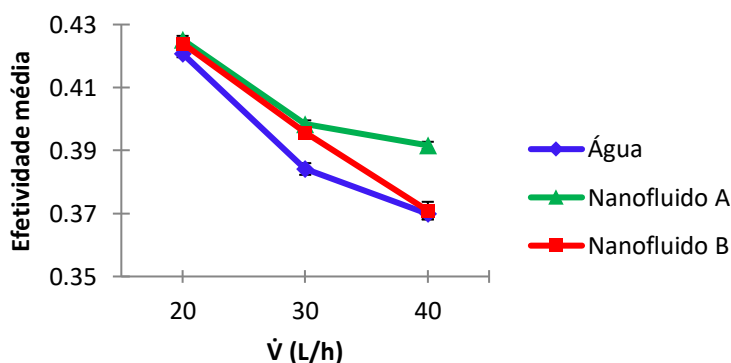
Gráfico 23 - Efetividade média versus Temperatura



Fonte: Autoria própria

A diminuição da vazão volumétrica ( $\dot{V}$ ) dos fluidos de 40 para 20 L/h propiciou incrementos na efetividade do trocador de calor, iguais a 7,9%, 12,1% e 12,5%, utilizando-se  $NF_A$ , água e  $NF_B$ , respectivamente, como pode ser percebido por meio do Gráfico 24.

Gráfico 24 - Efetividade média versus Vazão

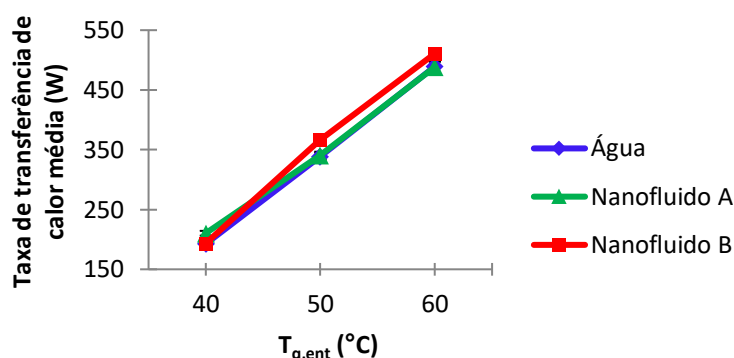


Fonte: Autoria própria

Quanto à influência da vazão volumétrica dos fluidos, a diminuição desta provocou incremento na efetividade do trocador de calor, já que uma menor vazão possibilita maior tempo de residência do fluido durante a sua passagem pelo volume de controle (CECCO, 2017). O fluido quente, ao passar mais lentamente perde mais calor na saída do trocador de calor, produzindo um valor de efetividade maior.

O Gráfico 25 apresenta, em relação à  $T_{q,ent}$ , a variação da taxa de transferência de calor observada experimentalmente ( $\dot{q}_{obs}$ ), cujos resultados foram dados pela Equação 27 [ $\dot{q}_{obs} = (|\dot{q}_f| + |\dot{q}_q|) / 2$ ]. Nota-se, como esperado, o incremento de  $\dot{q}_{obs}$  com o aumento da temperatura para os três fluidos frios.

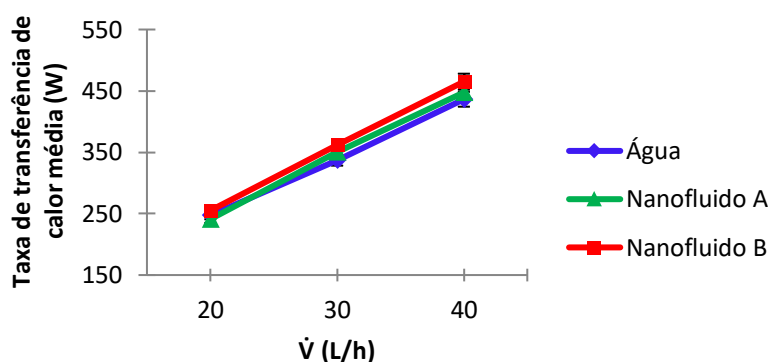
Gráfico 25 - Taxa de transferência de calor média versus Temperatura



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 26 mostra a variação de  $\dot{q}_{obs}$ , em relação à vazão volumétrica dos fluidos. Percebe-se, também como esperado, o incremento de  $\dot{q}_{obs}$  com o aumento da vazão para os três fluidos frios.

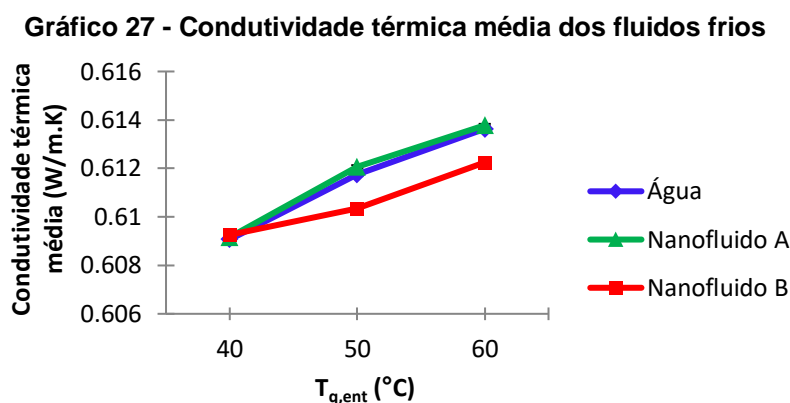
Gráfico 26 - Taxa de transferência de calor média versus Vazão



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 27, que apresenta os resultados de condutividade térmica ( $k$ ) dos fluidos frios, dados pela Equação 1 ( $k_{nf} = k_{estática} + k_{Browniano}$ ) no caso dos nanofluidos, e fornecidos pelo software EES® no caso da água (assim como as demais propriedades da água), mostra que houve incremento da condutividade térmica dos fluidos frios em relação ao aumento da temperatura, o que condiz com a literatura. Incrementos na condutividade térmica elevam os valores do coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ), e conseqüentemente da taxa de transferência de calor ( $\dot{q}$ ) e da efetividade do trocador de calor ( $\epsilon$ ), como pode ser observado por meio do Gráfico 23. Em relação à adição de nanopartículas à água bidestilada, uma maior concentração de nanopartículas (Nanofluido B) não

proporcionou incremento na condutividade térmica em relação ao fluido-base como se esperava, mas ao contrário, fez com que esta diminuísse às temperaturas mais elevadas, possivelmente devido à degradação do surfactante com o aumento da temperatura. O Apêndice A contém as propriedades termofísicas do fluido quente e dos fluidos frios em todas as condições operacionais estudadas.

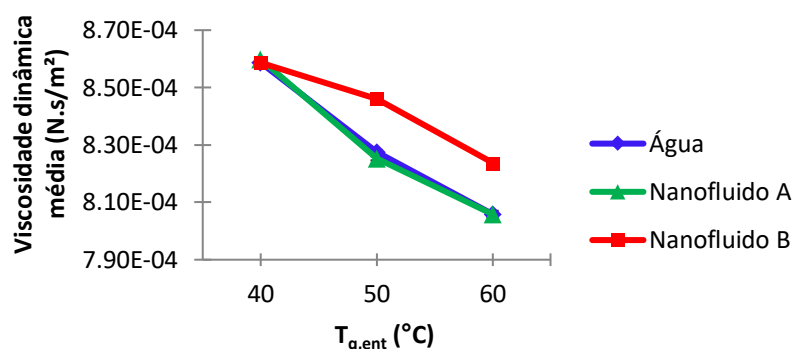


Fonte: Autoria própria

O Gráfico 28, que apresenta a variação da viscosidade dinâmica ( $\mu$ ) dos fluidos frios, cujos resultados foram dados pela Equação 7  $\{\mu_{nf} = \mu_{fb} / [1 - 34,87 \phi^{1,03} (d_{np} / d_{fb})^{-0,3}]\}$  no caso dos nanofluidos, exibe um decremento desta propriedade em relação ao aumento da temperatura, característico do comportamento Newtoniano já esperado para a água. Os nanofluidos apresentaram comportamento similar, devido à baixa fração volumétrica de nanopartículas de ouro em suspensão na água. Entretanto, como se observa, o Nanofluido B, exceto à  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$ , por possuir maior número de nanopartículas apresentou viscosidade ligeiramente superior (2,2%) aos demais fluidos frios.



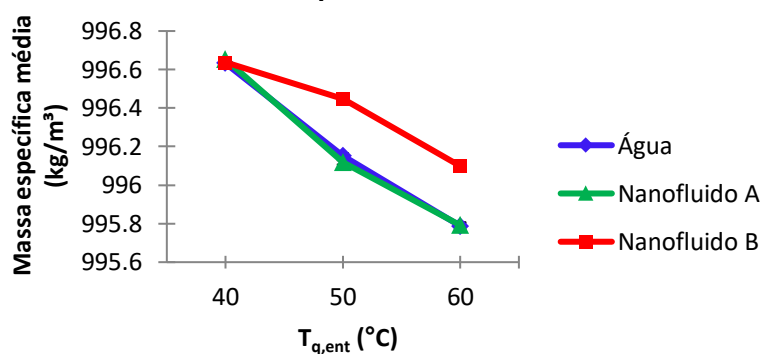
Gráfico 28 - Viscosidade dinâmica média dos fluidos frios



Fonte: Autoria própria

O Gráfico 29 apresenta a variação das massas específicas ( $\rho$ ) dos fluidos frios, cujos resultados foram dados pela Equação 9 [ $\rho_{nf} = (1 - \phi) \rho_{fb} + (\phi \rho_{np})$ ] no caso dos nanofluidos. Como se observa, o Nanofluido B exceto à  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$ , por possuir maior número de nanopartículas apresentou massa específica superior aos demais fluidos frios, entretanto essa diferença foi de apenas 1%. Todos os fluidos frios sofreram uma diminuição em suas massas específicas com o aumento de  $T_{q,ent}$ , pois, ao serem aquecidos, os átomos e moléculas dos fluidos passam a se movimentar com maior velocidade, o que os leva a ocuparem um espaço intermolecular maior. A expansão aumenta seu volume por unidade de massa, o que conseqüentemente diminui a sua massa específica.

Gráfico 29 - Massa específica média dos fluidos frios

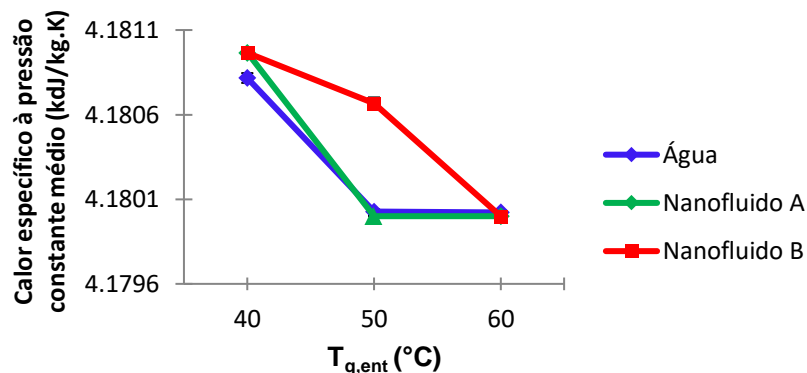


Fonte: Autoria própria

O calor específico à pressão constante ( $c_p$ ) dos fluidos frios, como se observa por meio do Gráfico 30, praticamente não variou com a alteração da temperatura, e os nanofluidos, cujos resultados foram dados pela Equação 11 [ $c_{p,nf} = [(1 - \phi) \rho_{fb} c_{p,fb}$

+  $(\phi \rho_{np} c_{p,np}) / \rho_{nf}$ , apresentaram os mesmos valores que a água. Esperava-se que o aumento da porcentagem volumétrica de nanopartículas causasse diminuição no valor do  $c_p$  dos nanofluidos, o que não ocorreu.

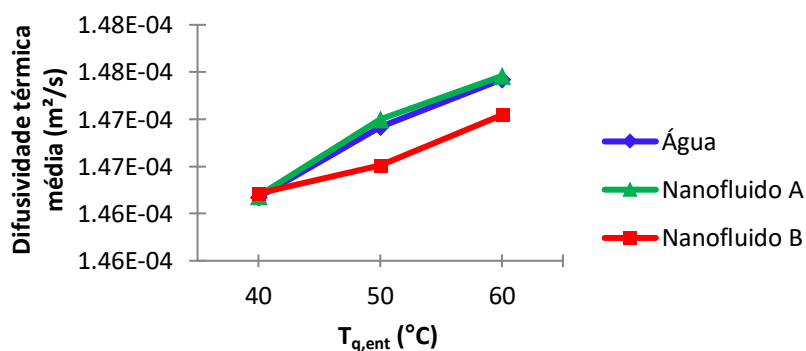
**Gráfico 30 - Calor específico à pressão constante médio dos fluidos frios**



Fonte: Autoria própria

A difusividade térmica, propriedade específica de cada material, indica a rapidez com a qual o calor se difunde através deste. Por estar relacionada à condutividade térmica ( $k$ ) do material, apresentou comportamento similar a  $k$  com o aumento de  $T_{q,ent}$  uma vez que o  $c_p$  não variou. O aumento da fração volumétrica (Nanofluido B) não causou incremento na difusividade térmica como se esperava, mas pelo contrário, diminuiu-a.

**Gráfico 31 - Difusividade térmica média dos fluidos frios**



Fonte: Autoria própria

Percebe-se que o aumento da temperatura de entrada do fluido quente intensificou a difusividade térmica, e causou diminuição na viscosidade dos fluidos;

dessa forma promoveu-se incremento na efetividade do trocador de calor, como foi visto no Gráfico 23.

#### 4.3.1 Comparação com Resultados Disponíveis na Literatura

Escoamentos em convecção forçada dependem dos números de Reynolds e de Prandtl, além destes, tratando-se de nanofluidos, parâmetros adicionais tais como condutividade térmica das nanopartículas e do fluido-base, temperatura, fração volumétrica das nanopartículas suspensas, seu formato e dimensões, afetam o seu coeficiente de transferência de calor (KAKAÇ; YENER; PRAMUANJAROENKIJ, 2014, p. 529).

Quanto à condutividade térmica ( $k$ ) do nanofluido de ouro (AuNF), a Tabela 12 apresenta os resultados do aumento de  $k$  em relação ao fluido-base, de acordo com o trabalho de diversos autores.

**Tabela 12 - Condutividade térmica ( $k$ ) de AuNF em relação ao fluido-base conforme a literatura**

Autor	Fluido-base	$\Phi$ (% volume)	$d_{np}$ (nm)	Aumento de $k$ (%)
Patel et al. (2003)	Água	0,00013; 0,00026	10 – 20	8,3
Patel et al. (2003)	Tolueno	0,011	3 – 4	14
Zhang et al. (2007)	Tolueno	0,003	1,65	0
Jana et al. (2007)	Água	1,4	15	37
Buongiorno et al. (2009)	Água	0,001	10	0,7
Kim et al. (2009)	Água	0,018	7,1 – 12,1	9,3
Shalkevich et al. (2010)	Água	0,00055	17	1,4
Paul et al. (2010)	Água	0,00026	21	48
Costa (2012)	Água	0,000204	70	16
Moreira et al. (2013)	Água	0,000204	70,82	15,7

**Fonte: Autoria própria**

A discrepância entre resultados de aumento da condutividade térmica do AuNF, em comparação ao seu fluido-base, pode ser atribuída ao método utilizado na síntese das nanopartículas (PAUL; PAL; MANNA, 2010). A respeito da condutividade térmica dos nanofluidos, em geral esta sofre um incremento com a elevação da temperatura e com a elevação da fração volumétrica das nanopartículas (FLORES, 2016; RAVISANKAR; VENKATACHALAPATHY; ALAGUMURTHI, 2017). No presente estudo, os resultados referentes ao NF<sub>A</sub> estão em concordância com Zhang et al. (2007), já que não houve diferença substancial entre  $k$  do AuNF e do fluido-base;

esses autores utilizaram o método do fio quente transiente para a medição de  $k$ , cujo valor medido mostrou-se condizente com o valor que calcularam a partir do modelo de Hamilton e Crosser para partículas esféricas. No caso do NF<sub>B</sub> houve um pequeno decremento de 0,23% de  $k$  em relação ao fluido-base, às temperaturas mais elevadas; por se tratar do nanofluido mais concentrado, contém uma quantidade maior de surfactante; um problema bastante conhecido é a degradação irreversível dos surfactantes a temperaturas relativamente baixas; em geral, degradam-se consideravelmente a partir de 60°C, o que pode ser considerada uma limitação em transferência de calor, e que pode ter causado este comportamento de  $k$  (TAYLOR et al., 2013). Ou ainda, pode-se atribuir este decremento de  $k$  a aglomerações de nanopartículas, que podem resultar em sedimentação, afetando a condutividade térmica do nanofluido (KAKAÇ; YENER; PRAMUANJAROENKIJ, 2014, p. 524).

Incrementos na condutividade térmica (vistos na Tabela 12) não garantem necessariamente vantagens em aplicações práticas, como no caso do estudo de Flores (2016), que comparou nanofluidos de grafeno em uma mistura de água e etileno glicol (70:30% em volume) ao fluido-base; os nanofluidos apresentaram incremento da condutividade térmica com o aumento da concentração de nanopartículas de grafeno e da temperatura (6,01%, 7,07% e 10,46% para as amostras com  $\phi = 0,05\%$ ,  $\phi = 0,10\%$  e  $\phi = 0,15\%$ , respectivamente) à temperatura de 30°C. Apesar disto, e do baixo incremento da viscosidade dinâmica, houve redução do coeficiente de transferência de calor por convecção (de até 26%) ao se utilizar nanofluidos, o que foi atribuído à degradação dos nanofluidos causada pela sedimentação das nanopartículas. Oliveira (2016) realizou testes utilizando 8 nanofluidos com diferentes concentrações (4 de nanotubos de carbono de paredes múltiplas e 4 de grafeno) em 2 radiadores automotivos e verificou que em alguns casos os nanofluidos mostraram desempenho inferior ao fluido-base (água, etileno glicol, e uma mistura destes). No radiador 1, o nanofluido de nanotubos de carbono em água com concentração mássica de 0,16% apresentou a maior queda em  $\dot{q}$  (22%) em relação ao fluido-base; percebeu-se diminuição no desempenho do nanofluido com o aumento da concentração de nanopartículas. No radiador 2, nos experimentos à temperatura de entrada igual a 50°C e 60°C, os nanofluidos de nanotubos de carbono em 30% de etileno glicol e de grafeno em fluido-base similar, propiciaram incremento em  $\dot{q}$ . Porém, à temperatura de entrada igual a 70°C e 80°C, os nanofluidos mostraram desempenho inferior ao fluido-base. Em geral, os nanofluidos apresentaram

desempenhos inferiores ao fluido-base em temperaturas mais elevadas. Os nanofluidos de nanotubos de carbono apresentaram um valor de concentração mássica (0,2%) a partir do qual houve queda no desempenho.

Murian et al. (2017) compararam as características de transferência de calor de nanofluidos de ouro e de prata, sintetizados por ablação a laser, tendo água como fluido-base, ambos em frações volumétricas iguais a 0,015, 0,045 e 0,0667%, em escoamento laminar. À maior fração volumétrica o nanofluido de ouro apresentou incremento de 29% no coeficiente de transferência de calor por convecção ( $h$ ) em relação ao fluido-base, e o de prata 20%.

Quanto à viscosidade dinâmica ( $\mu$ ), esta tende a aumentar com a elevação da concentração de nanopartículas (AMINI et al., 2019; KHODADADI; TOGHRAIE; KARIMIPOUR, 2019). No presente trabalho foram observados incrementos de 2,2% na viscosidade dinâmica do NF<sub>B</sub> (Gráfico 28) em relação ao fluido-base, às temperaturas de entrada iguais a 50°C e 60°C. Lu, Duan e Wang (2014) realizaram uma simulação molecular com nanofluido de ouro em água, para estudar os mecanismos microscópicos que expliquem as alterações na viscosidade do nanofluido causadas pela presença das nanopartículas, e concluíram que o incremento na viscosidade se deve à camada de água até 5 vezes mais densa ao redor das nanopartículas do que no restante do fluido-base, que aumenta o diâmetro das nanopartículas, dificultando a sua mobilidade. No caso do NF<sub>A</sub> não foi percebida diferença na viscosidade dinâmica em relação ao fluido-base. Oliveira (2012) comenta que a maioria dos modelos baseados na proposição de Einstein (Equação 5) pode ser insatisfatória, pois não consideram a massa específica das nanopartículas no cálculo da viscosidade dos nanofluidos; contudo, Flores (2016) relata que os modelos teóricos utilizados para calcular a massa específica, a viscosidade dinâmica e a condutividade térmica de nanofluidos de grafeno em etileno glicol e água apresentaram uma boa concordância com seus resultados de medições experimentais. Salienta-se que modelos teóricos possibilitam uma importante redução de custos em pesquisas experimentais.

Há escassez de estudos na literatura que reportem aplicações de AuNF em transferência de calor; a Tabela 13 apresenta resultados de efetividade com outros nanofluidos, em diferentes tipos de trocadores de calor.

**Tabela 13 - Efetividade de diferentes tipos de trocadores de calor conforme a literatura**

<b>Autor</b>	<b>Tipo de trocador de calor</b>	<b>Nanofluido</b>	<b>Concentração</b>	<b>Aumento na efetividade</b>
Ali et al. (2014)	Radiador automotivo	Alumina/água	1% volume	9,5%
Godson et al. (2014)	Casco e tubo	Prata/água	0,4% volume	6,14%
Sarafraz et al. (2016)	Tubos concêntricos	Nanotubo de carbono/água	0,1 – 0,3% massa	44%
Goodarzi et al. (2016)	Tubos concêntricos	Grafeno dopado com nitrogênio/solução aquosa	0,01; 0,02; 0,04; 0,06% massa	16,2%
Shahrul et al. (2016)	TCCTH	ZnO/água	0,3% volume	45%
Shahrul et al. (2016)	TCCTH	Alumina/água	0,5% volume	37%
Shahrul et al. (2016)	TCCTH	SiO <sub>2</sub>	0,5% volume	17%
El-Maghlany et al. (2016)	Tubo duplo	Cobre/água	1 – 3% volume	16,5%
AbdElhafez et al. (2017)	Micro trocador de calor	Grafeno/água	0,1% massa	27,3%
Bhattad et al. (2018)	De placas	Alumina+Nanotubo de carbono/água	0,01; 0,02; 0,03% volume	37%

**Fonte: Autoria própria**

No presente estudo observou-se um incremento de 3,4% com a fração volumétrica igual a  $1,63 \times 10^{-5}\%$ , enquanto percebem-se incrementos de 6,14 a 45% na efetividade dos trocadores de calor mencionados na Tabela 13; entretanto, as concentrações de nanopartículas são, em alguns casos, várias ordens de grandeza superiores às concentrações utilizadas no presente trabalho. Concentrações maiores tornam-se impraticáveis no caso do AuNF; Patel et al. (2003) afirmam que a maior fração volumétrica de nanopartículas de ouro em água possível que obtiveram foi 0,00026% pois em concentrações maiores as nanopartículas se aglomeram.

Outro fator a ser considerado é o custo referente à produção e caracterização do AuNF. Beicker (2016), analisou experimentalmente a conversão fototérmica em coletores solares, comparando AuNF e nanofluido de nanotubos de carbono; embora se esperasse um desempenho superior do AuNF devido ao fenômeno de Ressonância Plasmônica, o custo elevado da produção de nanopartículas de ouro e a degradação das amostras percebida após exposição à radiação solar, mostraram

que a dispersão de nanotubos de carbono em água foi mais viável em conversão fototérmica.

#### 4.3.2 Razão entre as Variações de Viscosidade e Condutividade Térmica

O número de Reynolds crítico ( $R_{cr}$ ), dado pela Equação 20  $\{R_{cr} = 2300 [1 + 12 (d_{e,t} / d_{e,b})^{0,5}]\}$  no caso de tubos helicoidais, indica a transição do regime de escoamento laminar para turbulento. No presente trabalho o seu resultado foi 12543, portanto verificou-se somente escoamento em regime laminar para ambos os fluidos (quente e frio), já que todos os números de Reynolds foram menores que  $R_{cr}$ , e variaram entre 213 e 592 no caso do fluido quente, e entre 1852 e 4114 no caso dos fluidos frios. A Tabela B.1, no Apêndice B, apresenta todas as faixas de números de Reynolds para cada condição operacional.

Em regime laminar, justifica-se utilizar nanofluido em comparação ao seu fluido-base se a razão do aumento da viscosidade ( $C_\mu$ ) e do aumento da condutividade térmica ( $C_k$ ) destes (Equação 17) for menor do que 4. A Tabela 14 apresenta os valores desta razão para cada nanofluido, em função da temperatura de entrada do fluido quente ( $T_{q,ent}$ ).

**Tabela 14 - Razão entre variações de viscosidade e condutividade térmica dos nanofluidos em relação ao fluido-base**

$T_{q,ent}$	$[(\mu_{nf} - \mu_{fb}) / \mu_{fb}] / [(k_{nf} - k_{fb}) / k_{fb}]$	
	$NF_A$	$NF_B$
<b>40°C</b>	8,76	-0,04
<b>50°C</b>	-4,99	-9,68
<b>60°C</b>	-0,22	-9,85

**Fonte: Autoria própria**

No caso do  $NF_A$ , à  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$  o nanofluido mostrou-se inviável devido ao elevado valor de  $C_\mu / C_k$ ; à  $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$  e  $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$  este valor foi negativo pois a viscosidade no nanofluido foi menor que a do fluido-base, e condutividade térmica maior, o que justificaria o emprego do nanofluido. No caso do  $NF_B$  à  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$  o valor de  $C_\mu / C_k$  foi negativo pois a viscosidade no nanofluido foi menor que a do fluido-base, e condutividade térmica maior, o que justificaria o emprego do nanofluido, enquanto que à  $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$  e  $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$  o nanofluido apresentou condutividade térmica inferior ao fluido-base.

No entanto, este não é o único indicador da viabilidade do emprego de um nanofluido como líquido de arrefecimento, sendo necessário também que este apresente um desempenho térmico superior em relação ao seu fluido-base; no presente estudo esta avaliação foi realizada por meio dos resultados de efetividade do TCCTH apresentados nas Seções 4.2.1 e 4.2.2.

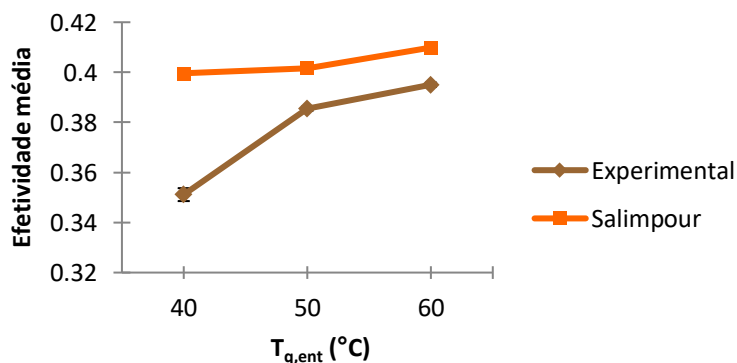
#### 4.4 INFLUÊNCIA DO DIÂMETRO HIDRÁULICO NA EFETIVIDADE CALCULADA

Compararam-se os resultados de taxa de transferência de calor ( $\dot{q}$ ), obtidos a partir dos diâmetros hidráulicos ( $D_{hid}$ ) dados pelas Equações 44 [ $D_{hid} = (D_{i,c}^2 - \pi d_{e,b} d_{e,t}^2 \gamma^{-1}) / (D_{i,c} + \pi d_{e,b} d_{e,t} \gamma^{-1})$ ], 45 [ $D_{hid} = [4 (V_c - V_t) / (L_{i,c} - L_t)] / [\pi (D_{i,c} + d_{e,t})]$ ] e 48 ( $D_{hid} = D_{e,a} - D_{i,a}$ ), referentes às proposições de Salimpour (2009), Jamshidi et al. (2013) e Incropera et al. (2011), respectivamente, com  $\dot{q}$  observada experimentalmente.

Verificou-se que o  $D_{hid}$  proposto por Salimpour (2009) resultou em valores de  $\dot{q}$  que mais se aproximaram dos resultados experimentais, seguido por Incropera et al. (2011), e por último por Jamshidi et al. (2013), como é mostrado no Apêndice D.

À vazão igual a 40 L/h, e número de Reynolds médio igual a 4018, obteve-se o menor erro entre os resultados de Salimpour (2009) e os experimentais, para todos os fluidos frios; assim, o Gráfico 32 exhibe os valores da efetividade média nesta vazão, e se observa que na  $T_{q,ent}$  igual a 60°C o modelo de Salimpour (2009) melhor se ajusta, sendo o erro igual a 3,8%. À  $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$  o erro foi de 4,2% e à  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$  foi de 13,8%.

**Gráfico 32 – Comparação entre efetividades experimental e calculada pelo modelo de Salimpour (2009)**



Fonte: Autoria própria



Embora o trocador de calor utilizado no presente estudo tenha um cilindro de sustentação em sentido longitudinal que permite a passagem do fluido no casco apenas pelo espaço anular externo à bobina, o modelo de Salimpour (2009), para TCCTH é considerado relativamente adequado; e indicam-se dessa forma, as melhores condições operacionais para trabalhos futuros que visem a determinação de parâmetros de rendimento do TCCTH, especificamente fornecidos por este modelo.

## 5 CONCLUSÕES E SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS

Os testes experimentais realizados com nanofluidos de ouro mostraram que, em um TCCTH, a vazão volumétrica dos fluidos envolvidos e a temperatura de entrada do fluido quente ainda controlam a efetividade do trocador de calor. Como esperado, incrementos na efetividade foram percebidos com a diminuição da vazão e com o aumento da temperatura.

A análise fatorial multiníveis mostrou, no caso do Nanofluido A (com fração volumétrica de nanopartículas de ouro igual a  $1,63 \times 10^{-5}\%$ ), que o aumento do nível da fração volumétrica das nanopartículas produziu um incremento de 3,4% na efetividade média; o aumento dos níveis da temperatura de entrada do fluido quente produziu um incremento de 6,3% na efetividade média; enquanto o aumento dos níveis da vazão dos fluidos produziu um decréscimo de 10,6% na efetividade média.

A análise fatorial multiníveis, no caso do Nanofluido B (com fração volumétrica de nanopartículas de ouro igual a  $6,53 \times 10^{-5}\%$ ), mostrou que o aumento dos níveis da temperatura de entrada do fluido quente produziu um incremento de 11,6% na efetividade média, enquanto o aumento dos níveis da vazão dos fluidos produziu um decréscimo de 13,2% na efetividade média. O efeito da fração volumétrica não se mostrou significativo, uma vez que no gráfico de Pareto (Gráfico 13) este fator situou-se acima de 5% de significância estatística ( $p > 0,05$ ).

Embora o Nanofluido A (com menor fração volumétrica) tenha apresentado uma efetividade média 3,4% superior em relação ao fluido-base (água), como pode ser observado por meio da Tabela 14, não atendeu à Equação 17, cujo critério é de que a razão entre a variação da viscosidade dinâmica e a variação da condutividade térmica do nanofluido, em relação ao fluido-base seja menor que 4, e que avalia a viabilidade de nanofluidos como líquidos de arrefecimento. No caso do Nanofluido B, apenas à  $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$  o resultado da Equação 17 justificaria a sua utilização como líquido de arrefecimento, já que a viscosidade do nanofluido foi menor que a do fluido-base, e a condutividade térmica maior; nas demais temperaturas de entrada do fluido quente o Nanofluido B apresentou condutividade térmica inferior à do fluido-base, o que pode ter prejudicado o seu desempenho na transferência de calor.

A respeito da comparação dos resultados obtidos a partir dos diâmetros hidráulicos ( $D_{hid}$ ) dados pelas Equações 44, 45 e 48, referentes às proposições de Salimpour (2009), Jamshidi et al. (2013) e Incropera et al. (2011), respectivamente,

com os resultados experimentais, verificou-se que o  $D_{hid}$  proposto por Salimpour (2009) apresentou resultados que mais se aproximaram dos valores experimentais, seguido por Incropera et al. (2011), e por último por Jamshidi et al. (2013), como pode ser observado no Apêndice D. O menor erro entre a efetividade média calculada e a experimental, igual a 3,8%, foi à vazão volumétrica de 40 L/h, cujo número de Reynolds médio foi de 4018, e temperatura de entrada do fluido quente igual a 60°C.

Apesar de o nanofluido de ouro utilizado no presente estudo apresentar incremento na efetividade em relação ao seu fluido-base (água) comparável a resultados existentes na literatura, não se justificou o custo de produção e caracterização das nanopartículas de ouro. Contudo, a análise aqui realizada contribuiu na ampliação de conhecimento sobre o uso de um nanofluido escassamente explorado como líquido de arrefecimento em trocadores de calor.

Para trabalhos futuros sugere-se medir as propriedades termofísicas dos nanofluidos de ouro e comparar os resultados com os valores obtidos por meio das equações que constam da metodologia do presente trabalho; utilizar outros nanofluidos, como por exemplo, de alumina em água, para que seja possível aumentar a fração volumétrica das nanopartículas em suspensão; empregar nanofluidos de alumina em água como líquido de arrefecimento no casco do trocador e também no tubo helicoidal, e comparar os resultados; realizar testes de transferência de calor em outras vazões volumétricas dos fluidos e outras temperaturas de entrada do fluido quente; e variar as vazões volumétricas dos fluidos quente e frio ao invés de mantê-las iguais para ambos os fluidos, como foi realizado no presente trabalho. Ressalta-se a importância do descarte adequado dos nanofluidos, tendo-se em vista sua toxicidade.

## REFERÊNCIAS

- ABDELHAFEZ, S. E.; ABO-ZAHHAD, E. M.; EL-SHAZLY, A. H.; EL-KADY, M. F. Experimental investigate of heat transfer for graphene/water nanofluid in micro heat exchanger. **AIP Conference Proceedings 1814**, 020014, 2017.
- ABDELRAZEK, A. H.; ALAWI, O. A.; KAZI, S. N.; YOSOFF, N.; CHOWDHURY, Z.; SARHAN, A. A. D. A new approach to evaluate the impact of thermophysical properties of nanofluids on heat transfer and pressure drop. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2018, v. 95, p. 161-170.
- AGUNLOYE, E.; GAVRIILIDIS, A.; MAZZEI, L. A mathematical investigation of the Turkevich organizer theory in the citrate method for the synthesis of gold nanoparticles. **Chemical Engineering Science**, 2017, v. 173, p. 275-286.
- AHMADI, M. H.; MIRLOHI, A.; NAZARI, M. A.; GHASEMPOUR, R. A review of thermal conductivity of various nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, 2018, v. 265, p. 181-188.
- 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**, 2014, v. 6, p. 1-13.
- ALI, N.; TEIXEIRA, J. A.; ADDALI, A. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. **Journal of Nanomaterials**, 2018, p. 1-33.
- ALIABADI, M. K.; PAZDAR, S.; SARTIPZADEH, O. Experimental investigation of water based nanofluid containing copper nanoparticles across helical microtubes. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2016, v. 70, p.84-92.
- ALIMORADI, A. Investigation of exergy efficiency in shell and helically coiled tube heat exchangers. **Case Studies in Thermal Engineering**, 2017a, v. 10, p. 1-8.
- ALIMORADI, A. Study of thermal effectiveness and its relation with NTU in shell and helically coiled tube heat exchangers. **Case Studies in Thermal Engineering**, 2017b, v. 9, p. 100-107.
- ALJEHANI, A.; RAZACK, S. A. K.; NITSCHKE, L.; HALLAJ, S. A. Design and optimization of a hybrid air conditioning system with thermal energy storage using phase change composite. **Energy Conversion and Management**, 2018, v. 169, p. 404-418.
- ALSARRAF, J.; MORADIKAZEROUNI, A.; SHAHSAVAR, A.; AFRAND, M.; SALEHIPOUR, H.; TRAN, M. D. Hydrothermal analysis of turbulent boehmite alumina nanofluid flow with different nanoparticle shapes in a minichannel heat exchanger using two-phase mixture model. **Physica A**, 2019, v. 520, p. 275-288.

AMINI, F.; MIRY, S. Z.; KARIMI, A.; ASHJAEI, M. Experimental investigation of thermal conductivity and viscosity of  $\text{SiO}_2$ /multiwalled carbon nanotube hybrid nanofluids. **Journal of Nanoscience and Nanotechnology**, 2019, v. 19, n. 6, p. 3398-3407.

BABU, J. A. R.; KUMAR, K. K.; RAO, S. S. State-of-art review on hybrid nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 77, p. 551-565.

BAHIRAEI, M.; HESHMATIAN, S. Electronics cooling with nanofluids: A critical review. **Energy Conversion and Management**, 2018, v. 172, p. 438-456.

BAHIRAEI, M.; SALMI, H. K.; SAFAEI, M. R. Effect of employing a new biological nanofluid containing functionalized graphene nanoplatelets on thermal and hydraulic characteristics of a spiral heat exchanger. **Energy Conversion and Management**, 2019, v. 180, p. 72-82.

BAHREHMAND, S.; ABBASSI, A. Heat transfer and performance analysis of nanofluid flow in helically coiled tube heat exchangers. **Chemical Engineering Research and Design**, 2016, v. 108, p. 628-637.

BAIT, O.; AMEUR, M. S. Enhanced heat and mass transfer in solar stills using nanofluids: A review. **Solar Energy**, 2018, v. 170, p. 694-722.

BARROS, J. J. C.; COIRA, M. L.; LÓPEZ, M. P. C.; GOCHI, A. C. Sustainability optimisation of shell and tube heat exchanger, using a new integrated methodology. **Journal of Cleaner Production**, 2019, v. 200, p. 552-567.

BARROS NETO, B.; SCARMINIO, I. S.; BRUNS, R. E. **Como fazer experimentos: pesquisa e desenvolvimento na ciência e na indústria**. 4. ed. Campinas, SP: Editora da Unicamp, 2010.

BATCHELOR, G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **Journal of Fluid Mechanics**, 1977, v. 83, p. 97-117.

BEHABADI, M. A. A.; PAKDAMAN, M. F.; GHAZVINI, M. Experimental investigation on the convective heat transfer of nanofluid flow inside vertical helically coiled tubes under uniform wall temperature condition. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2012, v. 39, p. 556-564.

BEICKER, C. L. L. **Análise experimental da conversão fototérmica em nanofluidos de ouro e nanotubos de carbono em água**. 2016. 118 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2016.

BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentals of heat and mass transfer**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2017.

BHANVASE, B. A.; SAYANKAR, S. D.; KAPRE, A.; FULE, P. J.; SONAWANE, S. H. Experimental investigation on intensified convective heat transfer coefficient of water based PANI nanofluid in vertical helical coiled heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, 2018, v. 128, p. 134-140.

BHATTAD, A.; SARKAR, J.; GHOSH, P. Discrete phase numerical model and experimental study of hybrid nanofluid heat transfer and pressure drop in plate heat exchanger. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2018, v. 91, p. 262-273.

BIGLARIAN, M.; GORJI, M. R.; POURMEHRAN, O.; DOMAIRRY, G. H<sub>2</sub>O based different nanofluids with unsteady condition and an external magnetic field on permeable channel heat transfer. **International Journal of Hydrogen Energy**, 2017, v. 42, n. 34, p. 22005-22014.

BILIUTA, G.; COSERI, S. Cellulose: A ubiquitous platform for ecofriendly metal nanoparticles preparation. **Coordination Chemistry Reviews**, 2019, v. 383, p. 155-173.

BUONGIORNO, J.; VENERUS, D. C.; PRABHAT, N.; McKRELL, T.; TOWNSEND, J.; CHRISTIANSON, R.; TOLMACHEV, Y. V. et al. A benchmark study on the thermal conductivity of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, 2009, v. 106, p. 1-14.

BUSCHMANN, M. H.; AZIZIAN, R.; KEMPE, T.; JULIÁ, J. E.; CUENCA, R. M.; SUNDÉN, B.; WU, Z.; SEPPÄLÄ, A.; NISSILA, T. A. Correct interpretation of nanofluid convective heat transfer. **International Journal of Thermal Sciences**, 2018, v. 129, p. 504-531.

CAI, R.; YANG, D.; LIN, K. T.; LYU, Y.; ZHU, B.; HE, Z.; ZHANG, L.; KITAMURA, Y.; QIU, L.; CHEN, X.; ZHAO, Y.; CHEN, Z.; TAN, W. Generalized preparation of two-dimensional quasi-nanosheets via self-assembly of nanoparticles. **Journal of the American Chemical Society**, 2019, v. 141, p. 1725-1734.

CECCO, G. M. **Avaliação do comportamento do coeficiente global de um trocador de calor tipo serpentina em função dos parâmetros operacionais**. 2017. 74 f. Projeto de Graduação (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2017.

CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles. In: International Mechanical Engineering Congress and Exhibition. **Annals of International Mechanical Engineering Congress and Exhibition**, San Francisco: 1995, p. 99-105.

CIPOLLONI, G.; PELLIZZARI, M.; MOLINARI, A.; HEBDA, M.; ZADRA, M. Contamination during the high-energy milling of atomized copper powder and its effects on spark plasma sintering. **Powder Technology**, 2015, p. 51-59.

CORCIONE, M. Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls. **International Journal of Thermal Sciences**, 2010, v. 49, p. 1536-1546.

COSTA, L. M. M. R. **Influência de materiais nanoestruturados no transporte térmico em meio líquido**. 2012. 120 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Física, Universidade Federal de Juiz de Fora. Juiz de Fora, 2012.

DAS, P. K. A review based on the effect and mechanism of thermal conductivity of normal nanofluids and hybrid nanofluids. **Journal of Molecular Liquids**, 2017, v. 240, p. 420-446.

DEVENDIRAN, D. K.; AMIRTHAM, V. A. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2016, v. 60, p. 21-40.

DIGLIO, G.; ROSELLI, C.; SASSO, M.; CHANNABASAPPA, U. J. Borehole heat exchanger with nanofluids as heat carrier. **Geothermics**, 2018, v. 72, p. 112-123.

EINSTEIN, A. A new determination of molecular dimensions. **Annals of Physics**, 1906, v. 19, p. 289-306.

EL-MAGHLANY, W. M.; HANAFY, A. A.; HASSAN, A. A.; ELMAGID, M. A. Experimental study of Cu–water nanofluid heat transfer and pressure drop in a horizontal double-tube heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2016, v. 78, p. 100-111.

ELSHAZLY, K. M.; SAKR, R. Y.; ALI, R. K.; SALEM, M. R. Effect of  $\gamma$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid on the thermal performance of shell and coil heat exchanger with different coil torsions. **Heat Mass Transfer**, 2017, v. 53, p. 1893-1903.

ETGHANI, M. M.; BABOLI, S. A. H. Numerical investigation and optimization of heat transfer and exergy loss in shell and helical tube heat exchanger. **Applied Thermal Engineering**, 2017, v. 121, p. 294-301.

FERREIRA, T. P. A. **Projeto e construção de um trocador de calor: uso de nanofluidos (nanopartículas de ouro em fluido-base) como líquido de arrefecimento**. 2015. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Ponta Grossa, 2015.

FLORES, M. C. **Investigação experimental das propriedades termofísicas e da convecção forçada de nanofluido de grafeno**. 2016. 158 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2016.

FOX, R. W.; McDONALD, A. T. **Introdução à mecânica dos fluidos**. 5. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2001.

FRAGELLI, R. L.; SANCHEZ, L. E. A.; INGRACI NETO, R. R.; SCALON, V. L. Refrigeration capacity of silver nanofluids under electrohydrodynamic effect oriented to heat removal in machining process. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2018, v. 96, p. 11-19.

FRANK, M.; DRIKAKIS, D. Solid-like heat transfer in confined liquids. **Microfluidics and Nanofluidics**, 2017, v. 21, n. 9, p. 1-6.

GANVIR, R. B.; WALKE, P. V.; KRIPLANI, V. M. Heat transfer characteristics in nanofluid - a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 75, p. 451-460.

GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. 4. ed. São Paulo: Atlas, 2002.

GODSON, L.; DEEPAK, K.; ENOCH, C.; JEFFERSON, B.; RAJA, B. Heat transfer characteristics of silver/water nanofluids in a shell and tube heat exchanger. **Archives of Civil And Mechanical Engineering**, 2014, v. 14, n. 3, p. 489-496.

GOODARZI, M.; KHERBEET, A. S.; AFRAND, M.; SADEGHINEZHAD, E.; MEHRALI, M.; ZAHEDI, P.; WONGWISES, S.; DAHARI, M. Investigation of heat transfer performance and friction factor of a counter-flow double-pipe heat exchanger using nitrogen-doped, graphene-based nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2016, v. 76, p. 16-23.

GUO, W.; LI, G.; ZHENG, Y.; DONG, C. Measurement of the thermal conductivity of SiO<sub>2</sub> nanofluids with an optimized transient hot wire method. **Thermochimica Acta**, 2018, v. 661, p. 84-97.

GUPTA, M.; SINGH, V.; KUMAR, R.; SAID, Z. A review on thermophysical properties of nanofluids and heat transfer applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 74, p. 638-670.

HALELFADL, S.; MARÉ, T.; ESTELLÉ, P. Efficiency of carbon nanotubes water based nanofluids as coolants. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2014, v. 53, p. 104-110.

HASHEMI, S. M.; BEHABADI, M. A. A. An empirical study on heat transfer and pressure drop characteristics of CuO-base oil nanofluid flow in a horizontal helically coiled tube under constant heat flux. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2012, v. 39, p. 144-151.

HUSSEIN, A. M.; KADIRGAMA, K.; NOOR, M. M. Nanoparticles suspended in ethylene glycol thermal properties and applications: an overview. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 69, p. 1324-1330.

HUSSIEN, A. A.; ABDULLAH, M. Z.; AL-NIMR, M. A. Single-phase heat transfer enhancement in micro/minichannels using nanofluids: theory and applications. **Applied Energy**, 2016, v. 164, p. 733-755.

INCROPERA, F. P.; DEWITT, D. P.; BERGMAN, T. L.; LAVINE, A. S. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.

JAMSHIDI, N.; FARHADI, M.; GANJI, D. D.; SEDIGHI, K. Experimental analysis of heat transfer enhancement in shell and helical tube heat exchangers. **Applied Thermal Engineering**, 2013, v. 51, p. 644-652.

JANA, S.; KHOJIN, A. S.; ZHONG, W. H. Enhancement of fluid thermal conductivity by the addition of single and hybrid nano-additives. **Thermochim Acta**, 2007, v. 462, p. 45-55.

JEEVANANDAM, J.; BARHOUM, A.; CHAN, Y. S.; DUFRESNE, A.; DANQUAH, M. K. Review on nanoparticles and nanostructured materials: history, sources, toxicity and regulations. **Beilstein Journal of Nanotechnology**, 2018, v. 9, p. 1050-1074.



KAKAÇ, S.; LIU, H.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design**. 3 ed. Boca Raton, US: CRC Press, 2012.

KAKAÇ, S.; PRAMUANJAROENKIJ, A. Single-phase and two-phase treatments of convective heat transfer enhancement with nanofluids – a state-of-the-art review. **International Journal of Thermal Sciences**, 2016, v. 100, p. 75-97.

KAKAÇ, S.; YENER, Y.; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Convective Heat Transfer**. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2014.

KALYONCU, G.; BARISIK, M. Analytical solution of micro-/nanoscale convective liquid flows in tubes and slits. **Microfluidics and Nanofluidics**, 2017, v. 21, n. 9, p.1-22.

KHODADADI, H.; TOGHRAIE, D.; KARIMIPOUR, A. Effects of nanoparticles to present a statistical model for the viscosity of MgO-Water nanofluid. **Powder Technology**, 2019, v. 342, p. 166-180.

KIM, H. J.; BANG, I. C.; ONOE, J. Characteristic stability of bare Au-water nanofluids fabricated by pulsed laser ablation in liquids. **Optics and Lasers in Engineering**, 2009, v. 47, p. 532-538.

KIM, S.; SONG, H.; YU, K.; TSERENGOMBO, B.; CHOI, S. H.; CHUNG, H.; KIM, J.; JEONG, H. Comparison of CFD simulations to experiment for heat transfer characteristics with aqueous Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid in heat exchanger tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 2018, v. 95, p. 123-131.

KITTEL, C. **Introdução à Física do Estado Sólido**. 5. ed. Guanabara Dois: Rio de Janeiro, 1978.

KOCA, H. D.; DOGANAY, S.; TURGUT, A.; TAVMAN, I. H.; SAIDUR, R.; MAHBUBUL, I. M. Effect of particle size on the viscosity of nanofluids: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2018, v. 82, p. 1664-1674.

KOO, J.; KLEINSTREUER, C. A new thermal conductivity model for nanofluids. **Journal of Nanoparticle Research**, 2004, v. 6, p. 577-88.

KUMAR, P. C. M.; KUMAR, J.; TAMILARASAN, R.; NATHAN, S. S.; SURESH, S. Heat transfer enhancement and pressure drop analysis in a helically coiled tube using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water nanofluid. **Journal of Mechanical Science and Technology**, 2014, v. 28, n. 5, p. 1841-1847.

LAMER, V. K.; DINEGAR, R. H. Theory, production and mechanism of formation of monodispersed hydrosols. **Journal of the American Chemical Society**, 1950, v. 72, n. 11, p. 4847-4854.

LAUKKANEN, T.; SEPPÄLÄ, A. Interplant heat exchanger network synthesis using nanofluids for interplant heat exchange. **Applied Thermal Engineering**, 2018, v. 135, p. 133-144.

LEE, Y. S. **Self-assembly and nanotechnology: a force balance approach**. New Jersey: John Wiley & Sons, 2008.

LEE, Y. S. **Self-assembly and nanotechnology systems**: design, characterization, and applications. New Jersey: John Wiley & Sons, 2012.

LUNGU, M.; NECULAE, A.; BUNOIU, M.; BIRIS, C. (Eds.). **Nanoparticles' promises and risks**: characterization, manipulation, and potential hazards to humanity and the environment. New York: Springer, 2015.

LU, G.; DUAN, Y. Y.; WANG, X. D. Surface tension, viscosity, and rheology of water-based nanofluids: a microscopic interpretation on the molecular level. **Journal of Nanoparticle Research**, 2014, v. 16, p. 1-11.

MA, Y.; JIANG, W.; XU, Y.; ZHANG, Y. Multisegmented metallic nanorods: sub-10 nm growth, nanoscale manipulation, and subwavelength imaging. **Advanced Materials**, 2019, p. 1-6.

MAHMOUDI, M.; TAVAKOLI, M. R.; MIRSOLEIMANI, M. A.; GHOLAMI, A.; SALIMPOUR, M. R. Experimental and numerical investigation on forced convection heat transfer and pressure drop in helically coiled pipes using TiO<sub>2</sub>/water nanofluid. **International Journal of Refrigeration**, 2017, v. 74, p. 627-643.

MAXWELL, J. C. **A treatise on electricity and magnetism**. Oxford: Clarendon press, 1881.

MINEA, A. A. Hybrid nanofluids based on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiO<sub>2</sub> and SiO<sub>2</sub>: numerical evaluation of different approaches. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2017, v. 104, p. 852-860.

MOHAMMED, H. A.; AL-ASWADI, A. A.; SHUAIB, N. H.; SAIDUR, R. Convective heat transfer and fluid flow study over a step using nanofluids: a review. **Renew Sustain Energy**, 2011, v. 15, p. 2921–2939.

MONTGOMERY, D. C. **Design and Analysis of Experiments**. 8. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2012.

MOREIRA, L. M.; CARVALHO, E. A.; BELL, M. J. V.; ANJOS, V.; SANT'ANA, A. C.; ALVES, A. P. P.; FRAGNEAUD, B.; SENA, L. A.; ARCHANJO, B. S.; ACHETE, C. A. Thermo-optical properties of silver and gold nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2013, v. 114, p. 557-564.

MOTEVASEL, M.; NAZAR, A. R. S.; JAMIALAHMADI, M. The effect of nanoparticles aggregation on the thermal conductivity of nanofluids at very low concentrations: Experimental and theoretical evaluations. **Heat Mass Transfer**, 2018, v. 54, p. 125-133.

MOTTA, F. C. **Caracterização da condutividade térmica, viscosidade dinâmica e ângulo de contato de nanofluidos-baseados em partículas de alumina-gama em água**. 2012. 104 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências em Engenharia Mecânica, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2012.

MURIAN, H.; RAMZAN, N.; UMER, A.; AWAN, G. H.; HASSAN, A. Comparative study of convective heat transfer characteristics of nanofluids. **Heat Mass Transfer**, 2017, v. 53, p. 2309-2316.

MURSHED, S. M. S.; ESTELLÉ, P. A state of the art review on viscosity of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 76, p. 1134-1152.

NAIK, B. A. K.; VINOD, A. V. Heat transfer enhancement using non-Newtonian nanofluids in a shell and helical coil heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2018, v. 90, p. 132-142.

NAZARI, M.; BAIE, N. B.; ASHOURI, M.; SHAHMARDAN, M. M.; TAMAYOL, A. Unsteady heat transfer from a reservoir fluid by employing metal foam tube, helically tube and straight tube: a comparative experimental study. **Applied Thermal Engineering**, 2017, v. 111, p. 39-48.

NI, B.; SHI, Y.; WANG, X. The Sub-Nanometer Scale as a New Focus in Nanoscience. **Advanced Materials**, 2018, p. 1-24.

NIEDERBERGER, M.; PINNA, N. **Metal oxide nanoparticles in organic solvents: synthesis, formation, assembly and application**. Londres: Springer, 2009.

OLIVEIRA, G. A. **Síntese e caracterização de nanofluidos de prata**. 2012. 121 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2012.

OLIVEIRA, G. A. **Análise experimental do desempenho térmico de nanofluidos em radiadores automotivos**. 2016. 178 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2016.

OLIVEIRA, L. R.; SILVA, A. C. A.; DANTAS, N. O.; BANDARRA FILHO, A. P. Thermophysical properties of TiO<sub>2</sub>-PVA/water nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2017, v. 115, p. 795-808.

OLIVEIRA, L. R. **Síntese e caracterização de nanofluidos para aplicação em sistemas térmicos**. 2018. 250 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Universidade Federal de Uberlândia. Uberlândia, 2018.

OLSON, J.; MEDINA, S. D.; HOGGARD, A.; WANG, L. Y.; CHANG, W. S.; LINK, S. Optical characterization of single plasmonic nanoparticles. **Chemical Society Reviews**, 2015, v. 44, p. 40-57.

PAK, B. C.; CHO, Y.I. Hydrodynamic and heat transfer study of dispersed fluids with submicron metallic oxide particles. **Experimental Heat Transfer**, 1998, v. 11, p. 151-70.

PANDE, M.; BHASKARWAR, A. N. **Nanoparticles: preparation and characterization**. New York: Momentum Press, LLC, 2016.

PANJIAR, H.; GAKKHAR, R. P.; DANIEL, B. S. S. Strain-free graphite nanoparticle synthesis by mechanical milling. **Powder Technology**, 2015, v. 275, p. 25-29.

PATEL, H. E.; DAS, S. K.; SUNDARARAJAN, T.; NAIR, A. S.; GEORGE, B.; PRADEEP, T. Thermal conductivities of naked and monolayer protected metal nanoparticle based nanofluids: Manifestation of anomalous enhancement and chemical effects. **Applied Physics Letters**, 2003, v. 83, p. 2931-2933.

PAUL, G.; PAL, T.; MANNA, I. Thermo-physical property measurement of nano-gold dispersed water based nanofluids prepared by chemical precipitation technique. **Journal of Colloid and Interface Science**, 2010, v. 349, 434-437.

PINTO, R. V.; FIORELLI, F. A. S. Review of the mechanisms responsible for heat transfer enhancement using nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, 2016, v. 108, p. 720-739.

POURHOSEINI, S.H.; NAGHIZADEH, N.; HOSEINZADEH, H. Effect of silver-water nanofluid on heat transfer performance of a plate heat exchanger: An experimental and theoretical study. **Powder Technology**, 2018, v. 332, p. 279-286.

RASIH, R. A.; SIDIK, N. A. C.; SAMION, S. Recent progress on concentrating direct absorption solar collector using nanofluids: a review. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2019, p. 1-20.

RAVISANKAR, R.; VENKATACHALAPATHY, V. S. K.; ALAGUMURTHI, N. Metal and oxide form of nanoparticles heat transfer in radiator: A review. **International Journal of Research in Advanced Engineering and Technology**, 2017, v. 3, p. 1-6.

REBAY, M.; KAKAÇ, S.; COTTA, R. M. **Microscale and nanoscale heat transfer: analysis, design and applications**. Boca Raton: CRC Press, 2016.

RODRIGUES, M. I.; IEMMA, A. F. **Planejamento de experimentos e otimização de processos**. Campinas: Casa do Pão Editora, 2005.

RÓZ, A. L.; LEITE, F. L.; FERREIRA, M.; OLIVEIRA JÚNIOR, O. N. (Orgs.). **Nanoestruturas**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

RUDYAK, V.Y.; MINAKOV, A. V. Thermophysical properties of nanofluids. **The European Physical Journal E**, 2018, v. 41, p. 1-12.

SAJID, M. U.; ALI, H. M. Recent advances in application of nanofluids in heat transfer devices: a critical review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2019, v. 103, p. 556-592.

SAJID, M. U.; ALI, H. M. Thermal conductivity of hybrid nanofluids: A critical review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2018, v. 126, p. 211-234.

SALAZAR, P. D. T.; NIGAM, K. D. P.; SOLORIO, C. I. R. Heat transfer model for thermal performance analysis of parabolic trough solar collectors using nanofluids. **Renewable Energy**, 2018, v. 125, p. 334-343.

SALIMPOUR, M. R. Heat transfer coefficients of shell and coiled tube heat exchangers. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2009, v. 35, p. 203-207.

SARAFRAZ, M. M.; HORMOZI, F.; NIKKHAH, V. Thermal performance of a counter-current double pipe heat exchanger working with COOH-CNT/water nanofluids. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2016, v. 78, p. 41-49.

SHAHRUL, I. M.; MAHBUBUL, I. M.; SAIDUR, R.; SABRI, M. F. M. Experimental investigation on Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-W, SiO<sub>2</sub>-W and ZnO-W nanofluids and their application in a shell and tube heat exchanger. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2016, v. 97, p. 547-558.

SHALKEVICH, N.; ESCHER, W.; BÜRGI, T.; MICHEL, B.; AHMED, L. A.; POULIKAKOS, D. On the Thermal Conductivity of Gold Nanoparticle Colloids. **Langmuir**, 2010, v. 26, n. 2, p. 663-670.

SHARAFELDIN, M. A.; GRÓF, G. Evacuated tube solar collector performance using CeO<sub>2</sub>/water nanofluid. **Journal of Cleaner Production**, 2018, v. 185, p. 347-356.

SHARIF, M. Z.; AZMI, W. H.; REDHWAN, A. A. M.; MAMAT, R.; YOSOF, T. M. Performance analysis of SiO<sub>2</sub>/PAG nanolubricant in automotive air conditioning system. **International Journal of Refrigeration**, 2017, v. 75, p. 204-216.

SIDIK, N. A. C.; YAZID, M. N. A. W. M.; MAMAT, R. Recent advancement of nanofluids in engine cooling system. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 75, p. 137-144.

SILVA, G. E. **Desenvolvimento de transdutor em fibra óptica com estrutura híbrida LPG-FBG para medição de propriedades térmicas de materiais**. 2018. 414 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade de São Paulo. São Paulo, 2018.

SMITH, C. L. **Practical Process Control: Tuning and Troubleshooting**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2009.

SOMER, A. **Efeitos de modificações estruturais sobre a difusividade térmica efetiva em sistemas com dupla camada medida pela técnica de célula fotoacústica aberta**. 2016. 152 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciências, Universidade Estadual de Ponta Grossa. Ponta Grossa, 2016.

SUGANTHI, K. S.; RAJAN, K. S. Metal oxide nanofluids: Review of formulation, thermo-physical properties, mechanisms, and heat transfer performance. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 76, p. 226-255.

SUGANTHI, K. S.; VINODHAN, V. L.; RAJAN, K. S. Heat transfer performance and transport properties of ZnO-ethylene glycol and ZnO-ethylene glycol-water nanofluid coolants. **Applied Energy**, 2014, v. 135, p. 548-559.

SUKARNO, D. H. Challenges for nanofluid applications in heat transfer technology. **Journal of Physics: Conference Series**, 2017, v. 795, p. 1-6.

TAWFIK, M. M. Experimental studies of nanofluid thermal conductivity enhancement and applications: a review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 2017, v. 75, p. 1239-1253.

TAYLOR, R.; COULOMBE, S.; OTANICAR, T.; PHELAN, P.; GUNAWAN, A.; LV, W.; ROSENGARTEN, G.; PRASHER, R.; TYAGI, H. Small particles, big impacts: A review of the diverse applications of nanofluids. **Journal of Applied Physics**, 2013, v. 113, p.1-19.

TIMOFEEVA, E. V.; YU, W.; FRANCE, D. M.; SINGH, D.; ROUTBORT, J. L. Base fluid and temperature effects on the heat transfer characteristics of SiC in ethylene glycol/H<sub>2</sub>O and H<sub>2</sub>O nanofluids. **Journal of Applied Physics**, 2011, v. 109, p. 1-5.

TURKEVICH, J.; STEVENSON, P. C.; HILLIER, J. A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold. **Discussions of the Faraday Society**, 1951, v. 11, p. 55–75.

VERMA, C.; EBENSO, E. E.; QURAIISHI, M. A. Transition metal nanoparticles in ionic liquids: synthesis and stabilization. **Journal of Molecular Liquids**, 2019, v. 276, p. 826-849.

WANG, L.; SHI, B.; CHAI, Z. Effects of temperature-dependent properties on natural convection of nanofluids in a partially heated cubic enclosure. **Applied Thermal Engineering**, 2018, v. 128, p. 204-213.

WANG, Z.; WU, Z.; HAN, F.; WADSÖ, L.; SUNDÉN, B. Experimental comparative evaluation of a graphene nanofluid coolant in miniature plate heat exchanger. **International Journal of Thermal Sciences**, 2018, v. 130, p. 148-156.

WASEDA, Y.; MURAMATSU, A. (Eds.). **Morphology control of materials and nanoparticles: advanced materials processing and characterization**. New York: Springer, 2004.

XIAN, H. W.; SIDIK, N. A. C.; NAJAFI, G. Recent state of nanofluid in automobile cooling systems. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, 2019, v. 135, p. 981-1008.

YANG, L.; DU, K. A comprehensive review on heat transfer characteristics of TiO<sub>2</sub> nanofluids. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2017, v. 108, p. 11-31.

ZHANG, X.; GU, H.; FUJII, M. Effective thermal conductivity and thermal diffusivity of nanofluids containing spherical and cylindrical nanoparticles. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 2007, v. 31, p. 593-599.

ZENDEHBOUDI, A.; SAIDUR, R.; MAHBUBUL, I. M.; HOSSEINI, S. H. Data-driven methods for estimating the effective thermal conductivity of nanofluids: a comprehensive review. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, 2019, v. 131, p. 1211-1231.

**APÊNDICE A - Tabelas (Propriedades Termofísicas)**

As propriedades termofísicas da água quente e da água fria, em função da vazão volumétrica dos fluidos ( $\dot{V}$ ), são exibidas nas Tabelas A.1, A.2 e A.3.

Os algarismos romanos (II) representam as duplicatas.

**Tabela A.1 - Propriedades termofísicas da água quente e água fria ( $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ (°C)	$T_{m,f}$ (°C)	Água quente				Água fria			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	35	26	0,622	0,72	994,0	4,179	0,608	0,87	996,8	4,181
20 (II)	35	26	0,622	0,72	994,0	4,179	0,608	0,87	996,8	4,181
30	36	26	0,624	0,70	993,6	4,179	0,609	0,86	996,7	4,181
30 (II)	36	26	0,624	0,70	993,6	4,179	0,609	0,86	996,7	4,181
40	38	27	0,625	0,68	993,1	4,179	0,610	0,84	996,5	4,181
40 (II)	37	27	0,624	0,69	993,4	4,179	0,610	0,84	996,4	4,181

**Tabela A.2 - Propriedades termofísicas da água quente e água fria ( $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ (°C)	$T_{m,f}$ (°C)	Água quente				Água fria			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	44	28	0,633	0,61	990,7	4,18	0,612	0,83	996,2	4,18
20 (II)	42	28	0,631	0,63	991,3	4,18	0,611	0,83	996,2	4,18
30	44	29	0,634	0,60	990,5	4,18	0,612	0,82	996,0	4,18
30 (II)	43	28	0,632	0,62	991,1	4,18	0,611	0,84	996,3	4,18
40	45	29	0,635	0,60	990,3	4,18	0,613	0,82	996,0	4,18
40 (II)	44	28	0,633	0,61	990,8	4,18	0,611	0,83	996,2	4,18

**Tabela A.3 - Propriedades termofísicas da água quente e água fria ( $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ (°C)	$T_{m,f}$ (°C)	Água quente				Água fria			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) x10 <sup>-3</sup>	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	50	29	0,641	0,55	987,9	4,18	0,613	0,81	995,7	4,18
20 (II)	47	29	0,638	0,58	989,0	4,18	0,612	0,83	996,1	4,18
30	52	30	0,642	0,53	987,3	4,18	0,615	0,79	995,5	4,18
30 (II)	50	30	0,640	0,55	988,2	4,18	0,614	0,80	995,7	4,18
40	52	30	0,643	0,53	987,0	4,18	0,614	0,80	995,6	4,18
40 (II)	51	29	0,641	0,54	987,8	4,18	0,613	0,81	995,8	4,18



As propriedades termofísicas da água quente e do nanofluido de ouro com fração volumétrica ( $\phi$ ) igual a  $1,63 \times 10^{-5}\%$  ( $NF_A$ ) são apresentadas nas Tabelas A.4, A.5 e A.6.

**Tabela A.4 - Propriedades termofísicas da água quente e do  $NF_A$  ( $T_{q,ent} = 40^\circ C$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ ( $^\circ C$ )	$T_{m,f}$ ( $^\circ C$ )	Água quente				$NF_A$			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	35	26	0,622	0,72	994,0	4,179	0,609	0,86	996,7	4,181
20 (II)	35	27	0,622	0,72	993,9	4,179	0,610	0,85	996,5	4,181
30	36	26	0,623	0,71	993,8	4,179	0,608	0,87	996,8	4,181
30 (II)	36	27	0,624	0,70	993,6	4,179	0,609	0,86	996,7	4,181
40	36	27	0,623	0,70	993,6	4,179	0,609	0,86	996,7	4,181
40 (II)	36	27	0,623	0,71	993,8	4,179	0,610	0,86	996,6	4,181

**Tabela A.5 - Propriedades termofísicas da água quente e do  $NF_A$  ( $T_{q,ent} = 50^\circ C$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ ( $^\circ C$ )	$T_{m,f}$ ( $^\circ C$ )	Água quente				$NF_A$			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	42	28	0,631	0,63	991,4	4,18	0,612	0,83	996,2	4,18
20 (II)	43	28	0,632	0,62	991,1	4,18	0,611	0,84	996,3	4,18
30	43	28	0,633	0,61	990,8	4,18	0,612	0,83	996,1	4,18
30 (II)	43	28	0,633	0,62	991,0	4,18	0,612	0,83	996,2	4,18
40	44	29	0,633	0,61	990,7	4,18	0,612	0,82	996,0	4,18
40 (II)	44	29	0,634	0,61	990,6	4,18	0,613	0,81	995,9	4,18

**Tabela A.6 - Propriedades termofísicas da água quente e do  $NF_A$  ( $T_{q,ent} = 60^\circ C$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ ( $^\circ C$ )	$T_{m,f}$ ( $^\circ C$ )	Água quente				$NF_A$			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	49	30	0,640	0,55	988,4	4,181	0,614	0,81	995,8	4,18
20 (II)	49	29	0,639	0,56	988,6	4,181	0,614	0,81	995,8	4,18
30	50	29	0,640	0,55	988,2	4,181	0,613	0,81	995,9	4,18
30 (II)	50	29	0,640	0,55	988,2	4,181	0,613	0,82	996,0	4,18
40	51	30	0,641	0,54	987,7	4,182	0,615	0,80	995,6	4,18
40 (II)	51	30	0,641	0,54	987,8	4,182	0,615	0,80	995,6	4,18

As propriedades termofísicas da água quente e do nanofluido de ouro com fração volumétrica ( $\phi$ ) igual a  $6,53 \times 10^{-5}\%$  ( $NF_B$ ) são apresentadas nas Tabelas A.7, A.8 e A.9.

**Tabela A.7 - Propriedades termofísicas da água quente e do  $NF_B$  ( $T_{q,ent} = 40^\circ\text{C}$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{m,f}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Água quente				$NF_B$			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	35	26	0,622	0,72	993,9	4,179	0,609	0,86	996,7	4,181
20 (II)	37	26	0,624	0,70	993,5	4,179	0,609	0,87	996,8	4,181
30	37	27	0,625	0,69	993,2	4,179	0,609	0,86	996,6	4,181
30 (II)	37	27	0,624	0,69	993,4	4,179	0,610	0,85	996,6	4,181
40	37	27	0,624	0,69	993,3	4,179	0,610	0,85	996,5	4,181
40 (II)	38	27	0,626	0,68	993,0	4,179	0,609	0,86	996,6	4,181

**Tabela A.8 - Propriedades termofísicas da água quente e do  $NF_B$  ( $T_{q,ent} = 50^\circ\text{C}$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{m,f}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Água quente				$NF_B$			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	41	27	0,630	0,64	991,8	4,18	0,610	0,85	996,5	4,18
20 (II)	41	27	0,630	0,65	991,6	4,18	0,610	0,85	996,5	4,18
30	42	27	0,631	0,63	991,5	4,18	0,609	0,86	996,6	4,18
30 (II)	43	27	0,632	0,62	991,2	4,18	0,610	0,85	996,6	4,18
40	45	28	0,634	0,60	990,3	4,18	0,611	0,84	996,3	4,18
40 (II)	45	28	0,634	0,60	990,3	4,18	0,612	0,83	996,2	4,18

**Tabela A.9 - Propriedades termofísicas da água quente e do  $NF_B$  ( $T_{q,ent} = 60^\circ\text{C}$ )**

$\dot{V}$ (L/h)	$T_{m,q}$ ( $^\circ\text{C}$ )	$T_{m,f}$ ( $^\circ\text{C}$ )	Água quente				$NF_B$			
			$k_q$ (W/m.K)	$\mu_q$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_q$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,q}$ (kJ/kg.K)	$k_f$ (W/m.K)	$\mu_f$ (N.s/m <sup>2</sup> ) $\times 10^{-3}$	$\rho_f$ (kg/m <sup>3</sup> )	$C_{p,f}$ (kJ/kg.K)
20	49	29	0,639	0,56	988,6	4,181	0,613	0,82	996,0	4,18
20 (II)	49	28	0,639	0,56	988,6	4,181	0,611	0,83	996,2	4,18
30	49	29	0,640	0,56	988,4	4,181	0,612	0,82	996,1	4,18
30 (II)	49	28	0,640	0,55	988,3	4,181	0,612	0,83	996,2	4,18
40	50	29	0,641	0,55	988,0	4,181	0,613	0,82	996,0	4,18
40 (II)	50	29	0,641	0,54	987,8	4,181	0,613	0,821	996,1	4,18

**APÊNDICE B - Faixas de Números de Reynolds**

As faixas dos números de Reynolds no lado do fluido frio ( $Re_f$ ) e no lado do fluido quente ( $Re_q$ ), calculados a partir do modelo de Salimpour, são apresentadas na Tabela B.1.

**Tabela B.1 - Números de Reynolds nos lados quente ( $Re_q$ ) e frio ( $Re_f$ )**

Condições operacionais	Água Fria ( $Re_f$ )	Água quente ( $Re_q$ )	NFA ( $Re_f$ )	Água quente ( $Re_q$ )	NFB ( $Re_f$ )	Água quente ( $Re_q$ )
40°C – 20 L/h	1852 - 1889	213 - 220	1863 - 1904	213 - 219	1868 - 1899	215 - 217
40°C – 20 L/h (II)	1852 - 1889	213 - 220	1899 - 1925	214 - 218	1852 - 1883	220 - 223
40°C – 30 L/h	2755 - 2872	327 - 339	2755 - 2810	322 - 329	2802 - 2864	335 - 341
40°C – 30 L/h (II)	2755 - 2872	327 - 339	2810 - 2848	329 - 335	2817 - 2880	333 - 337
40°C – 40 L/h	3756 - 3892	436 - 465	3725 - 3808	436 - 447	3788 - 3850	441 - 451
40°C – 40 L/h (II)	3798 - 3902	438 - 452	3767 - 3808	434 - 439	3736 - 3798	451 - 458
50°C – 20 L/h	1925 - 1978	251 - 257	1930 - 1972	243 - 248	1889 - 1915	240 - 244
50°C – 20 L/h (II)	1917 - 1979	241 - 252	1930 - 1951	247 - 251	1889 - 1915	241 - 246
50°C – 30 L/h	2903 - 2990	376 - 387	2911 - 2982	373 - 382	2810 - 2864	363 - 372
50°C – 30 L/h (II)	2863 - 2928	367 - 380	2903 - 2951	373 - 381	2833 - 2864	368 - 377
50°C – 40 L/h	3861 - 4050	505 - 531	3902 - 3976	498 - 515	3840 - 3902	512 - 518
50°C – 40 L/h (II)	3835 - 3953	499 - 515	3966 - 4029	505 - 513	3881 - 3955	508 - 521
60°C – 20 L/h	1962 - 2041	276 - 287	1993 - 2025	274 - 281	1962 - 1999	270 - 280
60°C – 20 L/h (II)	1904 - 2015	263 - 280	1988 - 2015	272 - 278	1930 - 1956	274 - 278
60°C – 30 L/h	3022 - 3102	427 - 438	2958 - 3014	417 - 425	2919 - 2998	411 - 421
60°C – 30 L/h (II)	2974 - 3078	414 - 425	2951 - 3038	418 - 422	2895 - 2951	414 - 420
60°C – 40 L/h	3923 - 4157	561 - 592	4040 - 4114	567 - 576	3913 - 3976	558 - 567
60°C – 40 L/h (II)	3913 - 4082	554 - 587	4019 - 4104	562 - 575	3923 - 3976	564 - 571

**APÊNDICE C - Tabela de Faixas de Efetividade do TCCTH**

As faixas da efetividade do TCCTH referentes aos fluidos frios, e suas respectivas duplicatas, são apresentadas na Tabela C.1.

**Tabela C.1 - Faixas de Efetividade do TCCTH**

<b>Condições operacionais</b>	<b>Água Fria</b>	<b>NFA</b>	<b>NFB</b>
40°C – 20 L/h	0,3754 – 0,4465	0,3912 – 0,4448	0,3835 – 0,4358
40°C – 20 L/h (II)	0,3754 – 0,4465	0,4125 – 0,4579	0,3659 – 0,4146
40°C – 30 L/h	0,3081 – 0,4170	0,3562 – 0,4183	0,3261 – 0,3813
40°C – 30 L/h (II)	0,3081 – 0,4170	0,3752 – 0,4107	0,3496 – 0,3850
40°C – 40 L/h	0,2963 – 0,3738	0,3429 – 0,4110	0,3282 – 0,3859
40°C – 40 L/h (II)	0,2985 – 0,3689	0,3755 – 0,4118	0,2745 – 0,3234
50°C – 20 L/h	0,4037 – 0,4322	0,4182 – 0,4515	0,4135 – 0,4518
50°C – 20 L/h (II)	0,4019 – 0,4278	0,3867 – 0,4106	0,4095 – 0,4421
50°C – 30 L/h	0,3796 – 0,4105	0,3861 – 0,4174	0,4035 – 0,4250
50°C – 30 L/h (II)	0,3722 – 0,3937	0,3637 – 0,4027	0,3887 – 0,4291
50°C – 40 L/h	0,3559 – 0,3949	0,3732 – 0,4060	0,3651 – 0,3942
50°C – 40 L/h (II)	0,3651 – 0,3888	0,3897 – 0,4141	0,3804 – 0,4045
60°C – 20 L/h	0,4051 – 0,4310	0,4288 – 0,4486	0,4322 – 0,4552
60°C – 20 L/h (II)	0,4340 – 0,4640	0,4125 – 0,4346	0,4321 – 0,4473
60°C – 30 L/h	0,3911 – 0,4102	0,3958 – 0,4194	0,4087 – 0,4259
60°C – 30 L/h (II)	0,3993 – 0,4269	0,4051 – 0,4281	0,4006 – 0,4179
60°C – 40 L/h	0,3523 – 0,4277	0,3907 – 0,4172	0,3943 – 0,4108
60°C – 40 L/h (II)	0,3693 – 0,4017	0,3816 – 0,4039	0,3819 – 0,4037

**APÊNDICE D - Comparação entre  $\dot{q}$  teórica e experimental**

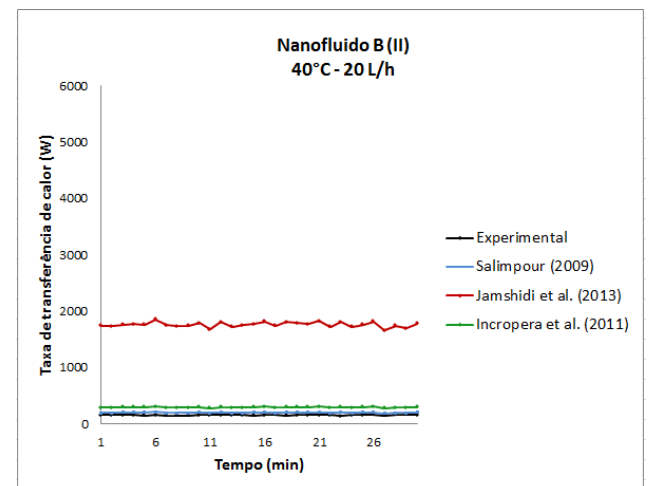
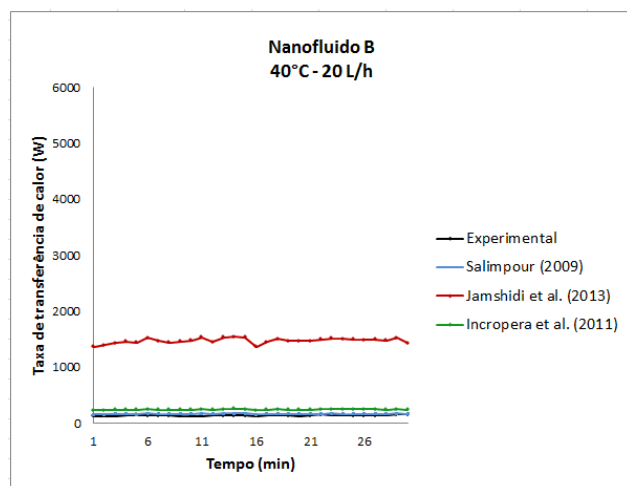
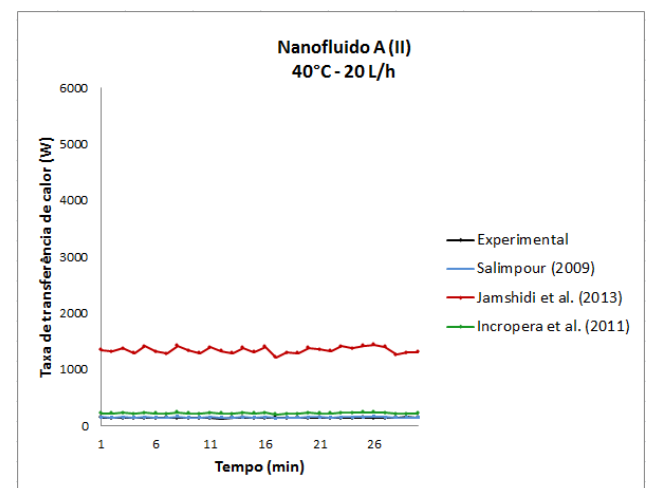
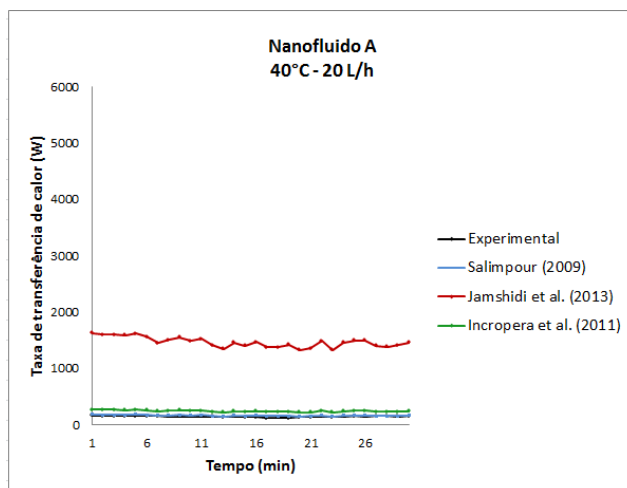
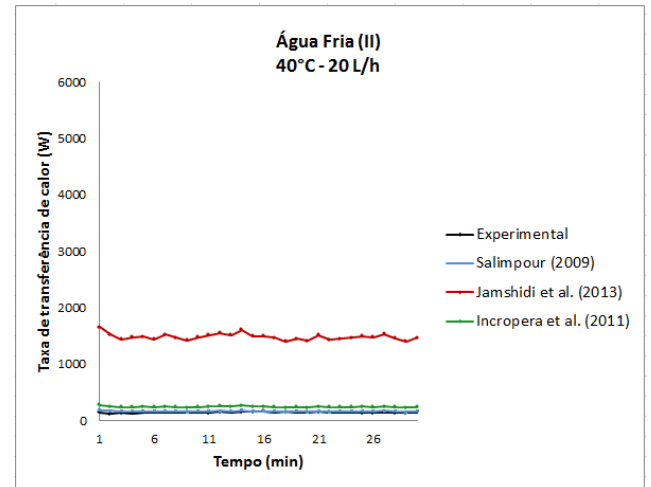
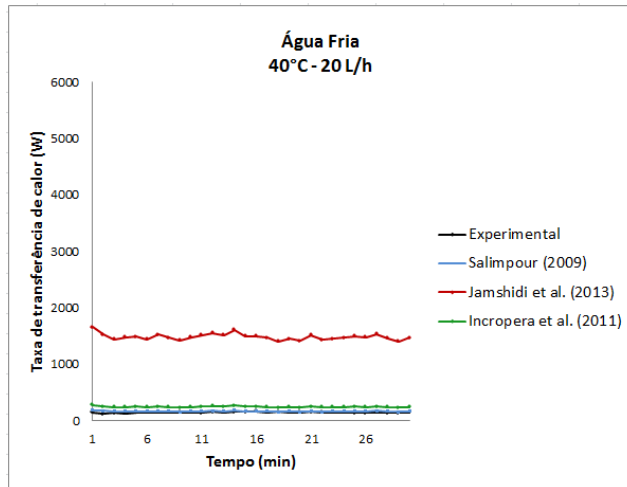
Gráfico D.1 - Comparação à  $T_{q,ent} = 40^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 20 \text{ L/h}$ 



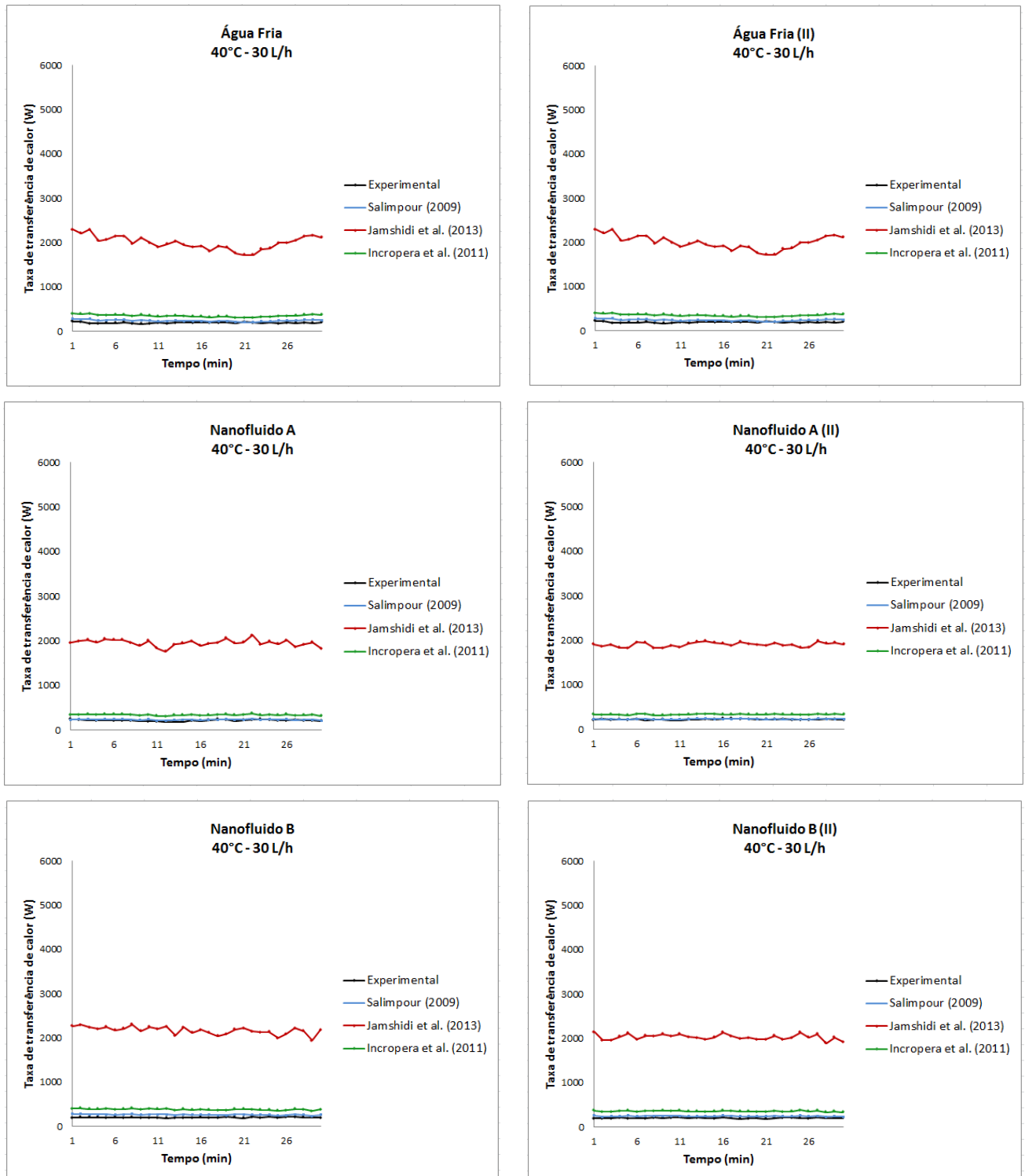
Gráfico D.2 - Comparação à  $T_{q,ent} = 40^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 30\text{ L/h}$ 

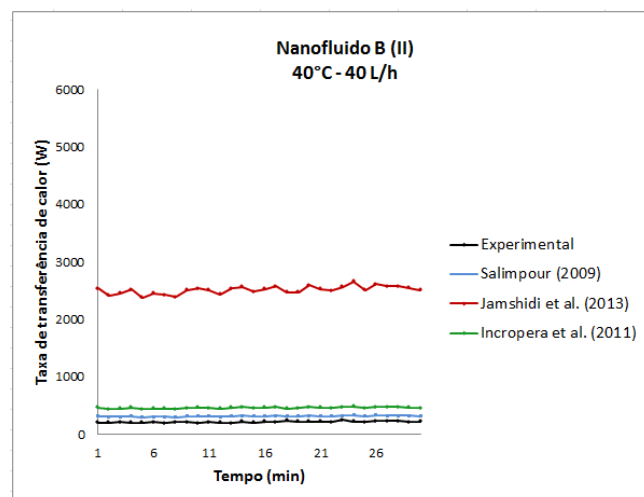
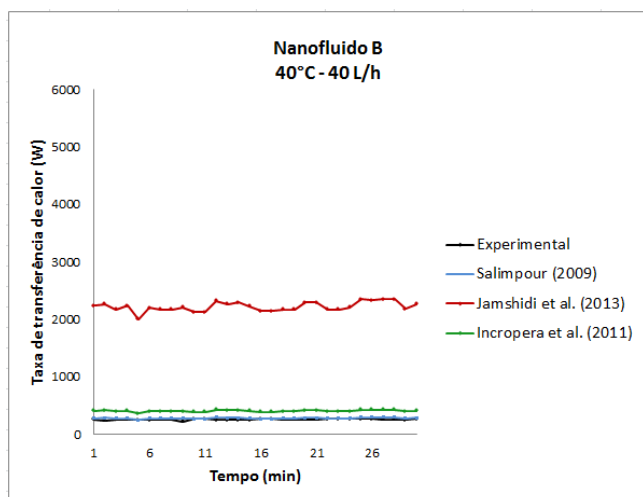
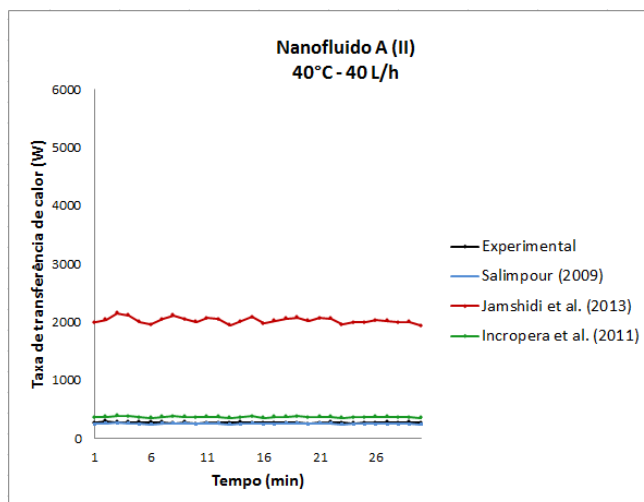
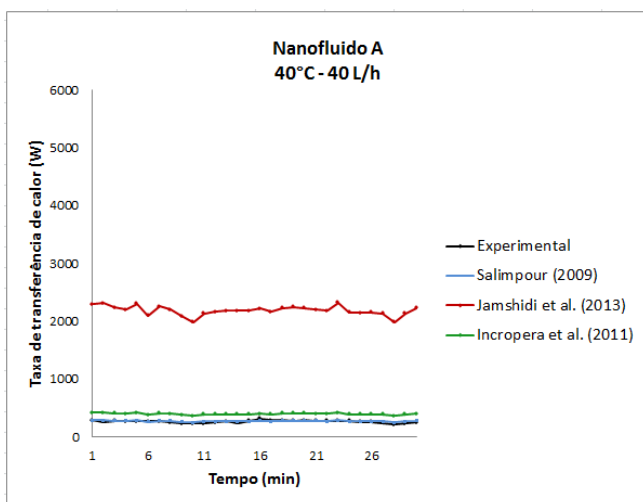
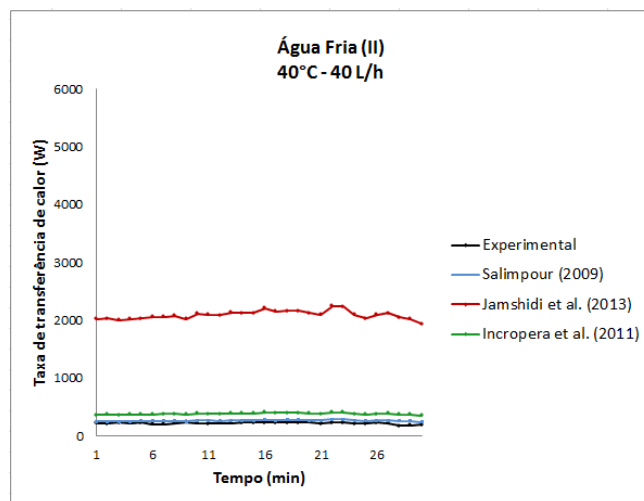
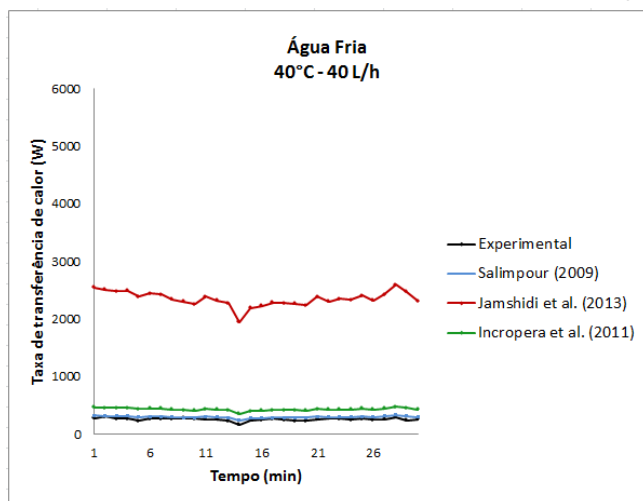
Gráfico D.3 - Comparação à  $T_{q,ent} = 40^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 40\text{ L/h}$ 

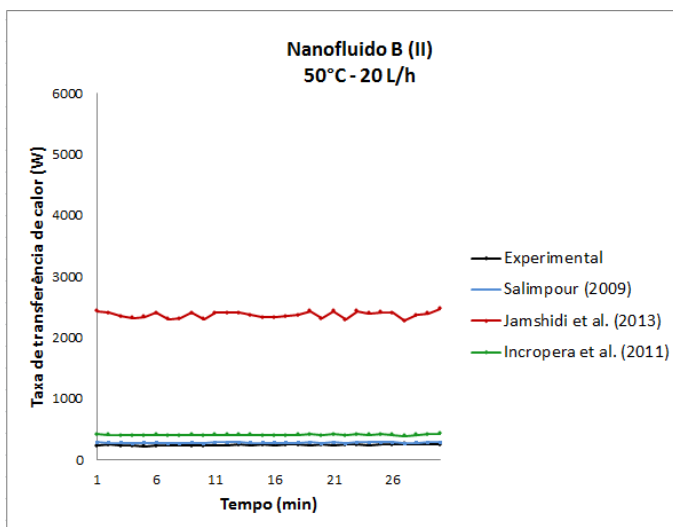
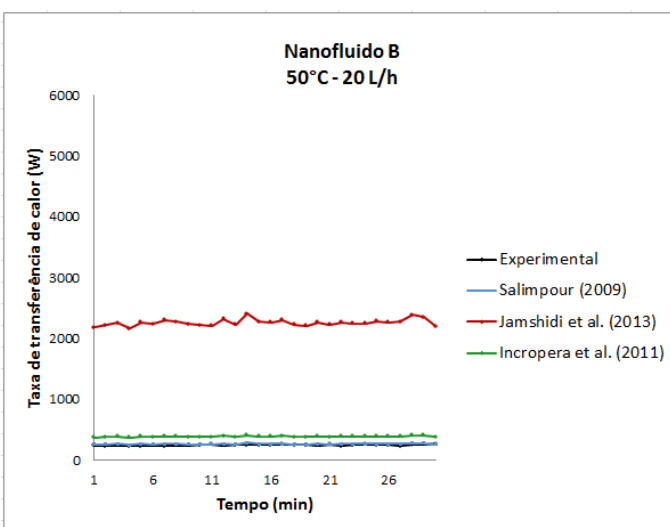
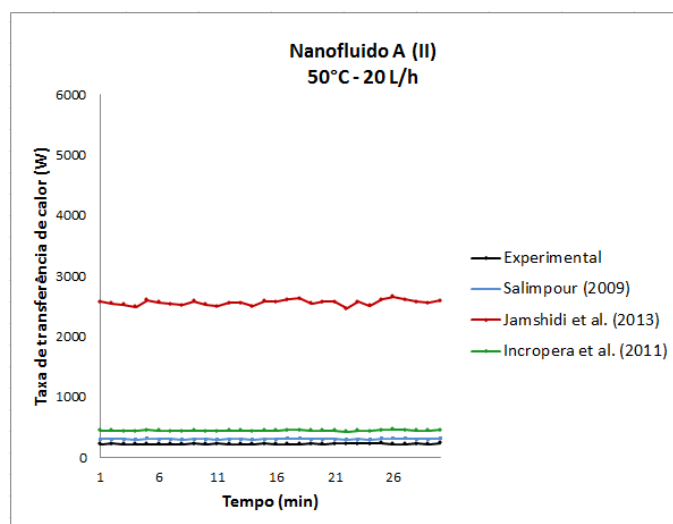
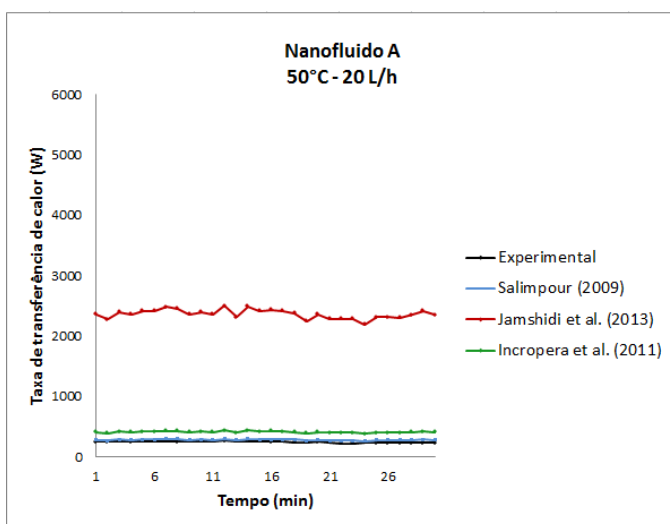
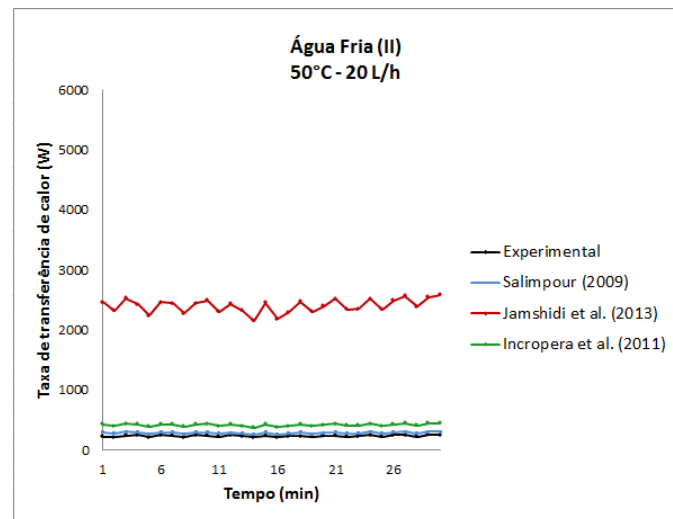
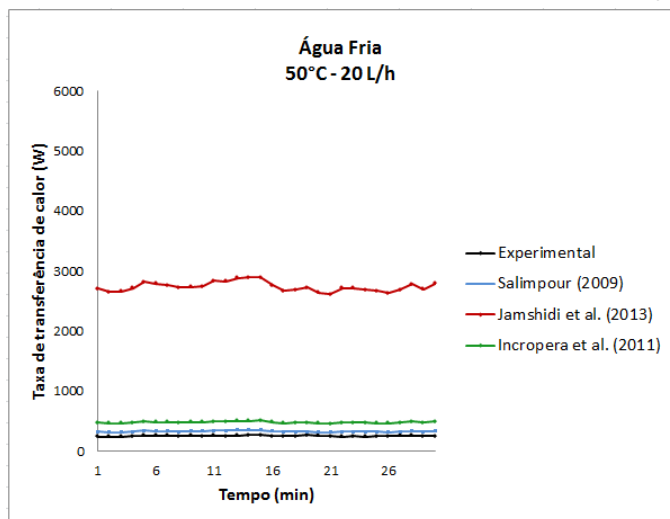
Gráfico D.4 - Comparação à  $T_{q,ent} = 50^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 20\text{ L/h}$ 

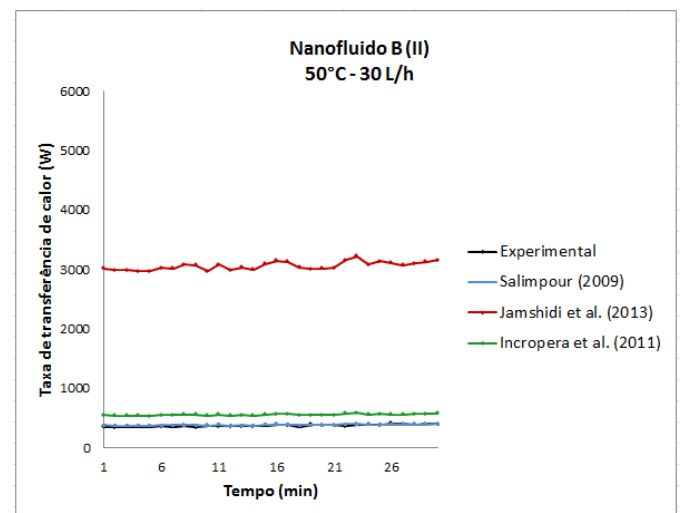
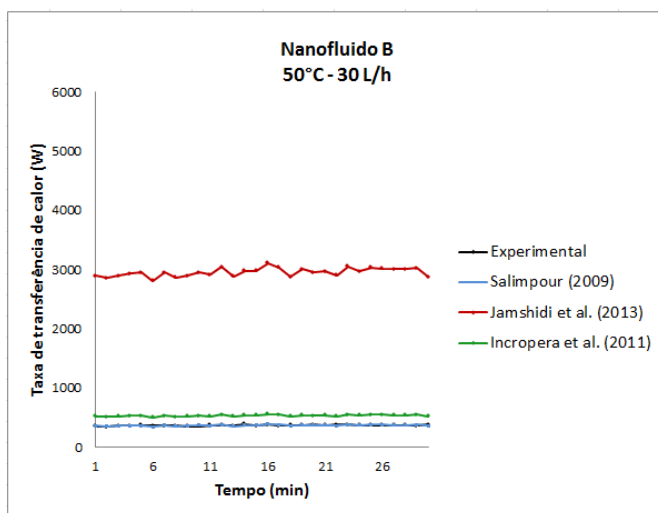
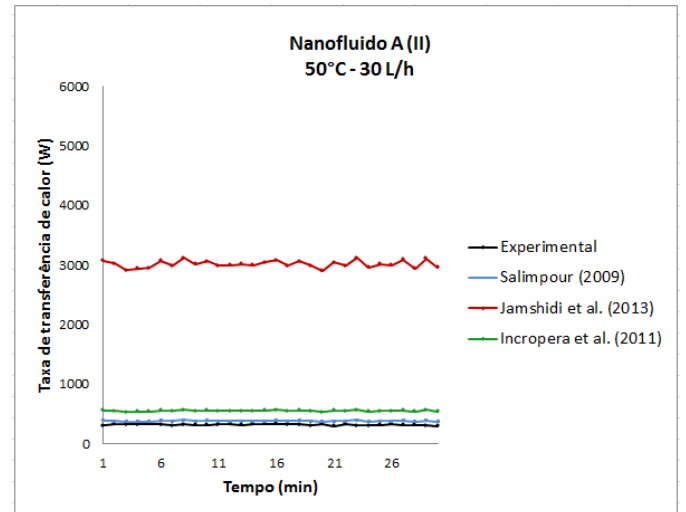
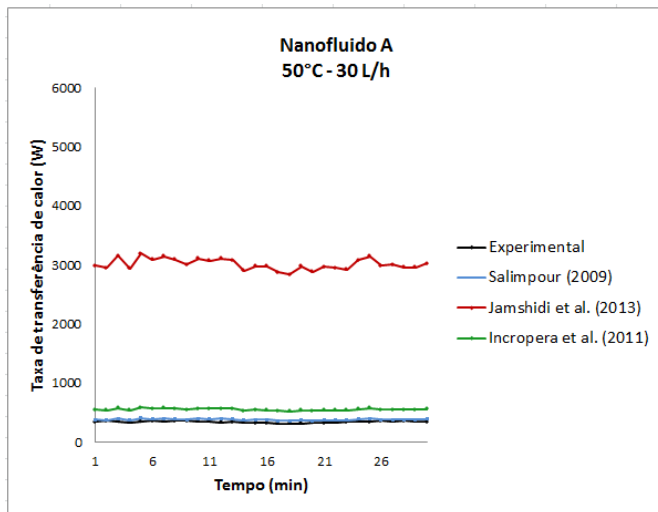
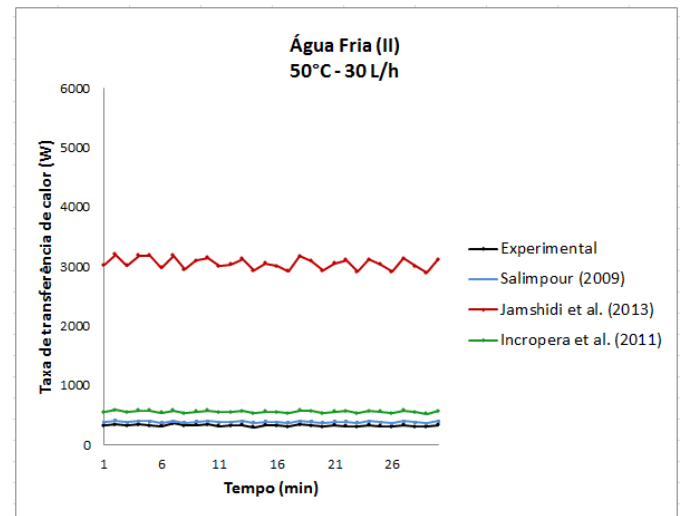
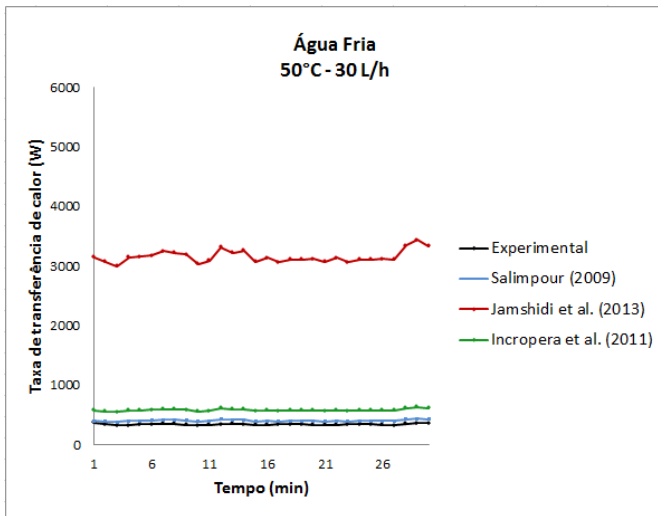
Gráfico D.5 - Comparação à  $T_{q,ent} = 50^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 30 \text{ L/h}$ 

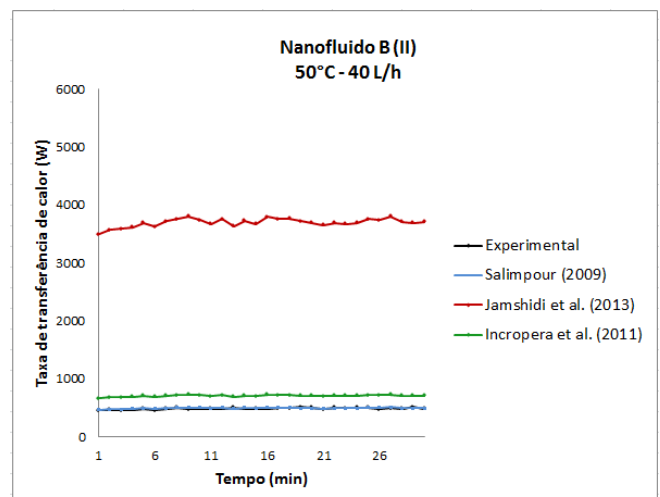
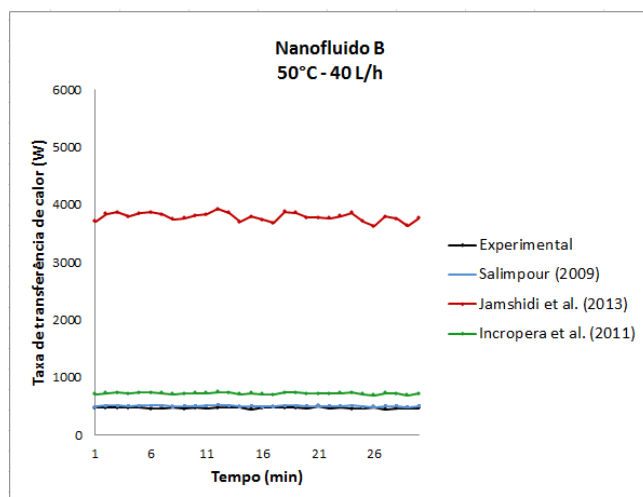
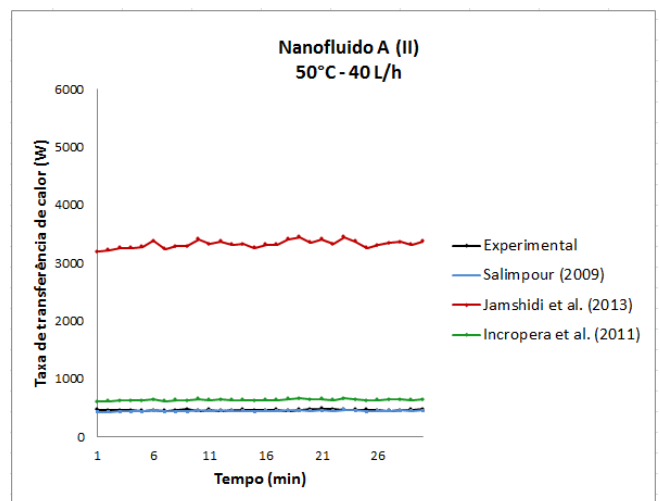
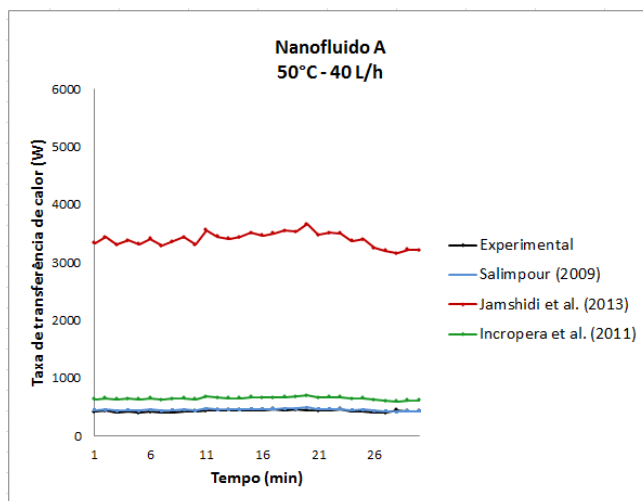
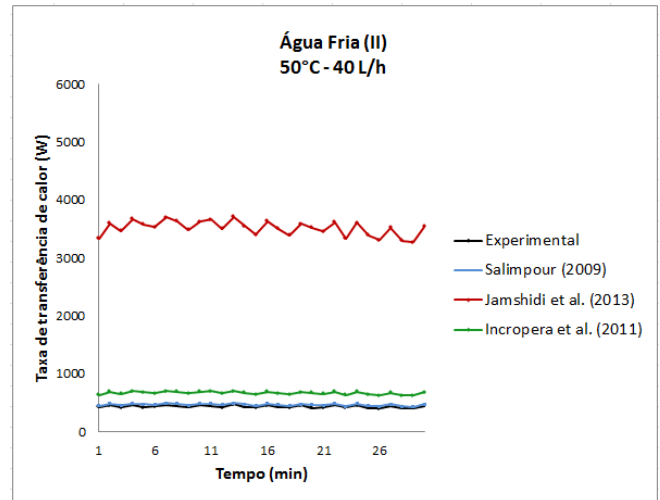
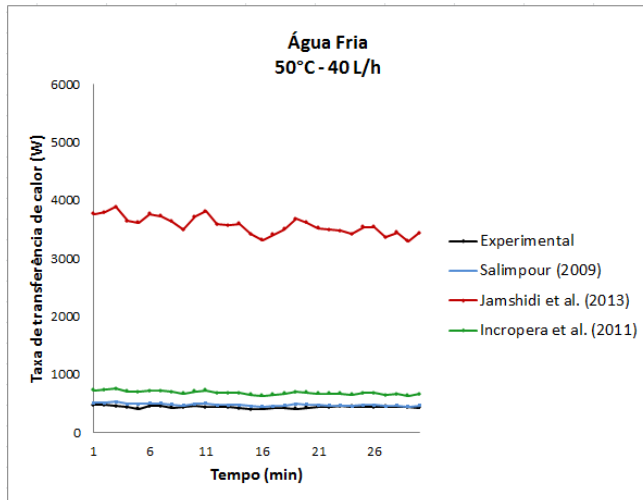
Gráfico D.6 - Comparação à  $T_{q,ent} = 50^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 40 \text{ L/h}$ 

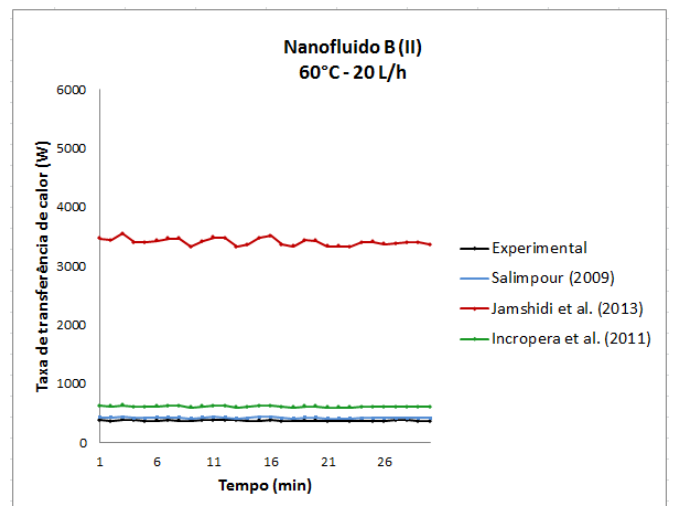
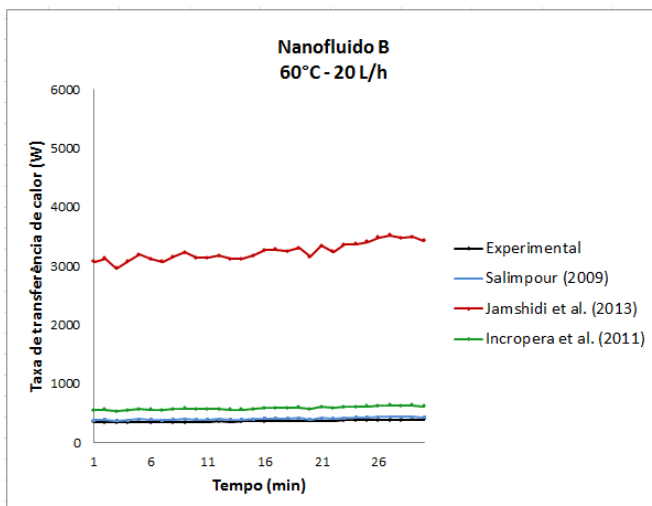
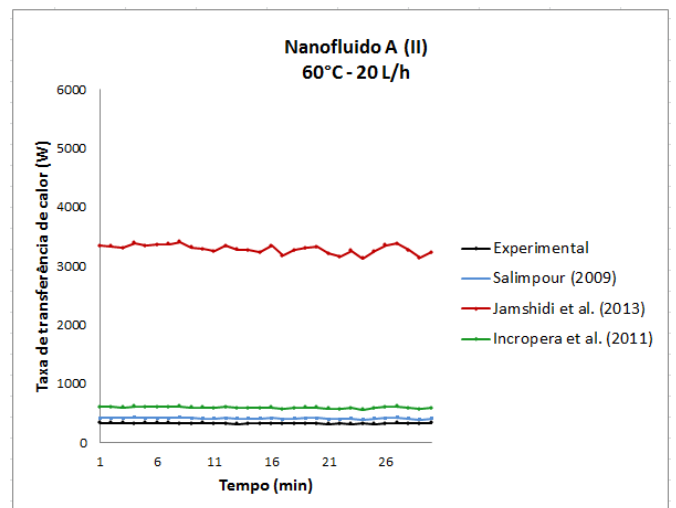
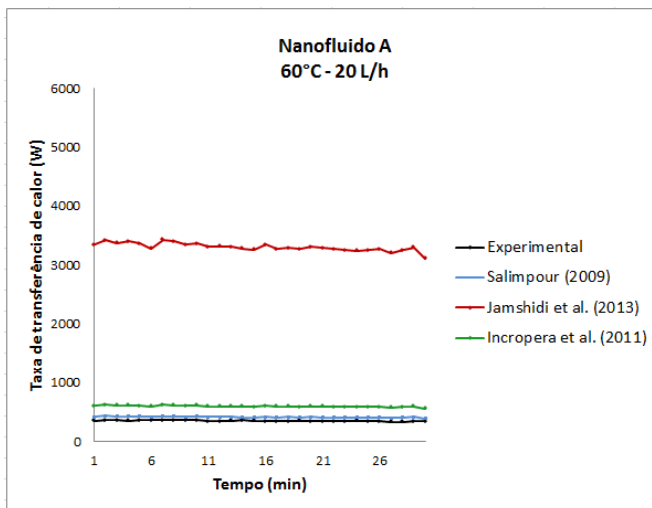
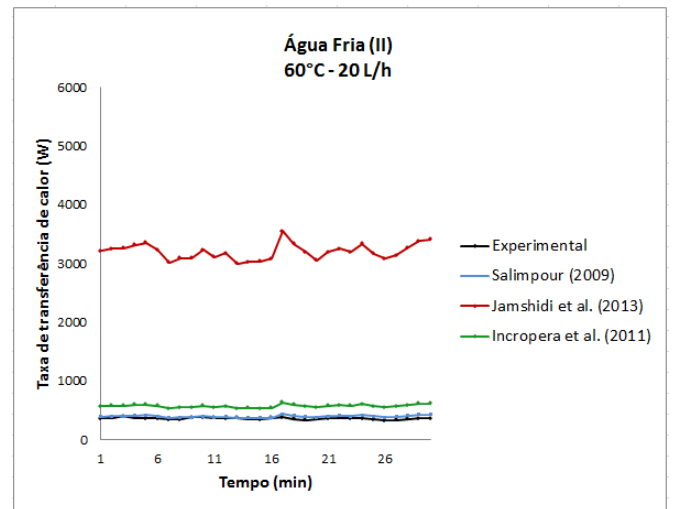
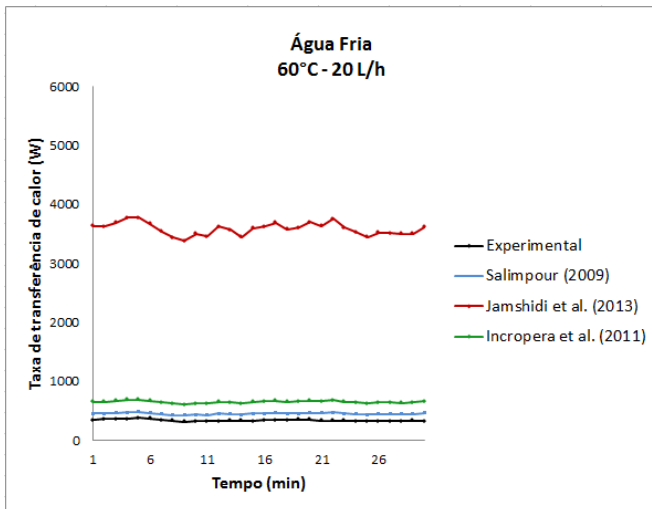
Gráfico D.7 - Comparação à  $T_{q,ent} = 60^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 20 \text{ L/h}$ 

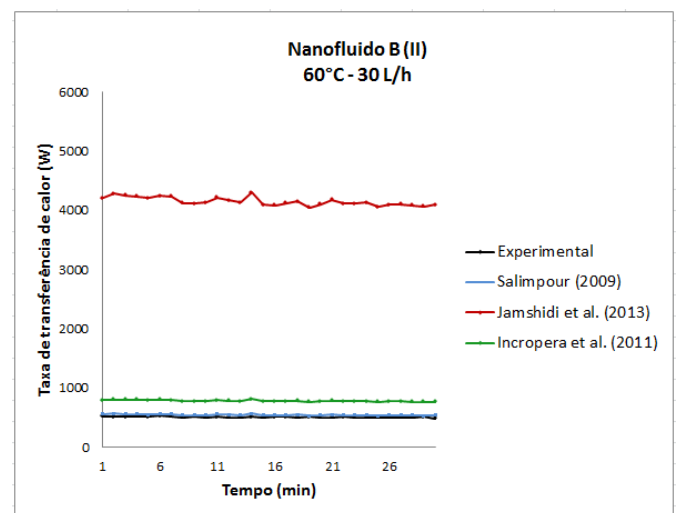
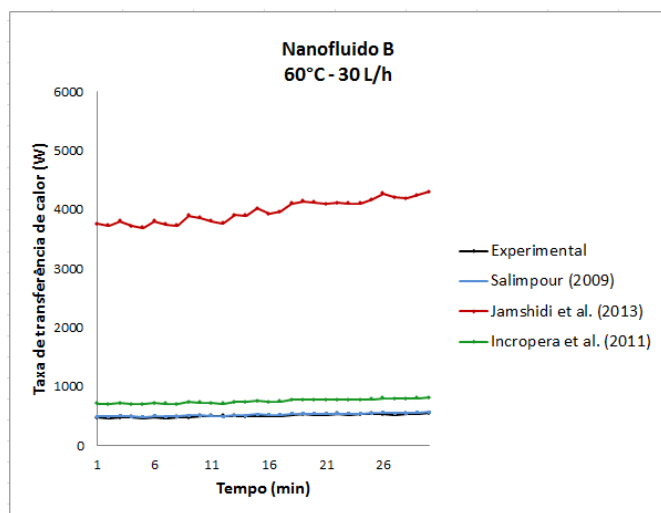
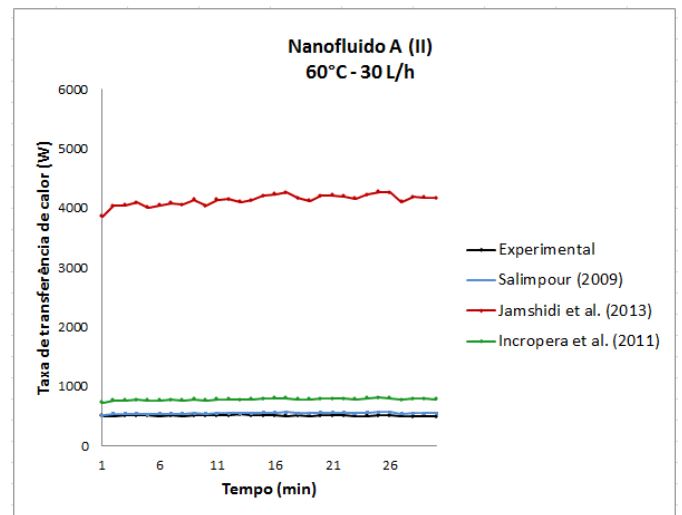
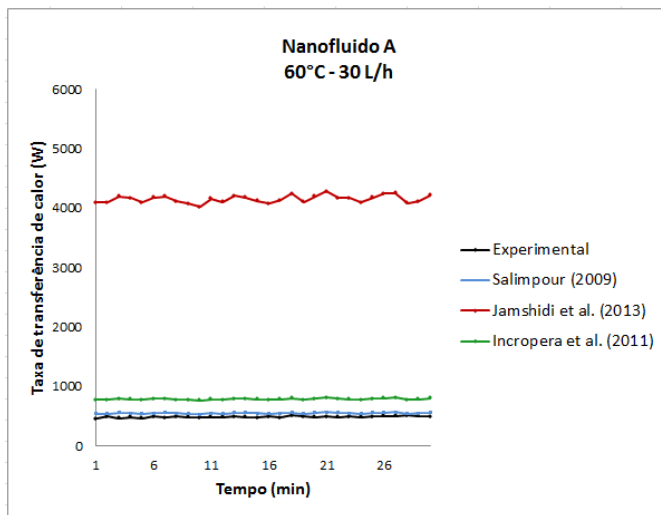
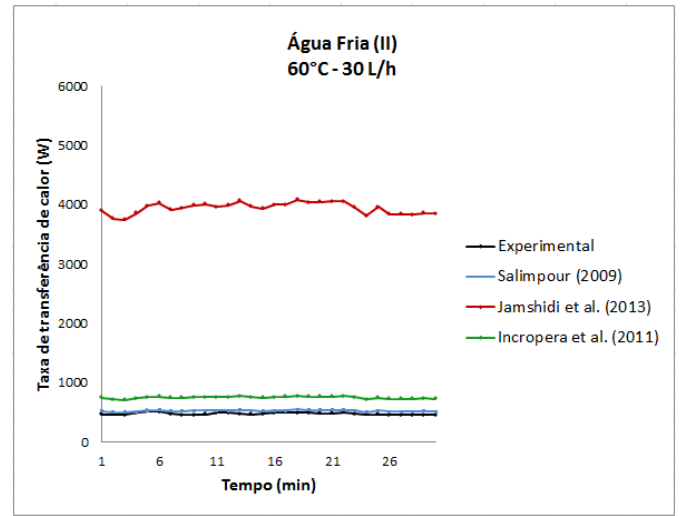
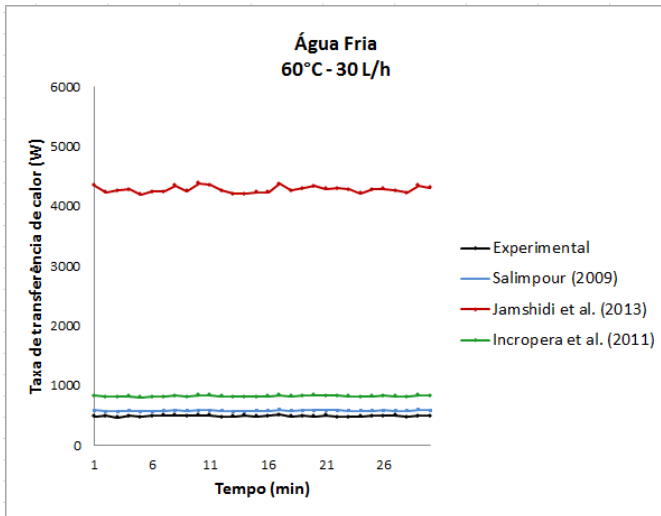
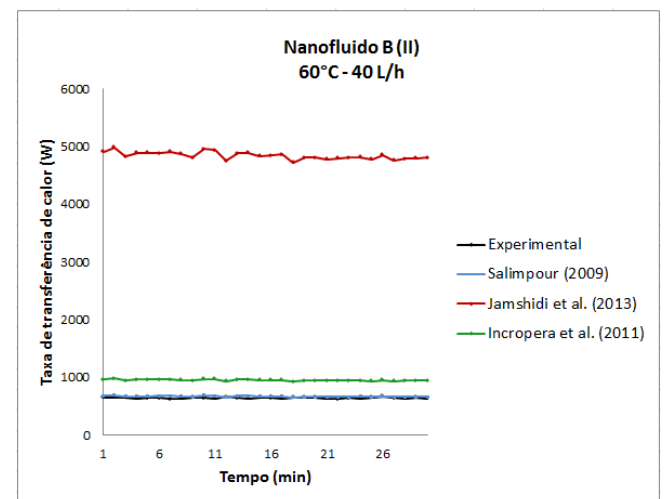
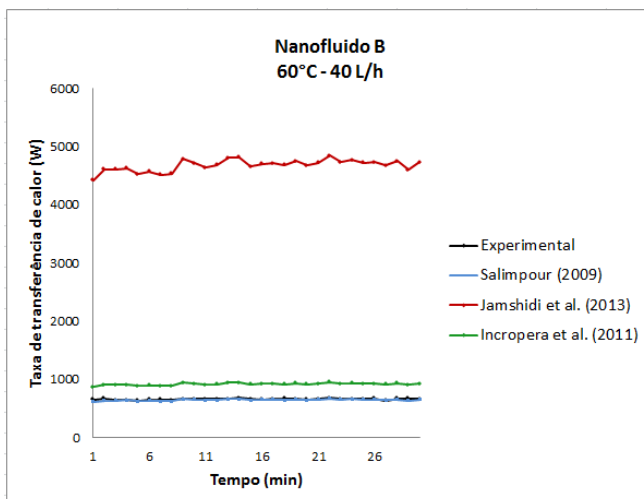
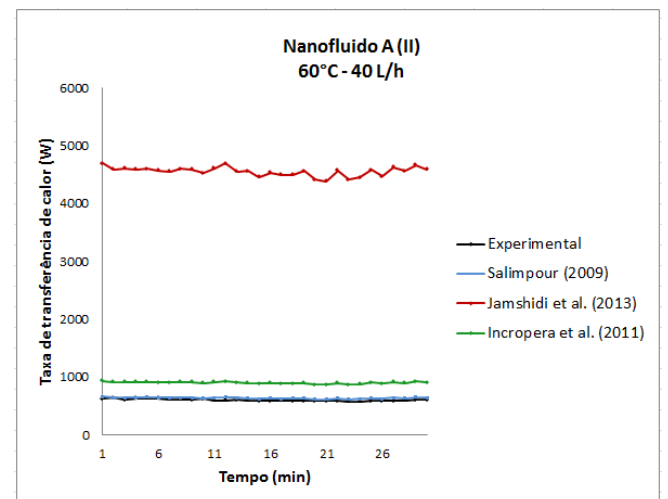
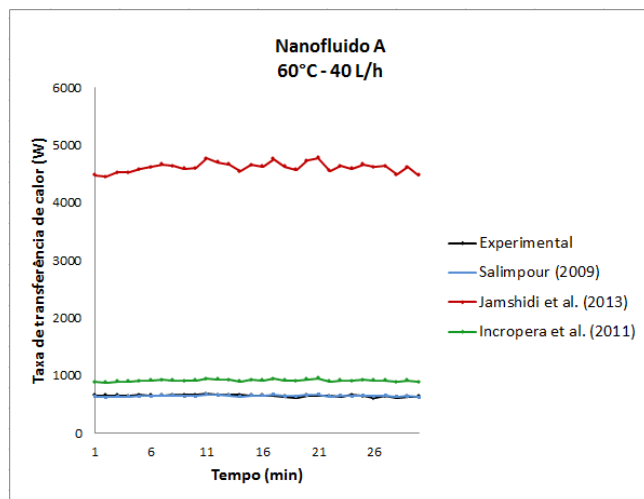
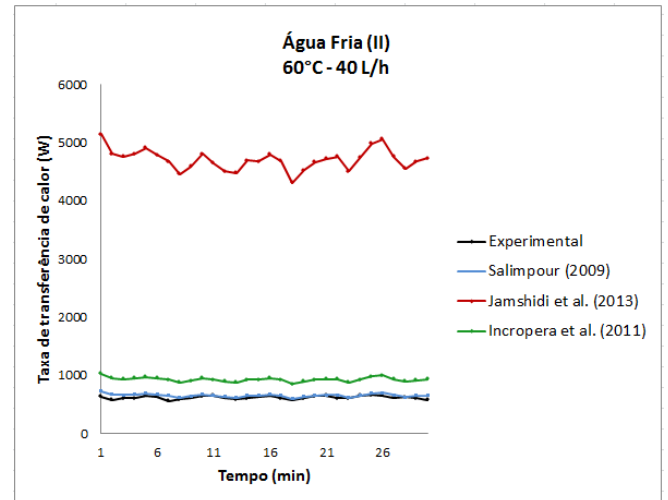
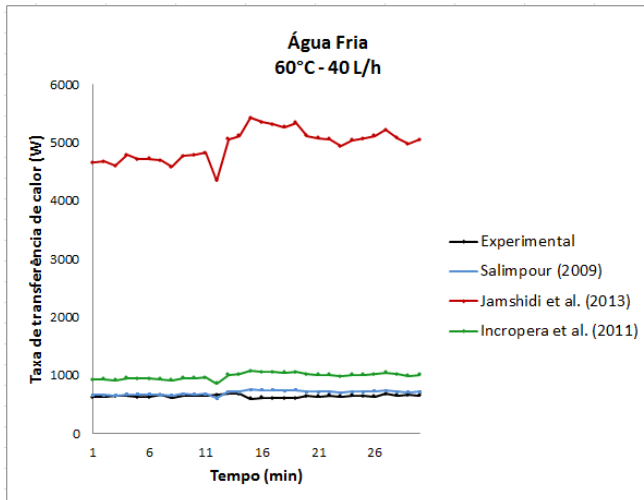
Gráfico D.8 - Comparação à  $T_{q,ent} = 60^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 30\text{ L/h}$ 

Gráfico D.9 - Comparação à  $T_{q,ent} = 60^{\circ}\text{C}$  e  $\dot{V} = 40\text{ L/h}$ 



**APÊNDICE E - Trabalhos apresentados utilizando o TCCTH**

**Título: Experimentos de Transferência de Calor Utilizando Nanofluido de Ouro**

Autores: Fogaça, M.B.; Ferreira, T.P.A.; Behainne, J.J.R.; Gómez, S.L.; Turchiello, R.F.

Evento: X Congresso Nacional de Engenharia Mecânica, 2018, Salvador/BA.

**Título: Adequação de modelo matemático para cálculo de parâmetros de rendimento de trocador de calor do tipo casco e tubo helicoidal**

Autores: Fogaça, M.B.; Lenart, V.M.; Behainne, J.J.R.; Gómez, S.L.; Turchiello, R.F.

Evento: XXI Semana da Física da UEPG, 2018, Ponta Grossa/PR.

**Título: Measurements of Heat Capacity Rates of Water Flow in a Shell and Helically Coiled Tube Heat Exchanger**

Autores: Fogaça, M.B.; Lenart, V.M.; Behainne, J.J.R.; Gómez, S.L.; Turchiello, R.F.

Evento: I Workshop on Dynamics, Control and Applications to Applied Engineering and Life Science, 2018, Ponta Grossa/PR.

**Título: Design and construction of a heat exchanger: use of nanofluids (gold nanoparticles in base fluid)**

Autores: Ferreira, T.P.A.; Fogaça, M.B.; Lenart, V.M.; Behainne, J.J.R.; Gómez, S.L.; Turchiello, R.F.

Evento: 24th ABCM International Congress of Mechanical Engineering, 2017, Curitiba/PR.

**APÊNDICE F - Temperaturas médias de entrada e saída dos fluidos**

Tabela F. 1 - Temperaturas médias de entrada e saída dos fluidos e desvios-padrão

$\dot{V}$ (L/h)	Água Fria		Água Quente		NF <sub>A</sub>		Água Quente		NF <sub>B</sub>		Água Quente	
	T <sub>f,ent</sub> (°C)	T <sub>f,sai</sub> (°C)	T <sub>q,ent</sub> (°C)	T <sub>q,sai</sub> (°C)	T <sub>f,ent</sub> (°C)	T <sub>f,sai</sub> (°C)	T <sub>q,ent</sub> (°C)	T <sub>q,sai</sub> (°C)	T <sub>f,ent</sub> (°C)	T <sub>f,sai</sub> (°C)	T <sub>q,ent</sub> (°C)	T <sub>q,sai</sub> (°C)
20 L/h	24,71 ±0,28	27,50 ±0,37	39,91 ±0,51	30,06 ±0,52	24,91 ±0,40	27,92 ±0,24	40,01 ±0,71	30,29 ±0,27	25,14 ±0,39	27,63 ±0,25	40,04 ±0,29	30,40 ±0,29
20 L/h (II)	24,71 ±0,28	27,50 ±0,37	39,91 ±0,51	30,06 ±0,52	25,70 ±0,24	28,67 ±0,26	39,92 ±0,34	30,61 ±0,32	24,66 ±0,25	27,62 ±0,23	41,79 ±0,35	31,23 ±0,25
30 L/h	24,87 ±0,44	27,91 ±0,69	40,35 ±0,53	32,29 ±0,48	24,23 ±0,29	27,43 ±0,30	40,23 ±0,69	31,02 ±0,30	24,93 ±0,37	28,30 ±0,24	41,48 ±0,28	33,20 ±0,37
30 L/h (II)	24,87 ±0,44	27,91 ±0,69	40,35 ±0,53	32,29 ±0,48	25,32 ±0,20	27,77 ±0,24	41,56 ±0,47	31,18 ±0,21	25,06 ±0,41	28,56 ±0,18	41,08 ±0,32	32,73 ±0,24
40 L/h	25,22 ±0,48	29,08 ±0,45	41,28 ±0,91	33,96 ±0,54	24,68 ±0,33	28,34 ±0,28	40,16 ±0,65	32,38 ±0,30	24,44 ±0,20	29,87 ±0,20	39,90 ±0,33	34,19 ±0,31
40 L/h (II)	25,81 ±0,31	29,18 ±0,40	39,96 ±0,52	33,73 ±0,55	24,42 ±0,23	29,09 ±0,20	39,32 ±0,31	32,22 ±0,18	25,29 ±0,25	27,94 ±0,20	41,13 ±0,42	34,42 ±0,21
20 L/h	23,93 ±0,49	32,56 ±0,31	50,51 ±0,52	37,17 ±0,32	25,24 ±0,27	30,95 ±0,52	50,13 ±0,95	34,17 ±0,61	25,33 ±0,23	28,67 ±0,33	50,20 ±0,50	32,03 ±0,25
20 L/h (II)	25,69 ±0,46	30,30 ±0,59	50,23 ±1,03	34,45 ±0,58	25,21 ±0,20	30,50 ±0,29	50,03 ±0,48	35,56 ±0,27	25,13 ±0,26	28,79 ±0,24	50,28 ±0,67	32,68 ±0,24
30 L/h	24,84 ±0,48	32,61 ±0,37	50,30 ±0,48	38,26 ±0,42	25,22 ±0,33	31,59 ±0,34	50,26 ±0,79	36,62 ±0,33	24,51 ±0,26	28,93 ±0,22	50,43 ±0,55	33,38 ±0,28
30 L/h (II)	25,08 ±0,27	30,36 ±0,38	49,76 ±0,81	36,15 ±0,48	25,38 ±0,29	30,89 ±0,28	49,74 ±0,45	36,62 ±0,29	24,76 ±0,21	29,06 ±0,22	51,33 ±0,80	33,96 ±0,26
40 L/h	24,74 ±0,63	33,15 ±0,70	50,13 ±0,90	39,44 ±0,74	24,98 ±0,32	32,38 ±0,27	49,53 ±0,67	38,10 ±0,46	24,62 ±0,34	30,95 ±0,27	51,82 ±0,18	37,60 ±0,27
40 L/h (II)	24,56 ±0,52	31,57 ±0,36	49,65 ±0,86	37,70 ±0,40	25,43 ±0,24	33,06 ±0,26	50,34 ±0,26	37,96 ±0,25	24,57 ±0,34	31,98 ±0,23	51,67 ±0,68	37,87 ±0,19
20 L/h	25,03 ±0,47	33,53 ±0,55	60,78 ±1,10	39,63 ±0,62	25,49 ±0,20	33,52 ±0,30	60,44 ±0,73	37,88 ±0,31	25,54 ±0,46	32,26 ±0,27	61,29 ±1,04	36,15 ±0,30
20 L/h (II)	24,95 ±0,61	31,64 ±1,32	60,22 ±1,11	35,42 ±1,58	25,41 ±0,22	33,31 ±0,25	59,01 ±0,59	38,41 ±0,22	24,75 ±0,25	31,18 ±0,25	61,81 ±0,33	35,63 ±0,28
30 L/h	25,34 ±0,43	35,39 ±0,43	60,88 ±0,46	42,46 ±0,41	24,54 ±0,31	33,49 ±0,22	59,37 ±0,53	40,00 ±0,30	25,43 ±0,77	31,78 ±0,16	60,63 ±0,81	37,55 ±0,21
30 L/h (II)	25,61 ±0,38	33,83 ±0,51	59,37 ±0,78	39,83 ±0,48	24,63 ±0,33	33,32 ±0,44	60,14 ±0,28	39,29 ±0,19	24,95 ±0,25	31,28 ±0,25	60,98 ±0,40	37,72 ±0,22
40 L/h	24,97 ±0,54	35,10 ±1,22	61,08 ±0,91	43,32 ±0,52	24,88 ±0,41	35,29 ±0,37	59,67 ±0,30	41,87 ±0,28	25,08 ±0,32	32,25 ±0,22	60,82 ±0,33	39,23 ±0,25
40 L/h (II)	25,23 ±0,60	33,53 ±0,73	59,90 ±1,16	41,26 ±0,97	25,62 ±0,30	34,58 ±0,36	59,23 ±0,71	41,95 ±0,21	24,73 ±0,25	32,56 ±0,22	60,58 ±0,26	40,36 ±0,24

**APÊNDICE G** - Código utilizado no *software* EES®

Os valores das temperaturas de entrada e de saída dos fluidos, e das vazões volumétricas dos fluidos quente e frio foram inseridos na tabela paramétrica, gerada a partir das demais variáveis do código.

Onde:

$T_{e\_f}$  = Temperatura de entrada do fluido frio [°C]

$T_{s\_f}$  = Temperatura de saída do fluido frio [°C]

$T_{e\_q}$  = Temperatura de entrada do fluido quente [°C]

$T_{s\_q}$  = Temperatura de saída do fluido quente [°C]

vazão\_f = Vazão volumétrica do fluido frio [L/h]

vazão\_q = Vazão volumétrica do fluido quente [L/h]

Foram utilizados três diferentes códigos, um para cada fluido frio, sendo que os códigos para os nanofluidos diferiram somente no valor da fração volumétrica ( $\phi$ ).

#### Fluido frio: ÁGUA

$T_{m\_f} = (T_{e\_f} + T_{s\_f})/2$  *Temperatura média do fluido frio [°C]*

$T_{m\_q} = (T_{e\_q} + T_{s\_q})/2$  *Temperatura média do fluido quente [°C]*

$T_m = (T_{m\_f} + T_{m\_q})/2$  *Temperatura média de ambos fluidos (para obter a condutividade térmica do tubo de aço) [°C]*  $P_{atmosf} = 101,325$  *Pressão atmosférica [kPa]*

$\rho_{f\_f} = \text{density}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})$  *Massa específica do fluido frio [kg/m³]*

$\rho_{f\_q} = \text{density}(\text{Water}, T=T_{m\_q}, P=P_{atmosf})$  *Massa específica do fluido quente [kg/m³]*

$\mu_{f\_f} = \text{viscosity}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})$  *Viscosidade do fluido frio [Ns/m²]*

$\mu_{f\_q} = \text{viscosity}(\text{Water}, T=T_{m\_q}, P=P_{atmosf})$  *Viscosidade do fluido quente [Ns/m²]*

$cp_{f\_f} = \text{cp}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})$  *Calor específico do fluido frio à pressão constante [kJ/kgK]*

$m_{dot\_f} = \text{vazão}_f / (1000 * 3600) * \rho_{f\_f}$  *Vazão mássica do fluido frio [kg/s]*

$m_{dot\_q} = \text{vazão}_q / (1000 * 3600) * \rho_{f\_q}$  *Vazão mássica do fluido quente [kg/s]*

$\Delta T_f = T_{s\_f} - T_{e\_f}$  *Diferença de temperatura do fluido frio [°C]*

$\Delta T_q = T_{e\_q} - T_{s\_q}$  *Diferença de temperatura do fluido quente [°C]*

$cp_{f\_q} = \text{cp}(\text{Water}, T=T_{m\_q}, P=P_{atmosf})$  *Calor específico do fluido quente à pressão constante [kJ/kgK]*

$C_f = m_{dot\_f} * cp_{f\_f}$  *Capacidade calorífica do fluido frio [kJ/sK]*

$C_q = m_{dot\_q} * cp_{f\_q}$  *Capacidade calorífica do fluido quente [kJ/sK]*

$q_f = m_{dot\_f} * cp_{f\_f} * \Delta T_f$  *Taxa de transferência de calor experimental do fluido frio [kW]*

$q_q = m_{dot\_q} * cp_{f\_q} * \Delta T_q$  *Taxa de transferência de calor experimental do fluido quente [kW]*

$q_{obs} = (q_f + q_q) / 2$  *Taxa de transferência de calor experimental média [kW]*

$k_f = \text{conductivity}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf}) * 10^{(-3)}$  *Condutividade térmica do fluido frio [kW/mK]*

$k_q = \text{conductivity}(\text{Water}, T=T_{m\_q}, P=P_{atmosf}) * 10^{(-3)}$  *Condutividade térmica do fluido quente [kW/mK]*

$Pr_f = (cp_{f\_f} * \mu_{f\_f}) / (k_f)$  *Número de Prantl do fluido frio [adim.]*

$d_{i\_t} = 0,00435$  *Diâmetro interno do tubo [m]*

$d_{e\_b} = 0,0461$  *Diâmetro externo da bobina helicoidal [m]*

$D_{i\_c} = 0,06271$  *Diâmetro interno do casco [m]*

$d_{e\_t} = 0,00635$  *Diâmetro externo do tubo [m]*

$p = 0,00635$  *Passo das espiras da bobina helicoidal [m]*

$L_t = 4$  *Comprimento do tubo helicoidal [m]*

$L_{i\_c} = 0,314$  *Comprimento interno do casco [m]*

$De = Re_f \cdot (d_{i_t}/d_{e_b})^{1/2}$  *Número de Dean [adim.]*  
 $Re_f = (4 \cdot m_{dot_f}) / (\pi \cdot d_{i_t} \cdot \mu_f)$  *Número de Reynolds do fluido frio [adim.]*  
 $Re_{q_S} = (4 \cdot m_{dot_q}) / (\pi \cdot D_{hid_S} \cdot \mu_q)$  *Número de Reynolds do fluido quente (Salimpour) [adim.]*  
 $Re_{q_J} = (4 \cdot m_{dot_q}) / (\pi \cdot D_{hid_J} \cdot \mu_q)$  *Número de Reynolds do fluido quente (Jamshidi) [adim.]*  
 $Re_{q_I} = (4 \cdot m_{dot_q}) / (\pi \cdot D_{hid_I} \cdot \mu_q)$  *Número de Reynolds do fluido quente (Incropera) [adim.]*  
 $Nusselt_f = 0,152 \cdot (De^{0,431}) \cdot (\gamma^{-0,277}) \cdot (Pr_f^{1,06})$  *Número de Nusselt do fluido frio [adim.]*  
 $\gamma = p / (\pi \cdot d_{e_b})$  *Parâmetro adimensional do modelo de Salimpour [adim.]*  
 $h_f = (Nusselt_f \cdot k_f) / d_{i_t}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido frio [kW/m²K]*  
 $Pr_q = (cp_q \cdot \mu_q) / (k_q)$  *Número de Prantl do fluido quente [adim.]*  
 $A_i = \pi \cdot d_{i_t} \cdot L_t$  *Área superficial interna do tubo [m²]*  
 $A_e = \pi \cdot d_{e_t} \cdot L_t$  *Área superficial externa do tubo [m²]*  
 $Nusselt_{q_S} = 19,64 \cdot (Re_{q_S}^{0,513}) \cdot (\gamma^{0,938}) \cdot (Pr_q^{0,129})$  *Número de Nusselt do fluido quente (Salimpour) [adim.]*  
 $Nusselt_{q_J} = 19,64 \cdot (Re_{q_J}^{0,513}) \cdot (\gamma^{0,938}) \cdot (Pr_q^{0,129})$  *Número de Nusselt do fluido quente (Jamshidi) [adim.]*  
 $Nusselt_{q_I} = 19,64 \cdot (Re_{q_I}^{0,513}) \cdot (\gamma^{0,938}) \cdot (Pr_q^{0,129})$  *Número de Nusselt do fluido quente (Incropera) [adim.]*  
 $h_{q_S} = (Nusselt_{q_S} \cdot k_q) / D_{hid_S}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente (Salimpour) [kW/m²K]*  
 $h_{q_J} = (Nusselt_{q_J} \cdot k_q) / D_{hid_J}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente (Jamshidi) [kW/m²K]*  
 $h_{q_I} = (Nusselt_{q_I} \cdot k_q) / D_{hid_I}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente (Incropera) [kW/m²K]*  
 $k_{aço} = \text{conductivity}(\text{Stainless AISI304}; T=T_m; P=P_{atmosf}) \cdot 10^{-3}$  *Condutividade térmica do tubo [kW/mK]*  
 $D_{hid_S} = (D_{i_c}^2 - (\pi \cdot d_{e_b} \cdot (d_{e_t}^2) \cdot (\gamma^{-1}))) / (D_{i_c} + (\pi \cdot d_{e_b} \cdot d_{e_t} \cdot (\gamma^{-1})))$  *Diâmetro hidráulico do casco (Salimpour) [m]*  
 $D_{hid} = (4 \cdot (V_c - V_t)) / (L_{i_c} + L_t) / (\pi \cdot (D_{i_c} + d_{e_t}))$  *Diâmetro hidráulico do casco (Jamshidi) [m]*  
 $D_{hid_I} = D_{i_c} - d_{e_b}$  *Diâmetro hidráulico do casco (Incropera) [m]*  
 $V_c = L_{i_c} \cdot \pi \cdot ((D_{i_c}/2)^2)$  *Volume do casco [m³]*  
 $V_t = L_t \cdot \pi \cdot ((d_{i_t}/2)^2)$  *Volume do tubo [m³]*  
 $1/U_S = (A_e / (A_i \cdot h_f)) + ((A_e \cdot \ln(d_{e_t}/d_{i_t})) / (2 \cdot \pi \cdot k_{aço} \cdot L_t)) + (1/h_{q_S})$  *Coefficiente global de transferência de calor (Salimpour) [kW/m²K]*  
 $1/U_J = (A_e / (A_i \cdot h_f)) + ((A_e \cdot \ln(d_{e_t}/d_{i_t})) / (2 \cdot \pi \cdot k_{aço} \cdot L_t)) + (1/h_{q_J})$  *Coefficiente global de transferência de calor (Jamshidi) [kW/m²K]*  
 $1/U_I = (A_e / (A_i \cdot h_f)) + ((A_e \cdot \ln(d_{e_t}/d_{i_t})) / (2 \cdot \pi \cdot k_{aço} \cdot L_t)) + (1/h_{q_I})$  *Coefficiente global de transferência de calor (Incropera) [kW/m²K]*  
 $DELTA_{T_{ml}} = ((T_{e_q} - T_{s_f}) - (T_{s_q} - T_{e_f})) / \ln((T_{e_q} - T_{s_f}) / (T_{s_q} - T_{e_f}))$  *Média logarítmica das diferenças de temperatura [C]*  
 $q_S = U_S \cdot A_e \cdot DELTA_{T_{ml}}$  *Taxa de transferência de calor calculada (Salimpour) [kW]*  
 $q_J = U_J \cdot A_e \cdot DELTA_{T_{ml}}$  *Taxa de transferência de calor calculada (Jamshidi) [kW]*  
 $q_I = U_I \cdot A_e \cdot DELTA_{T_{ml}}$  *Taxa de transferência de calor calculada (Incropera) [kW]*  
 $erro_S = ((q_S - q_{obs}) / q_{obs}) \cdot 100$  *Erro entre as taxas de transferência de calor calculada (Salimpour) e experimental [%]*  
 $erro_J = ((q_J - q_{obs}) / q_{obs}) \cdot 100$  *Erro entre as taxas de transferência de calor calculada (Jamshidi) e experimental [%]*  
 $erro_I = ((q_I - q_{obs}) / q_{obs}) \cdot 100$  *Erro entre as taxas de transferência de calor calculada (Incropera) e experimental [%]*  
 $q_{max} = C_q \cdot (T_{e_q} - T_{e_f})$  *Taxa de transferência de calor máxima [kW]*  
 $\epsilon = q_{obs} / q_{max}$  *Efetividade do trocador de calor [adim.]*

Fluido frio: NANOFLUIDO A

$T_{m_f} = (T_{e_f} + T_{s_f}) / 2$  *Temperatura média do fluido frio [°C]*

$T_{m\_q}=(T_{e\_q}+T_{s\_q})/2$  *Temperatura média do fluido quente [°C]*  
 $T_{m}=(T_{m\_f}+T_{m\_q})/2$  *Temperatura média de ambos fluidos (para obter a condutividade térmica do tubo de aço) [°C]*  
 $P_{atmosf}=101,325$  *Pressão atmosférica [kPa]*  
 $\rho_{fb}=\text{density}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})$  *Massa específica do fluido-base [kg/m³]*  
 $\rho_{q}=\text{density}(\text{Water}, T=T_{m\_q}, P=P_{atmosf})$  *Massa específica do fluido quente [kg/m³]*  
 $\mu_{fb}=\text{viscosity}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})$  *Viscosidade do fluido-base [Ns/m²]*  
 $\mu_{q}=\text{viscosity}(\text{Water}, T=T_{m\_q}, P=P_{atmosf})$  *Viscosidade do fluido quente [Ns/m²]*  
 $cp_{fb}=\text{cp}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})$  *Calor específico do fluido-base à pressão constante [kJ/kgK]*  
 $m_{dot\_f}=\text{vazão}_f/(1000*3600)*\rho_{fb}$  *Vazão mássica do nanofluido [kg/s]*  
 $m_{dot\_q}=\text{vazão}_q/(1000*3600)*\rho_{q}$  *Vazão mássica do fluido quente [kg/s]*  
 $d_{np}=14*10^{(-9)}$  *Diâmetro da nanopartícula [m]*  
 $M=\text{molarmass}(\text{Water})$  *Massa molar do fluido-base [g/mol]*  
 $T_{293K}=19,5$  *Temperatura necessária para cálculo de propriedade do nanofluido [°C]*  
 $\phi=1,63*10^{(-5)}$  *Fração volumétrica de nanopartículas do Nanofluido A*  
 $N=6,022*10^{(23)}$  *Constante de Avogadro [mol<sup>-1</sup>]*  
 $\rho_{fb\_0}=\text{density}(\text{Water}, T=T_{293K}, P=P_{atmosf})$  *Massa específica do fluido-base a 293 K [kg/m³]*  
 $\rho_{np}=\text{density}(\text{Gold}, T=T_{m\_f})$  *Massa específica da nanopartícula [kg/m³]*  
 $cp_{np}=\text{cp}(\text{Gold}, T=T_{m\_f})$  *Calor específico da nanopartícula à pressão constante [kJ/kgK]*  
 $\rho_{f}=\phi*(1-\phi)*\rho_{fb}+(\phi*\rho_{np})$  *Massa específica do nanofluido [kg/m³]*  
 $cp_{f}=\phi*((1-\phi)*(cp_{fb}))+(\phi*\rho_{np}*cp_{np})/\rho_{f}$  *Calor específico do nanofluido à pressão constante [kJ/kgK]*  
 $d_{fb}=\phi*((6*M)/(N*\phi*\rho_{fb\_0}))^{(1/3)}$  *Diâmetro equivalente da molécula de fluido-base [m]*  
 $\mu_{f}=\mu_{fb}/(1-(34,87*((d_{np}/d_{fb})^{(-0,3)}))*\phi^{(1,03)})$  *Viscosidade do nanofluido [Ns/m²]*  
 $\Delta T_f=T_{s\_f}-T_{e\_f}$  *Diferença de temperatura do fluido frio [C]*  
 $\Delta T_q=T_{e\_q}-T_{s\_q}$  *Diferença de temperatura do fluido quente [C]*  
 $cp_q=\text{cp}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})$  *Calor específico do fluido quente à pressão constante [kJ/kgK]*  
 $C_f=m_{dot\_f}*cp_f$  *Capacidade calorífica do fluido frio [kJ/sK]*  
 $C_q=m_{dot\_q}*cp_q$  *Capacidade calorífica do fluido quente [kJ/sK]*  
 $q_f=m_{dot\_f}*cp_f*\Delta T_f$  *Taxa de transferência de calor experimental do fluido frio [kW]*  
 $q_q=m_{dot\_q}*cp_q*\Delta T_q$  *Taxa de transferência de calor experimental do fluido quente [kW]*  
 $q_{obs}=(q_f+q_q)/2$  *Taxa de transferência de calor experimental média [kW]*  
 $k_{fb}=\text{conductivity}(\text{Water}, T=T_{m\_f}, P=P_{atmosf})*10^{(-3)}$  *Condutividade térmica do fluido-base [kW/mK]*  
 $k_q=\text{conductivity}(\text{Water}, T=T_{m\_q}, P=P_{atmosf})*10^{(-3)}$  *Condutividade térmica do fluido quente [kW/mK]*  
 $k_{np}=\text{conductivity}(\text{Gold}, T=T_{m\_f})*10^{(-3)}$  *Condutividade térmica da nanopartícula [kW/mK]*  
 $k_f=k_{estatico}+k_{browniano}$  *Condutividade térmica do nanofluido [kW/mK]*  
 $k_{estatico}=(k_{fb})*((k_{np}+(2*k_{fb})+(2*(k_{np}-k_{fb})*\phi)))/((k_{np}+(2*k_{fb})-(k_{np}-k_{fb})*\phi))$   
*Condutividade térmica estática [kW/mK]*  
 $k_{browniano}=(5*10^{(4)})*\beta*\phi*\rho_{fb}*cp_{fb}*(((\kappa_B*(T_{m\_f}+273,5))/(\rho_{np}*d_{np}))^{(1/2)})$   
*Condutividade térmica associada ao movimento Browniano [kW/mK]*  
 $\kappa_B=1,3806503*10^{(-26)}$  *Constante de Boltzmann [kJ/K]*  
 $\beta=0,0137*(100*\phi)^{(-0,8229)}$  *Coefficiente de expansão térmica das nanopartículas [K<sup>-1</sup>]*  
 $Pr_f=(cp_f*\mu_f)/(k_f)$  *Número de Prantl do fluido frio [adim.]*  
 $d_{i\_t}=0,00435$  *Diâmetro interno do tubo [m]*  
 $d_{e\_b}=0,0461$  *Diâmetro externo da bobina helicoidal [m]*  
 $D_{i\_c}=0,06271$  *Diâmetro interno do casco [m]*  
 $d_{e\_t}=0,00635$  *Diâmetro externo do tubo [m]*  
 $p=0,00635$  *Passo das espiras da bobina helicoidal [m]*  
 $L_t=4$  *Comprimento do tubo helicoidal [m]*  
 $L_{i\_c}=0,314$  *Comprimento interno do casco [m]*  
 $De=Re_f*(d_{i\_t}/d_{e\_b})^{(1/2)}$  *Número de Dean [adim.]*  
 $Re_f=(4*m_{dot\_f})/(\phi*\pi*d_{i\_t}*\mu_f)$  *Número de Reynolds do fluido frio [adim.]*  
 $Re_{q\_S}=(4*m_{dot\_q})/(\phi*\pi*D_{hid\_S}*\mu_q)$  *Número de Reynolds do fluido quente (Salimpour) [adim.]*  
 $Re_{q\_J}=(4*m_{dot\_q})/(\phi*\pi*D_{hid\_J}*\mu_q)$  *Número de Reynolds do fluido quente (Jamshidi) [adim.]*  
 $Re_{q\_I}=(4*m_{dot\_q})/(\phi*\pi*D_{hid\_I}*\mu_q)$  *Número de Reynolds do fluido quente (Incropera) [adim.]*  
 $Nusselt_f=0,152*(De^{(0,431)})*(gamma^{(-0,277)})*(Pr_f^{(1,06)})$  *Número de Nusselt do fluido frio [adim.]*  
 $gamma=p/(\phi*\pi*d_{e\_b})$  *Parâmetro adimensional do modelo de Salimpour [adim.]*  
 $h_f=(Nusselt_f*k_f)/d_{i\_t}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido frio [kW/m²K]*  
 $Pr_q=(cp_q*\mu_q)/(k_q)$  *Número de Prantl do fluido quente [adim.]*  
 $A_i=\phi*\pi*d_{i\_t}*L_t$  *Área superficial interna do tubo [m²]*



$A_e = \pi \cdot d_e \cdot L_t$  *Área superficial externa do tubo [m<sup>2</sup>]*  
 $Nusselt_{q_S} = 19,64 \cdot (Re_{q_S})^{0,513} \cdot (\gamma)^{0,938} \cdot (Pr_q)^{0,129}$  *Número de Nusselt do fluido quente (Salimpour) [adim.]*  
 $Nusselt_{q_J} = 19,64 \cdot (Re_{q_J})^{0,513} \cdot (\gamma)^{0,938} \cdot (Pr_q)^{0,129}$  *Número de Nusselt do fluido quente (Jamshidi) [adim.]*  
 $Nusselt_{q_I} = 19,64 \cdot (Re_{q_I})^{0,513} \cdot (\gamma)^{0,938} \cdot (Pr_q)^{0,129}$  *Número de Nusselt do fluido quente (Incropera) [adim.]*  
 $h_{q_S} = (Nusselt_{q_S} \cdot k_q) / D_{hid_S}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente (Salimpour) [kW/m<sup>2</sup>K]*  
 $h_{q_J} = (Nusselt_{q_J} \cdot k_q) / D_{hid_J}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente (Jamshidi) [kW/m<sup>2</sup>K]*  
 $h_{q_I} = (Nusselt_{q_I} \cdot k_q) / D_{hid_I}$  *Coefficiente de transferência de calor por convecção do fluido quente (Incropera) [kW/m<sup>2</sup>K]*  
 $k_{aço} = \text{conductivity(Stainless AISI304; } T=T_m; P=P_{atmosf}) \cdot 10^{-3}$  *Condutividade térmica do tubo [kW/mK]*  
 $D_{hid_S} = (D_i \cdot c^2 - (\pi \cdot d_e \cdot b \cdot (d_e \cdot t^2)) \cdot (\gamma^{-1})) / (D_i \cdot c + (\pi \cdot d_e \cdot b \cdot d_e \cdot t \cdot (\gamma^{-1})))$  *Diâmetro hidráulico do casco (Salimpour) [m]*  
 $D_{hid_J} = (4 \cdot (V_c - V_t) / (L_i \cdot c + L_t)) / (\pi \cdot (D_i \cdot c + d_e \cdot t))$  *Diâmetro hidráulico do casco (Jamshidi) [m]*  
 $D_{hid_I} = D_i \cdot c - d_e \cdot b$  *Diâmetro hidráulico do casco (Incropera) [m]*  
 $V_c = L_i \cdot c \cdot \pi \cdot ((D_i \cdot c / 2)^2)$  *Volume do casco [m<sup>3</sup>]*  
 $V_t = L_t \cdot \pi \cdot ((d_i \cdot t / 2)^2)$  *Volume do tubo [m<sup>3</sup>]*  
 $1/U_S = (A_e / (A_i \cdot h_f)) + ((A_e \cdot \ln(d_e \cdot t / d_i \cdot t)) / (2 \cdot \pi \cdot k_{aço} \cdot L_t)) + (1/h_{q_S})$  *Coefficiente global de transferência de calor (Salimpour) [kW/m<sup>2</sup>K]*  
 $1/U_J = (A_e / (A_i \cdot h_f)) + ((A_e \cdot \ln(d_e \cdot t / d_i \cdot t)) / (2 \cdot \pi \cdot k_{aço} \cdot L_t)) + (1/h_{q_J})$  *Coefficiente global de transferência de calor (Jamshidi) [kW/m<sup>2</sup>K]*  
 $1/U_I = (A_e / (A_i \cdot h_f)) + ((A_e \cdot \ln(d_e \cdot t / d_i \cdot t)) / (2 \cdot \pi \cdot k_{aço} \cdot L_t)) + (1/h_{q_I})$  *Coefficiente global de transferência de calor (Incropera) [kW/m<sup>2</sup>K]*  
 $\Delta T_{ml} = ((T_{e_q} - T_{s_f}) - (T_{s_q} - T_{e_f})) / \ln((T_{e_q} - T_{s_f}) / (T_{s_q} - T_{e_f}))$  *Média logarítmica das diferenças de temperatura [C]*  
 $q_S = U_S \cdot A_e \cdot \Delta T_{ml}$  *Taxa de transferência de calor calculada (Salimpour) [kW]*  
 $q_J = U_J \cdot A_e \cdot \Delta T_{ml}$  *Taxa de transferência de calor calculada (Jamshidi) [kW]*  
 $q_I = U_I \cdot A_e \cdot \Delta T_{ml}$  *Taxa de transferência de calor calculada (Incropera) [kW]*  
 $erro_S = ((q_S - q_{obs}) / q_{obs}) \cdot 100$  *Erro entre as taxas de transferência de calor calculada (Salimpour) e experimental [%]*  
 $erro_J = ((q_J - q_{obs}) / q_{obs}) \cdot 100$  *Erro entre as taxas de transferência de calor calculada (Jamshidi) e experimental [%]*  
 $erro_I = ((q_I - q_{obs}) / q_{obs}) \cdot 100$  *Erro entre as taxas de transferência de calor calculada (Incropera) e experimental [%]*  
 $q_{max} = C_q \cdot (T_{e_q} - T_{e_f})$  *Taxa de transferência de calor máxima [kW]*  
 $\epsilon = q_{obs} / q_{max}$  *Efetividade do trocador de calor [adim.]*

## **ANEXO A - Propiedades de alguns nanofluidos**

A seguir são apresentados resultados de estudos experimentais de diversos autores, que constam da publicação de Rebay, Kakaç e Cotta (2016).

**Tabela Anexo A. 1 - Condutividade térmica experimental de nanofluidos e fluidos-base**

Fluido-base	Nanopartículas	Fração volumétrica (%)	Incremento (%)
Água pura (0,613 W/m.K)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,3	1,44
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,33 – 3	9,7
	TiO <sub>2</sub>	0,2 – 2	7
	Fe	0 – 4	14,9 – 25
	Ag	0,3 – 0,9	27 – 80
	CuO	1	5
	SiO <sub>2</sub>	1 – 4	23
Etileno Glicol puro (0,253 W/m.K)	AlN	1 – 10	38,71
	Cu	0,3 – 0,5	46
	Al <sub>2</sub> Cu	2,5	120
	CuO	1	9
	Ag	1000 – 10000 ppm	18
	Diamante	0,1 – 1	17,23

**Fonte: Rebay, Kakaç e Cotta (2016, p. 59)**

**Tabela Anexo A. 2 - Viscosidade relativa experimental de nanofluidos e fluidos-base**

<b>Fluido-base</b>	<b>Nanopartículas</b>	<b>Fração volumétrica (%)</b>	<b>Viscosidade Relativa (Máxima)</b>
Água pura (0,00089 Pa.s)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,01 – 0,3	1,029
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 – 5	2,36
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (36 nm)	0 – 13	4,5
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0 – 6	1,6 – 1,8
	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (< 50 nm)	0,13 – 2,9	1,3
	TiO <sub>2</sub>	0,2 – 2	1,15
	Fe	0 – 4	11,25
	CuO	1 – 6,12	1,06 – 1,43
	SiC	4	1,8
	Etileno Glicol puro (0,253 W/m.K)	AlN	1 – 10
TiN		0,1 – 1,8	1,7
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>		0 – 6	1,22
CuO		0 – 6	1,24
ZnO		0,2 – 5	1,15
Diamante		1	1,01

**Fonte: Rebay, Kakaç e Cotta (2016, p. 57)**