

UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ

DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE MECÂNICA

CURSO DE ENGENHARIA MECÂNICA

THAÍS PIREZ ALVES FERREIRA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR: USO
DE NANOFLUIDOS (NANOPARTÍCULAS DE OURO EM FLUIDO
BASE) COMO LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

PONTA GROSSA

2015

THAÍS PIREZ ALVES FERREIRA

**PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR: USO
DE NANOFLUIDOS (NANOPARTÍCULAS DE OURO EM FLUIDO
BASE) COMO LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação, apresentado à disciplina de TCC, do Curso Superior de Engenharia Mecânica do Departamento Acadêmico de Engenharia Mecânica –DAEM- da Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Mecânica.

Orientadora: Profa. Dra. Rozane de F. Turchiello Gomez.

PONTA GROSSA

2015



TERMO DE APROVAÇÃO

PROJETO E CONSTRUÇÃO DE UM TROCADOR DE CALOR: USO DE NANOFLUIDOS (NANOPARTÍCULAS DE OURO EM FLUIDO BASE) COMO LÍQUIDO DE ARREFECIMENTO

por

THAÍS PIREZ ALVES FERREIRA

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi apresentado em 26 de novembro de 2015 como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Mecânica. A candidata foi arguida pela Banca Examinadora composta pelos professores abaixo assinados. Após deliberação, a Banca Examinadora considerou o trabalho aprovado.

Profa. Dra. Rozane de Fátima Turchiello Gómez
Orientadora

Prof. Dr. Jhon Jairo Ramirez Behainne
Membro Titular

Prof. Dr. Sergio Leonardo Gómez (UEPG)
Membro Titular

Prof. Marcos Eduardo Soares
Responsável pelos TCC

Prof. Dr. Laercio Javarez Junior
Coordenador do Curso

Aos meus pais, que abriram mão da convivência com sua caçula em prol da realização deste sonho.

Ao meu irmão, que me disse que Cálculo I não era difícil.

AGRADECIMENTOS

Agradeço antes de tudo a Deus, que me presenteou com diversas bênçãos que me permitiram chegar onde estou, que me proveu de força e coragem para superar obstáculos, luz para iluminar meus passos e sabedoria para minhas escolhas.

Agradeço de todo meu coração, aos meus pais, Valdeir e Stela, que mesmo há mais de 1000 km compartilharam de minhas alegrias e tristezas, e sem quem eu não poderia realizar nenhuma das minhas conquistas. Obrigada por me apoiarem, por me fazerem forte e por sempre terem uma dose de sabedoria em momentos de dificuldades. Palavras não expressam o quanto vocês significam para mim. Obrigada por, literalmente, tudo.

Agradeço ao meu irmão, que me inspirou a seguir o caminho da Engenharia e que, em meio a sua quietude e brincadeiras sem graças, sempre demonstrou seu apoio e amor. Obrigada, Nan.

Agradeço ao CNPq pela verba disponibilizada ao projeto de iniciação científica 420150/2013-7, “Nanofluidos (nanopartículas/grafeno) como líquido de arrefecimento: produção e caracterização física”, princípio do desenvolvimento deste trabalho de conclusão de curso e que me iniciou no mundo das pesquisas.

Agradeço ao Grupo de Fenômenos Fototérmicos em Fluidos Complexos, da UEPG, por nos permitirem utilizar seu espaço para o desenvolvimento da pesquisa e por fornecerem as nanopartículas de ouro utilizadas na realização deste trabalho.

Agradeço às amigas formadas, sejam elas no campi de Cornélio Procópio, Anderson e Matheus, companheiros que espero levar para a vida, sejam elas no campi de Ponta Grossa, Fernanda, Gabriela, Alisson, Ana, Rafael, Cory e Humberto, dentre outros, que sempre botaram um sorriso no meu rosto e compartilharam dos meus problemas, universitários ou não.

Agradeço a Prof^ª. Dr^ª. Rozane e Prof. Dr. Jhon que me permitiram ingressar no mundo da pesquisa e me guiaram com grandiosa sabedoria, me ajudando a evoluir como aluna, profissional e como pessoa. Obrigada por me auxiliarem a encontrar o que mais me encanta na Engenharia Mecânica e por terem me permitido compartilhar de seus conhecimentos.

“Todo ser vivo é um motor preso às engrenagens do Universo. E, apesar de parecer que somos afetados apenas pelo maquinário vizinho, a esfera de influência externa se estende infinitamente.”

(Nikola Tesla)

RESUMO

FERREIRA, Thaís Pirez Alves. **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.

Este trabalho visou projetar um trocador de calor que utiliza nanofluidos de ouro em fluido base como líquido de arrefecimento. Traz as teorias sobre trocadores de calor e nanofluidos, assim como o modelamento matemático necessário para a concepção de um protótipo funcional para este trabalho. Buscou proporcionar uma ferramenta a mais para o estudo sobre as características únicas em transferência de calor existentes nos nanofluidos. Apresentou o modelamento 3D e a construção de um protótipo para comprovar a eficiência do uso de um nanofluido de ouro como líquido de arrefecimento em comparação aos já existentes no mercado. Os resultados encontrados, provenientes de testes preliminares realizados com água destilada, etileno glicol e nanofluido de ouro, demonstraram-se não conformes com a bibliografia levantada. No entanto, serviram para o levantamento de modificações a serem realizadas no protótipo, que permitirão a utilização do mesmo em pesquisas com nanofluidos.

Palavras-chave: Trocadores de Calor. Nanofluidos. Líquidos de arrefecimento. Transferência de Calor. Nanopartículas de Ouro.

ABSTRACT

FERREIRA, Thaís Pirez Alves. **Design and construction of a heat exchanger: use of nanofluidics (gold nanoparticles in base fluid) as coolant.** 2015. 72 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Mecânica) – Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Ponta Grossa, 2015.

This study aims to design a heat exchanger that uses gold nanofluids as coolant. It brings the theories about heat exchangers and nanofluids, as well as the mathematical modeling needed for the conception of a functional prototype for this paper. It aims to provide an extra tool for the study on the unique characteristics of heat transfer in nanofluids. It presents the 3D modeling and the construction of a prototype to demonstrate the efficiency of gold nanofluids as coolant compared to those already existent on the market. The results obtained from preliminary tests with distilled water, ethylene glycol and gold nanofluids, proved to be inconsistent with the literature. However, these results served on the survey of necessary modifications to be applied on the prototype, which will allow it to be used on researches with nanofluids.

Keywords: Heat exchangers. Nanofluids. Coolants. Heat Exchange. Gold Nanoparticles.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – PUBLICAÇÕES SOBRE NANOFLÚIDOS AO LONGO DO ANOS 2000. ...	11
FIGURA 2 – DEPENDÊNCIA DA CONDUTIVIDADE TÉRMICA PARA DIFERENTES FLUIDOS BASE, RETIRADA DO ARTIGO DE LEE ET AL., (2007).	20
FIGURA 3 – DENSÍMETRO COM CHUMBO EM SUA BASE.....	26
FIGURA 4 – GRADUAÇÃO DO DENSÍMETRO EM G/ML.	26
FIGURA 5 – EXEMPLO DE MEDIÇÃO DA DENSIDADE DE UM NANOFLUIDO. A) DENSÍMETRO POSICIONADO DENTRO DA PROVETA. B) DENSÍMETRO EM EQUILÍBRIO COM O FLUIDO. C) LEITURA DA DENSIDADE.....	27
FIGURA 6 – TABELA MONTADA PARA AUXILIAR NOS CÁLCULOS.....	35
FIGURA 7 – DESENHO EXPLICATIVO SOBRE AS DIMENSÕES DO TROCADOR DE CALOR.....	38
QUADRO 1 – OBSERVAÇÕES	38
FIGURA 8 – SERPENTINA.....	41
FIGURA 9 – CASCO FECHADO	42
FIGURA 10 – TROCADOR MONTADO.....	43
FIGURA 11 – ESQUEMA REPRESENTATIVO DA MONTAGEM DO SISTEMA DO TROCADOR DE CALOR	44
FIGURA 12 – SERPENTINA DO TROCADOR DE CALOR	46
FIGURA 13 – SISTEMA DE CONTROLE IMPROVISADO, MONTADO APENAS PARA VERIFICAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS.	46
FIGURA 14 – TROCADOR DE CALOR, SEM REVESTIMENTO TÉRMICO, EM FASE DE TESTE DE FUNCIONAMENTO.....	47
FIGURA 15 – SISTEMA MONTADO, SENDO: 1) RESERVATÓRIO DE NANOFLUIDO; 2) TROCADOR DE CALOR; 3) CENTRAL DE CONTROLE DE TEMPERATURAS E 4) ROTÂMETRO.	48

FIGURA 16 – VISTA SUPERIOR DO SISTEMA MONTADO, SENDO: 1) RESERVATÓRIO DE NANOFLUIDO; 2) TROCADOR DE CALOR; 3) CENTRAL DE CONTROLE DE TEMPERATURAS; 4) ROTÂMETRO; A) SAÍDA DO NANOFLUIDO; B) ENTRADA DO NANOFLUIDO; C) ENTRADA DO FLUIDO FRIO E D) SAÍDA DO FLUIDO FRIO.	49
FIGURA 17 – VISTA DO SISTEMA MONTADO, SENDO: 1) RESERVATÓRIO DE NANOFLUIDO; 2) TROCADOR DE CALOR; 3) CENTRAL DE CONTROLE DE TEMPERATURAS; C) ENTRADA DO FLUIDO FRIO E D) SAÍDA DO FLUIDO FRIO... ..	50
FIGURA 18 – VISTA LATERAL DIREITA DO SISTEMA MONTADO, SENDO: 1) RESERVATÓRIO DE NANOFLUIDO; 4) ROTÂMETRO; A) SAÍDA DO NANOFLUIDO E D) SAÍDA DO FLUIDO FRIO.....	51
FIGURA 19 – VISTA LATERAL ESQUERDA DO SISTEMA MONTADO, SENDO: B) ENTRADA DO NANOFLUIDO; C) ENTRADA DO FLUIDO FRIO E D) SAÍDA DO FLUIDO FRIO.	52
FIGURA 20 – COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CADA FLUIDO CONSIDERANDO O CALOR ESPECÍFICO CALCULADO.	67
FIGURA 21 – COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR DE CADA FLUIDO CONSIDERANDO O CALOR ESPECÍFICO TABELADO.	69

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – EXPRESSÕES PARA O CÁLCULO DA EFETIVIDADE DE DIFERENTES TIPOS DE TROCADORES DE CALOR.....	33
TABELA 2 - RELAÇÕES DO NUT PARA DIFERENTES TIPOS DE TROCADORES DE CALOR	34
TABELA 3 – PROPRIEDADES DOS FLUIDOS	36
TABELA 4 – DIMENSÕES ESTIMADAS DO PROTÓTIPO.....	37
TABELA 5 – DADOS OBTIDOS NO MEMORIAL DE CÁLCULO	39
TABELA 6 – ERROS DOS TERMOPARES E DO CONTROLADOR DE TEMPERATURA	53
TABELA 7 – VAZÕES OBTIDAS PARA O FLUIDO FRIO – TESTE ÁGUA DESTILADA	57
TABELA 8 – PROPRIEDADES DOS FLUIDOS NA TEMPERATURA MÉDIA DE ENTRADA – TESTE ÁGUA DESTILADA.....	57
TABELA 9 – RESULTADOS OBTIDOS PARA O TESTE 1 COM ÁGUA DESTILADA	58
TABELA 10 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O TESTE 2 COM ÁGUA DESTILADA.. ..	58
TABELA 11 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O TESTE 3 COM ÁGUA DESTILADA.	59
TABELA 12 - PROPRIEDADES DOS FLUIDOS NA TEMPERATURA MÉDIA DE ENTRADA – TESTE ETILENO GLICOL	59
TABELA 13 – VAZÕES OBTIDAS PARA O FLUIDO FRIO – TESTE ETILENO GLICOL	60
TABELA 14 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O TESTE 1 COM ETILENO GLICOL ..	60
TABELA 15 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O TESTE 2 COM ETILENO GLICOL ..	61
TABELA 16 - RESULTADOS OBTIDOS PARA O TESTE 3 COM ETILENO GLICOL ..	61

TABELA 17 - PROPRIEDADES DOS FLUIDOS NA TEMPERATURA MÉDIA DE ENTRADA – ÁGUA DESTILADA	62
TABELA 18 – DADOS OBTIDOS DA ÁGUA DESTILADA NO TESTE DE TROCA DE CALOR	63
TABELA 19 - PROPRIEDADES DOS FLUIDOS NA TEMPERATURA MÉDIA DE ENTRADA – ETILENO GLICOL.....	63
TABELA 20 – DADOS OBTIDOS DO ETILENO GLICOL NO TESTE DE TROCA DE CALOR	64
TABELA 21 – CARACTERÍSTICAS DAS NP _{AU} UTILIZADAS	64
TABELA 22 - PROPRIEDADES DOS FLUIDOS NA TEMPERATURA AMBIENTE – TESTE NF 0,11	65
TABELA 23 – DADOS OBTIDOS DO NANOFLUIDO ($\phi = 0,11$) NO TESTE DE TROCA DE CALOR	65
TABELA 24 – COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONSIDERANDO O CALOR ESPECÍFICO CALCULADO	67
TABELA 25 – COEFICIENTE GLOBAL DE TRANSFERÊNCIA DE CALOR CONSIDERANDO O CALOR ESPECÍFICO TABELADO.	68

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E ACRÔNIMOS

A – Área (m^2)

C – Taxa de capacidade calorífica do fluido (W/C)

c – Calor específico (J/kg.C)

\bar{c} – Valor de c_p calculado para os valores médios de ΔT_f e ΔT_q (kJ/kgK)

D – Diâmetro (m)

d – Diâmetro (nm)

De – Número de Dean

e – Espessura do tubo (m)

f – Fator de atrito (m^{-1})

F_c – Fator de correção da leitura do rotâmetro

GFFFCx – Grupo de Fenômenos Fototérmicos em Fluidos Complexos

H – Altura do trocador de calor (m)

K – Constante de Boltzmann (J/K)

k – Condutividade térmica (W/mK)

L – Comprimento total da serpentina (m)

M – Peso molecular

\dot{m} – vazão mássica (kg/s)

N – Número de Avogadro

NPAu – Nanopartículas de ouro

NF – Nanofluido

NUT – Número de Unidades de Transferência

Pr – Número de Prandtl

Q – Calor trocado (kJ/kgK)

q – Taxa de transferência de calor real (W)

Re – Número de Reynolds

R – Raio (nm)

T – Temperatura (°C)

T_{s,q} – Temperatura de saída do fluido quente (°C)

U – Coeficiente global de transferência de calor (W/ m² C)

UEPG – Universidade Estadual de Ponta Grossa

V – Vazão volumétrica (m³/s)

Letras gregas e Símbolos

ε – Efetividade

$\overline{\delta c_p}$ – Erro associado ao cálculo do cp em função das temperaturas (kJ/kgK)

$\overline{\delta T_q}$ – Erro associado à temperatura quente medida. (°C)

$\overline{\delta T_f}$ – Erro associado à temperatura fria medida. (°C)

$\overline{\Delta T_q}$ – Média da variação da temperatura quente (°C)

$\overline{\Delta T_f}$ – Média da variação da temperatura fria (°C)

ρ – Densidade (kg/m³)

μ – Viscosidade dinâmica (kg/s.m)

φ – Concentração volumétrica das partículas (%)

δ – Razão entre o diâmetro interno do tubo e o diâmetro interno da serpentina

#passes – Número de passes

\dot{V} – Vazão volumétrica (L/h)

Subscritos

casco – Referente ao casco do trocador de calor

eff – Efetivo

externo serpentina – Referente à medida externa da serpentina

f – Referente ao fluido frio

fb – Fluido base, equivalente da molécula do fluido base

interno serpentina – Referente à medida interna da serpentina

lida – Referente à vazão lida no rotâmetro

máx – Valor máximo/maior obtido

min – Valor mínimo/menor obtido

nf – Referente à nanofluido

np – Referente à nanopartículas

obtida – Referente à vazão do fluido frio

p – Referente à pressão constante

q – Referente ao fluido quente

r – Referente à razão entre as taxas de capacidade calorífica

real – Referente à vazão corrigida do rotâmetro

tubo – Relativo ao tubo que compõe a serpentina

tubo real – Relativo ao tubo menos sua espessura

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA	13
1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS	14
1.3 OBJETIVOS	14
1.3.1 Objetivo Geral.....	14
1.3.2 Objetivos Específicos	14
1.4 JUSTIFICATIVA.....	15
1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO	15
2 TROCADORES DE CALOR E NANOFLUIDOS	16
2.1 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS NANOFLUIDOS NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR	17
2.1.1 Condutividade Térmica dos Nanofluidos.....	18
2.1.1.1 Composição da partícula.....	18
2.1.1.2 Tamanho da partícula	19
2.1.1.3 Forma da partícula.....	19
2.1.1.4 Composição do fluido base.....	19
2.1.1.5 Concentração Volumétrica	20
2.1.1.6 Temperatura	21
2.1.1.7 Outros fatores.....	21
2.2 A OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS NANOFLUIDOS	22
2.2.1 Síntese Das Nanopartículas	22
2.2.2 Análise das Propriedades Termofísicas Dos Nanofluidos.....	22
2.2.2.1 Método analítico.....	22
2.2.2.1.1 <i>Densidade do nanofluido</i>	23
2.2.2.1.2 <i>Viscosidade dinâmica</i>	23
2.2.2.1.3 <i>Condutividade térmica efetiva do nanofluido</i>	23
2.2.2.1.4 <i>Números adimensionais (Re, De, Pr)</i>	24
2.2.2.1.5 <i>Coefficiente de transferência de calor</i>	25
2.2.2.2 Método empírico	25
2.2.2.2.1 <i>Densidade</i>	26
2.2.2.2.2 <i>Calor específico</i>	27
2.2.2.2.3 <i>Caracterização física dos nanofluidos</i>	28
3 MODELAGEM MATEMÁTICA DO PROTÓTIPO DO TROCADOR DE CALOR	30

3.1 O MÉTODO DA EFETIVIDADE PARA O CÁLCULO DO NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERÊNCIA – NUT	30
3.1.1 Equações Fundamentais	30
3.1.1.1 Taxa de transferência de calor máxima possível (q_{max}).....	30
3.1.1.2 Efetividade (ϵ).....	31
3.1.1.3 Número de unidades de transferência (NUT)	32
3.2 CÁLCULOS REALIZADOS PARA O PROJETO DO PROTÓTIPO	35
3.2.1 Composição da Tabela	36
3.2.1.1 Propriedades.....	36
3.2.1.2 Dimensões do trocador	37
3.2.2 Informações Obtidas.....	39
3.3 MODELAGEM GRÁFICA DO PROTÓTIPO	41
3.3.1 Projeto do Sistema de Controle.....	43
3.4 MATERIAIS E MÉTODOS PARA A CONSTRUÇÃO DO TROCADOR DE CALOR	45
3.4.1 Propagação de Erros dos Equipamentos do Trocador de Calor.....	52
3.4.1.1 Propagação de erros nas variações de temperatura	53
3.4.1.2 Propagação de erros no cálculo do calor específico.....	54
3.4.2 Correção da Leitura do Rotâmetro	55
4 TESTES REALIZADOS NO TROCADOR DE CALOR	56
4.1 TESTES DE FUNCIONAMENTO	56
4.1.1 Água Destilada.....	56
4.1.2 Etileno Glicol	59
4.2 TESTES PARA COMPARAÇÃO DE CALOR TROCADOR	62
4.2.1 Dados Coletados para Água Destilada	62
4.2.2 Dados Coletados pra Etileno Glicol	63
4.2.3 Dados Coletados para Nanofluido de Ouro ($\phi=0,11$)	64
4.4 RESULTADOS DE TROCA DE CALOR	66
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	70
REFERÊNCIAS	72

1 INTRODUÇÃO

A nanotecnologia vem revolucionando a ciência desde seu surgimento, possibilitando a criação de tecnologias antes vistas como impossíveis pelo homem. Este novo ramo da tecnologia se expande para diversos setores, indo desde a criação de novos materiais, dispositivos, até sistemas em nível molecular – fenômenos associados com interações moleculares e atômicas que influenciam fortemente as propriedades macroscópicas de matérias com significativas melhoras mecânicas, óticas, químicas, elétricas, dentre outras, se tornaram possíveis (CHONG, 2004; 2009).

Um dos ramos promissores da nanotecnologia é o uso dos nanofluidos – fluidos com partículas nanométricas, cujas propriedades afetam diretamente as características físico-químicas do fluido base no qual estão suspensas. A quantidade de pesquisas sobre esse assunto só se ampliou desde sua descoberta, no início do século XXI e a quantidade de publicações se tornaram crescentes desde então, tal como mostrado na Figura 1:

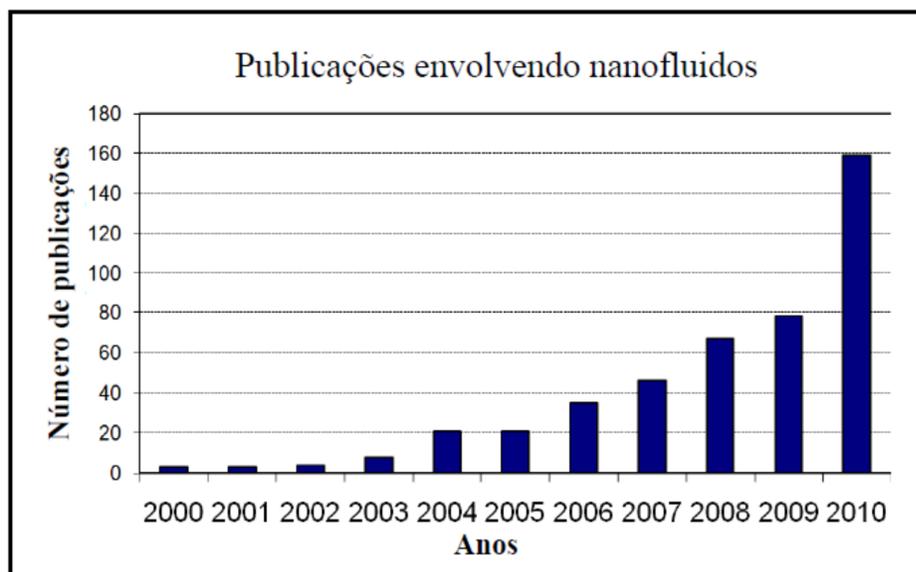


Figura 1 - Publicações sobre nanofluidos ao longo do anos 2000.

Fonte: Guilherme Azevedo Oliveira (2012).

Badarra Filho et al. (2008) resumiram alguns dos aspectos de maior interesse na pesquisa sobre nanofluidos:

1. Elevada condutividade térmica quando comparados com fluidos convencionais,
2. Aumento ou diminuição da troca de calor com o aumento da concentração volumétrica em condições de fase única,
3. Não existência de uma tendência clara no caso da transferência de calor por ebulição.

A Engenharia Mecânica mostra-se como uma grande beneficiária do desenvolvimento de pesquisas sobre nanofluidos, pois estes podem atuar em diversas áreas, tais como:

- Indústria automotiva, por exemplo, na qual os fluidos de interesse são aqueles utilizados para trabalhar com baixas pressões e temperaturas de operação. Porém, a transição até a prática industrial requer que a tecnologia dos nanofluidos seja desenvolvida até o ponto em que se torne realmente aplicável. (YU et al., 2007).
- Indústria energética, na qual a preocupação com o meio ambiente se tornou fundamental no desenvolvimento de novas tecnologias. Com isso, a fabricação das células de combustível está ganhando força como um componente crítico no ramo de energia renovável para aplicações de energia estacionária, portátil e em transportes. No atual estado da arte da tecnologia de células de combustível, essa é imensamente beneficiada da nanotecnologia aplicada em membranas nanoestruturadas, catalisadores e eletrodos. O protótipo de uma célula de combustível com nanofluidos demonstra um aumento na área da superfície, redução da sobretensão de ativação, características cinéticas superiores, e melhora moderada do desempenho da célula, no regime de alta tensão, com um máximo de 14% de densidade de potência mais elevada (LEE, KJEANG, 2013).

Ainda dentro do ramo energético, os nanofluidos podem agir em tratamentos superficiais protetores e lubrificantes para compressores, gerando assim uma grande eficiência energética (SISNANO, 2014).

- Indústria de petróleo e gás, onde as operações de prospecção, extração e processamento de óleo e gás são complexas e têm no horizonte um grau crescente dessa complexidade. Há grande demanda, na área de nanomateriais visando desde

a proteção de dutos e tubulações contra corrosão, até a criação de nanofluidos capazes de aumentar a capacidade de escoamento do petróleo dos depósitos ou de promover uma remoção eficiente de detritos durante os processos de perfuração. A criação de materiais que agregam leveza à resistência mecânica e resistência a ambientes agressivos é, hoje, abordada dentro do domínio da nanotecnologia (SISNANO, 2014).

Ainda dentro da Engenharia Mecânica, os nanofluidos ganham relevância principalmente nas áreas térmicas, especificamente no ramo da troca de calor, no qual se mostram mais eficientes que os fluidos de arrefecimento convencionais, apresentando como possíveis benefícios: incremento da transferência de calor, menor dimensão dos trocadores de calor e menor potência de bombeamento dos fluidos de transferência de calor (CHOI et al., 2002).

1.1 DELIMITAÇÃO DO TEMA

Visando o ramo da transferência de calor e o uso dos nanofluidos como líquidos de arrefecimento, torna-se necessária a construção de um trocador de calor compatível às singularidades dos nanofluidos. Estas características singulares, tais como: baixo volume utilizável (por ainda ser um fluido em desenvolvimento) e possibilidade de decantação quando em grandes volumes/espacos, se não levadas em consideração no projeto, podem acarretar dano ao trocador de calor bem como a variação dos resultados obtidos.

Um trocador de calor construído especificamente para aplicação em nanofluidos, deve ainda considerar os seguintes fatores de influência: condutividade térmica dos nanofluidos, composição, tamanho e forma da partícula, composição do fluido base, concentração volumétrica de nanopartículas, temperatura de aplicação, dentre outros. Este trabalho tem por objetivo projetar um trocador de calor que atenda estes requisitos, que será construído e posteriormente testado para verificar sua validade para uso acadêmico ou industrial.

1.2 PROBLEMAS E PREMISSAS

Por ser um ramo ainda em estudo, a principal dificuldade encontrada no uso dos nanofluidos para o projeto de trocador de calor é a falta de informações e de concordância nos estudos já existentes sobre as características e propriedades térmicas dos mesmos, fatores estes de extrema relevância para os cálculos que levam à construção do protótipo.

Uma alternativa possível de ser realizada é o uso de valores médios encontrados nas referências sobre o assunto, bem como posterior adaptação do protótipo de acordo com os resultados obtidos. Foram feitos, também, levantamentos em laboratórios das características termofísicas de uma amostra de nanofluido, para posterior comparação com os dados utilizados.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 Objetivo Geral

Projetar e construir um trocador de calor adaptado para utilizar nanofluidos como líquido de arrefecimento.

1.3.2 Objetivos Específicos

Desenvolver e garantir uma base matemática e de projeto para a validação do projeto como viável e funcional.

Projetar e construir um protótipo compatível com as características intrínsecas dos nanofluidos e que seja apto para pesquisas acadêmicas e possível uso industrial.

Realização de testes preliminares para identificação de possíveis modificações do trocador de calor.

1.4 JUSTIFICATIVA

O presente trabalho foi realizado a partir da necessidade de se desenvolver um trocador de calor compatível com as propriedades dos nanofluidos como líquidos de arrefecimento. Deste modo, este projeto criou uma garantia que o nanofluido possa ser avaliado em relação as suas características únicas no campo da Transferência de Calor, sem danificar suas propriedades e também é um auxílio para determinar melhor as faixas de operação onde o uso do nanofluido composto de nanopartículas de ouro em fluido base é mais aprazível do ponto de vista fluidotérmico.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

O presente trabalho está dividido da seguinte forma: no Capítulo 2 é apresentado o referencial teórico sobre trocadores de calor e nanofluidos, assim como informações sobre a obtenção e análise desse último.

O Capítulo 3 traz a metodologia utilizada na construção do trocador de calor, o modelo matemático empregado e a construção do protótipo em si. O Capítulo 4 aborda os testes realizados no trocador e os resultados obtidos.

O Capítulo 5 aborda as conclusões retiradas ao longo do desenvolvimento deste trabalho e sugestões para trabalhos futuros.

2 TROCADORES DE CALOR E NANOFLUIDOS

De acordo com Kakaç et al. (2012) trocadores de calor são equipamentos que provêm o fluxo de energia térmica entre dois ou mais fluidos em diferentes temperaturas. Estes equipamentos são usados em uma ampla variedade de aplicações, que incluem produção de energia, indústrias de processos, química e de alimentos, eletrônicos, engenharia ambiental, recuperação de calor desperdiçado, indústria de manufatura; ar condicionado, refrigeração e aplicações espaciais.

Segundo Mohammed et al. (2012) na maioria das aplicações deste equipamento, o tamanho do mesmo é um fator chave devido à restrições de espaço. Ainda conforme este mesmo autor, a eficiência de troca térmica pode ser consideravelmente aumentada se o tamanho do trocador de calor é diminuído.

Trocadores de calor são classificados em diversas categorias, tais como apresentado por Incropera (2008). Um dos tipos de trocador de calor que possui tamanho diminuto, porém grande área de troca térmica é o tipo serpentina, que também apresenta elevado coeficiente de transferência de calor devido à elevada turbulência induzida, como demonstrado por Prabhanjan et al. (2002). Khairul et al. (2013) mostram que há, ainda, uma contribuição secundária para o processo de transferência de calor em um trocador deste tipo; devido às forças centrífugas presentes na serpentina, um escoamento em espiral é formado, induzindo um segundo padrão de escoamento, que consiste em dois vórtices perpendiculares à direção do fluxo axial, com isso o processo de transferência de calor se dá por difusão na direção radial, bem como por convecção.

Como dito por Wang et al. (2007), nanofluidos podem ser considerados a próxima geração de líquidos de arrefecimento, pois oferecem diversas oportunidades de elevar a performance de transferência de calor comparado aos fluidos em estado puro. De acordo com Khairul et al. (2013), sob condições apropriadas de operação, esta elevada performance de transferência de calor dos nanofluidos, leva à uma redução de introdução de materiais puros e gastos energéticos, conseqüentemente, reduzindo o tamanho do trocador de calor, o que leva à diminuição de custos e aumento da eficiência do sistema.

Baseando-se nas informações presentes na literatura, este trabalho buscou aliar as características dos trocadores de calor tipo serpentina com as propriedades de transferência de

calor dos nanofluidos para a construção de um trocador de calor tipo serpentina, que utiliza como líquido de arrefecimento um nanofluido de ouro, composto por nanopartículas de ouro cujo fluido base é a água destilada.

Pesquisadores da área, tais como Khairul et al. (2013), Mohammed et al. (2012) e Elias et al. (2013), já realizaram as pesquisas do uso de nanofluidos aplicados em trocadores de calor tipo serpentina, que servirão como guia para o desenvolvimento e análise do trabalho aqui desenvolvido.

2.1 INFLUÊNCIA DAS PROPRIEDADES DOS NANOFLUIDOS NA TRANSFERÊNCIA DE CALOR

Muitos dos estudos presentes nesta área se voltaram à caracterização da condutividade térmica e viscosidade dos nanofluidos, pois os números adimensionais de Nusselt (Nu), Prandtl (Pr) e Reynolds (Re), presentes na maioria dos métodos de cálculo da taxa de transferência de calor para processos em condições de convecção forçada, são funções destas duas propriedades. Obtendo-as é possível estimar a área total de um trocador de calor bem como a potência de bombeamento para o mesmo.

É interessante o estudo destas propriedades, pois as mesmas estão inerentemente ligadas entre si. De acordo com Choi et al. (2001), por possuírem condutividade térmica duas ordens de grandeza superiores quando comparadas aos líquidos, a adição de uma pequena fração volumétrica de nanopartículas a fluidos convencionais pode levar ao aumento significativo da condutividade térmica em relação ao fluido base. Uma consequência porém, é a elevação também da viscosidade dinâmica do nanofluido gerado, o que leva à um aumento da potência de bombeamento dos trocadores de calor que o utilize como fluido de arrefecimento, em prol de manter a vazão necessária para a troca térmica.

O maior desafio para as pesquisas que visam obter estas propriedades é manter a solução de nanofluidos estável, pois conforme Wen e Ding (2005) e Hwang et al. (2008), a elaboração de soluções não estáveis é um dos fatores responsáveis pelas discrepâncias de valores das propriedades de nanofluidos quando medidas em laboratórios distintos.

A seguir serão tratadas as propriedades mais relevantes que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos e, conseqüentemente, sua atuação no campo da transferência de calor.

2.1.1 Condutividade Térmica dos Nanofluidos

A condutividade térmica dos nanofluidos está correlacionada com as seguintes características das nanopartículas: fração volumétrica, tamanho, forma da partícula, temperatura e composição do fluido base e da partícula. Outros fatores adicionais são o pH e a inclusão de aditivos, que melhoram a condutividade térmica da suspensão, pois proporcionam uma melhor estabilidade aos nanofluidos. Esta seção traz, de forma resumida, informações apresentadas por Da SILVA (2010).

2.1.1.1 Composição da partícula

Nanopartículas provenientes de materiais de elevada condutividade térmica, quando em fluido base, proporcionam um aumento da condutividade térmica do nanofluido maior do que aquelas provenientes de materiais de baixa condutividade. Ou seja, suspensão de nanotubos de carbono possuem maior condutividade que suspensões de partículas metálicas, que, por sua vez, possuem uma condutividade térmica superior àquelas de suspensões de partículas de óxidos.

Nanofluidos formados por suspensões de materiais de baixa condutividade requerem maiores frações volumétricas para se obter um aumento equivalente desta propriedade quando comparados com suspensões de partículas metálicas. O resultado desta maior fração volumétrica é também uma maior viscosidade do sistema, apesar disto, nanofluidos formados por nanopartículas de óxidos são os mais utilizados por serem estáveis e fáceis de fabricar.

2.1.1.2 Tamanho da partícula

Uma maneira de se aumentar a condutividade térmica de uma suspensão de nanopartículas é reduzir o tamanho destas, de forma que se obtem uma maior área superficial específica, uma distribuição mais uniforme das partículas no fluido base, bem como uma maior intensidade do movimento Browniano destas partículas, o que leva à um maior número de colisões entre elas e as moléculas do líquido, resultando, assim, em uma maior condutividade térmica. Porém Yu et al. (2007), Xie et al. (2008) e Beck et al. (2009) já observaram uma melhoria da condutividade com a diminuição do tamanho das nanopartículas seguida de uma diminuição desta melhoria para tamanhos muito pequenos. Este tipo de resultado vem sendo recorrente nas pesquisas sobre o assunto.

2.1.1.3 Forma da partícula

Tem-se, de forma resumida, que nanopartículas mais alongadas proporcionam um aumento da condutividade térmica do nanofluidos quando comparadas com suspensões de nanopartículas esféricas. A explicação para este fato está ligada à área de contato partícula-fluido, onde para um mesmo volume de partículas presentes no fluido base, aquelas que são alongadas possuem maior área de contato do que as esféricas.

2.1.1.4 Composição do fluido base

Um fato curioso, que ainda não foi totalmente explicado no ramo dos nanofluidos, é que vários autores perceberam que para uma mesma suspensão de partículas, quanto menor a condutividade térmica do fluido base, maior a condutividade térmica do nanofluido. A Figura 2, retirada do artigo de Lee et al. (2007) e publicada no trabalho de Das et al. (2008), demonstram a condutividade térmica de suspensões de alumina dispersas em diferentes fluidos base, evidenciando este estranho efeito.

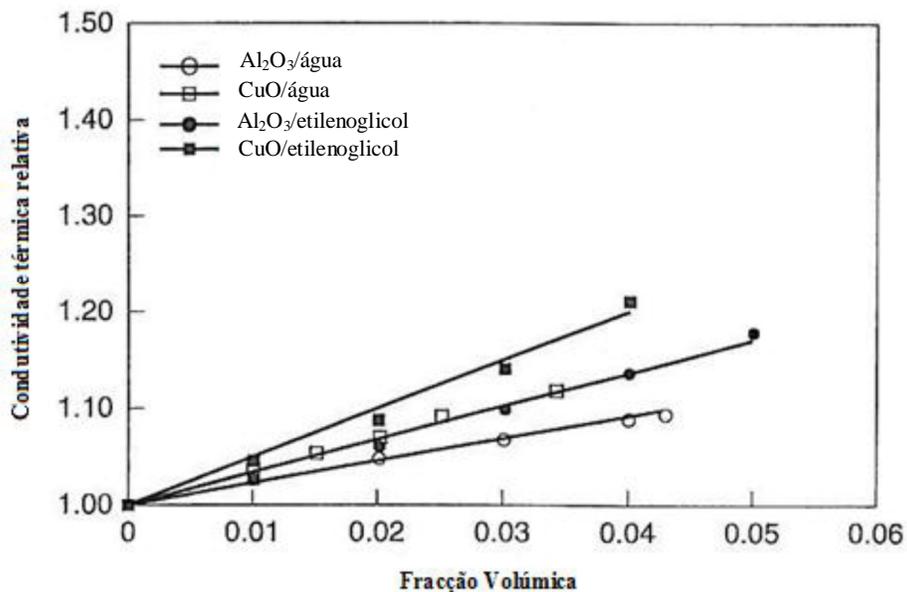


Figura 2 - Dependência da condutividade térmica para diferentes fluidos base, retirada do artigo de Lee et al., (2007).

Fonte: Das et al., 2008.

2.1.1.5 Concentração Volumétrica

Normalmente tem-se que, quanto maior a concentração de nanopartículas, maior a condutividade térmica do nanofluido. Porém, segundo Da Silva (2010), para concentrações muito elevadas, espera-se que o aumento da condutividade térmica ocorra mais lentamente, ou até mesmo que ela diminua. No entanto, nas concentrações volumétricas aplicadas em engenharia (inferior a 5% v/v), não há evidências na literatura de resultados que mostrem este decréscimo. Suspensões de partículas de óxidos e metálicas geralmente possuem uma relação linear, enquanto nanotubos de carbono possuem um aumento não linear da condutividade térmica com a concentração volumétrica. Para este último caso, Choi et al. (2001), justificam que isto ocorre devido à elevada razão de aspecto dos nanotubos de carbono, que são estruturas cristalinas cilíndricas, sendo inevitável uma certa interação entre as partículas e consequente transferência de calor, mesmo para baixas frações volumétricas.

2.1.1.6 Temperatura

De maneira geral, quanto maior a temperatura, maior o aumento da condutividade térmica dos nanofluidos. Os nanofluidos são mais sensíveis aos efeitos da temperatura quando comparados aos fluidos convencionais, e com isso, tem-se que com o aumento da temperatura, também se verifica um incremento da diferença entre condutividade térmica do nanofluido em relação ao fluido base, para a mesma fração volumétrica.

2.1.1.7 Outros fatores

Além dos acima citados, apresenta-se em seguida uma lista resumida, segundo Oliveira (2012), de outros fatores que também podem exercer influência na condutividade térmica de um nanofluido.

- Aditivos: A presença destes, que tem por objetivo elevar a estabilidade dos nanofluidos, também influencia a condutividade térmica do mesmo.
- Acidez: Quanto mais ácido o nanofluido, ou menor o seu pH, maior será sua condutividade.
- Aglomerações: Influenciam a condutividade dos nanofluidos, pois também são indícios da não-homogeneidade dos mesmos.
- Movimento Browniano: É um movimento aleatório, que desloca as nanopartículas pelo fluido base, aumentando a probabilidade de colisão entre elas e com isso, aumentando a transferência de calor.
- Nanocamada: É uma camada interfacial entre as nanopartículas e o fluido base. É tratada como determinante na condutividade térmica dos nanofluidos, pois possui uma condutividade intermediária entre o fluido base e as nanopartículas, e com isso, quanto maior sua espessura e condutividade, maior será a condutividade do nanofluido.

2.2 A OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS NANOFLUIDOS

2.2.1 Síntese das Nanopartículas

A obtenção do nanofluido de ouro ocorreu por meio da síntese das nanopartículas de ouro. Para isso, utilizou-se o método de Turkevich et al., (1951), onde foram utilizados 20 ml de uma solução de 1,0 mM de cloreto de ouro ácido trihidratado (ácido cloroaurico - $\text{HAuCl}_4 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$) da Vetec como precursor e 2,0 ml de uma solução aquosa de 1% de citrato de sódio ($\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ – Synth) como agente redutor. Inicialmente, os 20 ml de ácido cloroaurico foram colocados em um Erlenmeyer e aquecidos, sob agitação magnética, até iniciar o processo de ebulição. Foi colocado um vidro relógio sobre o frasco para evitar a perda de água por evaporação. Com a solução em ebulição e sob agitação, foram adicionados 2 ml de uma solução de citrato de sódio. A solução de nanopartículas de ouro se formou gradualmente à medida que o citrato de sódio reduziu o ouro e apresentou uma cor vermelho rubi, característica do ouro coloidal.

2.2.2 Análise das Propriedades Termofísicas dos Nanofluidos

As propriedades dos nanofluidos foram obtidas e analisadas por dois métodos, analítico e empírico. Ambos serão discutidos nesta seção, porém para a realização deste trabalho, utilizou-se, em grande parte, o empírico, por questão de facilidade de obtenção de dados.

2.2.2.1 Método analítico

Um fator comum na bibliografia utilizada são as equações governantes aplicadas aos nanofluidos para o cálculo de suas propriedades termofísicas, que são importantes para o projeto e dimensionamento do trocador.

2.2.2.1.1 Densidade do nanofluido

Conforme demonstrado por Gherasim et al. (2009), a densidade de um nanofluido pode ser dada por:

$$\rho_{nf} = (1 - \varphi)\rho_{fb} + \varphi\rho_{np}, \quad (01)$$

onde ρ_{nf} é a densidade do nanofluido, φ , a concentração volumétrica das partículas dada em porcentagem, ρ_{fb} é a densidade do fluido base e ρ_{np} , a densidade das nanopartículas, conforme nomenclatura adotada por Khairul et al. (2013).

2.2.2.1.2 Viscosidade dinâmica

De acordo com Corcione (2010), a relação para esta propriedade é dada por:

$$\frac{\mu_{eff}}{\mu_{fb}} = \frac{1}{1 - 34,78 (d_{np}/d_{fb})^{-0,3} \varphi^{1,03}}, \quad (02)$$

onde, μ_{eff} é a viscosidade dinâmica efetiva, μ_{fb} é a viscosidade dinâmica do fluido base, d_{np} é o diâmetro das nanopartículas e d_{fb} é o diâmetro equivalente da molécula do fluido base, dado por:

$$d_{bf} = \left[\frac{6M}{N\pi\rho_{bf}} \right]^{1/3}, \quad (03)$$

sendo M o peso molecular e N o número de Avogadro.

2.2.2.1.3 Condutividade térmica efetiva do nanofluido

Conforme Ghasemi et al. (2010), esta propriedade pode ser definida como:

$$k_{eff} = k_{estático} + k_{browniano}, \quad (04)$$

sendo $k_{estático}$ a condutividade térmica estática, dada por:

$$k_{\text{estático}} = k_{fb} \left[\frac{k_{np} + 2k_{fb} - 2\varphi(k_{fb} - k_{np})}{k_{np} + 2k_{fb} + \varphi(k_{fb} - k_{np})} \right], \quad (05)$$

e $k_{\text{browniano}}$, a condutividade térmica browniana, expressa por:

$$k_{\text{browniano}} = 5 \cdot 10^4 \beta \varphi \rho_{fb} c_{p,fb} \sqrt{\frac{kT}{2\rho_{np}R_{np}}} \cdot f(T, \varphi), \quad (06)$$

onde

- k é a constante de Boltzmann, $k=1,3807 \cdot 10^{-23}$ J/K
- β é uma função modeladora do nanofluido em função de sua concentração
- ρ_{fb} é a densidade do fluido base, em (kg/m³)
- $f(T, \varphi)$ é uma função modeladora da temperatura, em Kelvin, em função da concentração.
- R_{np} é o raio da nanopartícula.
- $c_{p,nf}$ é o calor específico do nanofluido, calculado conforme a seguinte expressão, de acordo com Vajjha et al. (2009):

$$c_{p,nf} = \frac{(1-\varphi)(\rho c_p)_{fb} + \varphi(\rho c_p)_{np}}{\rho_{nf}}, \quad (07)$$

2.2.2.1.4 Números adimensionais (Re , De , Pr)

Podem ser estimados por meio das equações 08 a 10:

$$Re = \frac{4\dot{m}}{\pi\mu_{nf}D_{\text{tubo real}}}, \quad (08)$$

$$De = Re \left(\frac{D_{\text{tubo real}}}{D_{\text{externo serpentina}}} \right)^{0,5}, \quad (09)$$

$$Pr = \frac{c_{p,nf}\mu_{nf}}{k_{nf}}, \quad (10)$$

onde as seguintes propriedades são referentes ao nanofluido: vazão mássica, \dot{m} , viscosidade dinâmica, μ_{nf} , calor específico a pressão constante, $c_{c,nf}$ e condutividade térmica, k_{nf} . As variáveis $D_{\text{tubo real}}$ e $D_{\text{externo serpentina}}$, se referem, de acordo com a nomenclatura adotada neste trabalho, ao diâmetro do tubo que compõe a serpentina, menos sua espessura e ao diâmetro da serpentina já enrolada, respectivamente.

Kannadasan et al. (2012) desenvolveram correlações específicas para o número de Nusselt (Nu) e o fator de atrito (f) para escoamento de nanofluidos em trocadores de calor tipo serpentina, mostradas a seguir:

$$\text{Nu} = 3,67\text{De}^{0,67}\delta^{0,009}\varphi^{1,004}, \quad (11)$$

$$f = 0,602\text{De}^{0,0794}\delta^{0,2}\varphi^{1,177}, \quad (12)$$

onde δ é a razão entre o diâmetro interno do tubo e o diâmetro interno da serpentina.

2.2.2.1.5 Coeficiente de transferência de calor

Sua relação é expressa por:

$$h = \frac{\text{Nu} \cdot k_{\text{eff}}}{D_{\text{tubo real}}}. \quad (13)$$

Vale a pena ressaltar que para este trabalho, o método analítico não foi inteiramente utilizado, pois algumas equações acima apresentadas são específicas para determinados nanofluidos, o que levaria à necessidade de desenvolvimento de equações próprias para o nanofluido de ouro, fugindo do foco inicial deste projeto. As equações acima descritas, retiradas em grande parte do trabalho de Khairul et al. (2013), foram apresentadas apenas para nível de conhecimento.

2.2.2.2 Método empírico

Consiste na realização de diversos testes laboratoriais para a obtenção das propriedades dos nanofluidos. As técnicas e os testes realizados neste trabalho serão

discutidos ao longo dessa seção. Testes de caracterização física dos nanofluidos não serão profundamente abordados, devido à suas complexidades teóricas e por não ser a intenção deste trabalho.

2.2.2.2.1 Densidade

A densidade de um nanofluido pode ser medida por meio de um densímetro, como o mostrado nas Figuras 3 e 4:



Figura 3 – Densímetro com chumbo em sua base

Fonte: Aatoria Própria.



Figura 4 – Graduação do densímetro em g/ml.

Fonte: Aatoria Própria.

O procedimento consiste em encher uma proveta de 250 ml com a solução de nanofluido diluído em fluido base, no caso, água destilada, e colocar o densímetro dentro da proveta. O densímetro se estabiliza e a leitura da densidade pode ser feita pela graduação existente no mesmo, como mostrado na Figura 5:

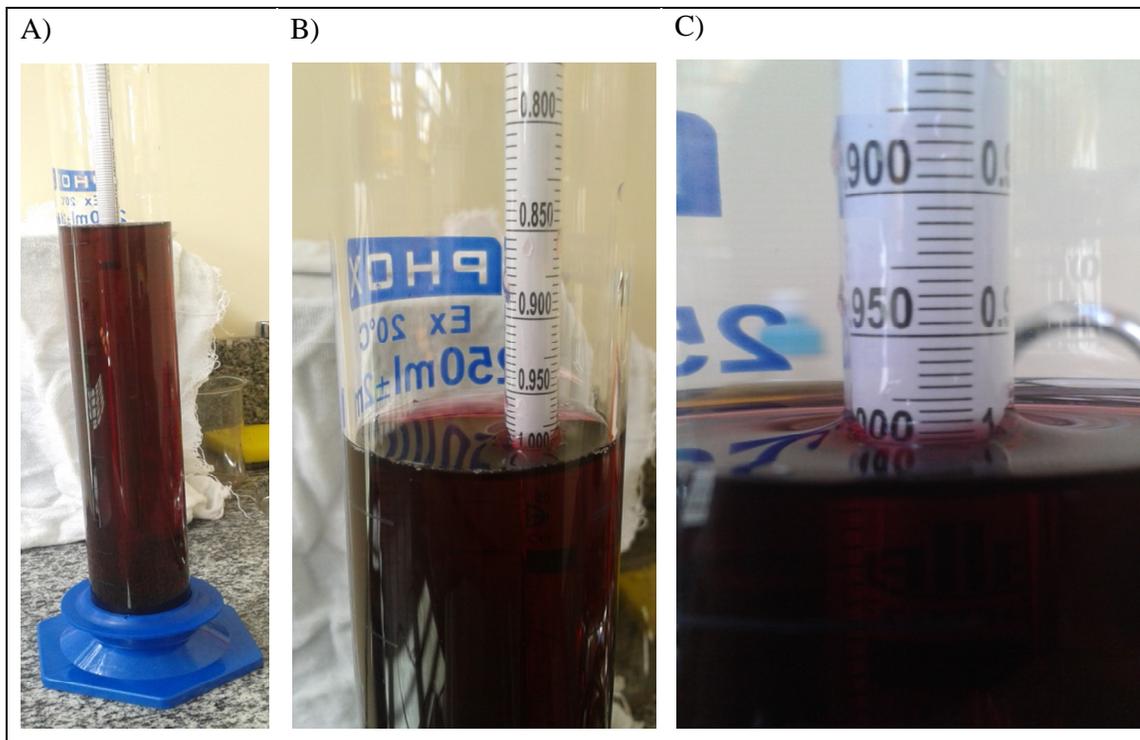


Figura 5 – Exemplo de medição da densidade de um nanofluido. A) Densímetro posicionado dentro da proveta. B) Densímetro em equilíbrio com o fluido. C) Leitura da densidade.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 5.C, a densidade do fluido seria de 0,985g/ml. A leitura, por vezes, é de difícil obtenção, devido ao tamanho da escala e à capilaridade.

2.2.2.2.2 Calor específico

O calor específico de um fluido pode ser obtido, de maneira prática, pela diferença de temperatura obtida quando este passa por um trocador de calor e troca calor com um fluido de calor específico conhecido. Supondo que o calor retirado do fluido quente seja o mesmo recebido pelo fluido frio (sem perdas para o meio), através da equação de calor trocado, o calor específico pode ser determinado:

$$Q_{\text{quente}} = m_q c_{p,q} \Delta T_q, \quad (14)$$

$$Q_{\text{frio}} = m_f c_{p,f} \Delta T_f. \quad (15)$$

Os sub-índices q e f se referem à quente e frio, respectivamente; m é a massa do fluido, em quilos, obtida através da densidade e da vazão volumétrica do mesmo, c_p é o calor específico do fluido, em kJ/kg.K e ΔT é a diferença de temperatura de entrada e saída do fluido, em Kelvin.

Igualando as equações (14) e (15) e isolando-se o calor específico do fluido quente, obtém-se:

$$C_{p,q} = \frac{m_f c_{p,f} \Delta T_f}{m_q \Delta T_q} . \quad (16)$$

Este método é mais indicado quando o calor específico do fluido quente já é conhecido e se quer ter um controle do funcionamento do trocador de calor por meio da comparação dos valores. Neste trabalho, calculou-se o calor específico do nanofluido por meio da equação (07) e posteriormente, na fase de testes, fez-se a comparação com o valor obtido pela equação (16).

2.2.2.2.3 Caracterização física dos nanofluidos

Existem diversos métodos experimentais para realizar a caracterização física de nanofluidos. A título de conhecimento, neste trabalho a caracterização física foi feita conforme a explicação a seguir.

Para as medidas de absorção óptica linear das NPAu foi utilizado um espectrofotômetro Cary 50 da Varian, para identificar a banda de absorção no visível, originária da frequência de ressonância dipolar de plasmon de superfície.

Para as medidas de estabilidade das NPAu foi utilizado o equipamento Zetasizer Nano ZS90, que combina velocimetria por Laser Doppler (LDV) e análise de fase do espalhamento de luz (PALS) da Malvern.

Nesse estudo foram feitas medidas exploratórias da condutividade térmica das nanopartículas de ouro utilizando-se do fenômeno de lente térmica e a técnica de Z-scan (Varredura-z).

Todas as medidas de produção e caracterização física das nanopartículas de ouro foram feitas no Laboratório do Grupo de Fenômenos Fototérmicos em Fluidos Complexos (GFFFCx) da UEPG e podem ser encontradas na tese de Lenart et al. (2015).

3 PROJETO DO PROTÓTIPO DO TROCADOR DE CALOR

Neste capítulo, serão apresentadas as equações regentes utilizadas para o dimensionamento dos componentes do protótipo do trocador de calor. A partir das medidas obtidas, utilizou-se o software gráfico SolidWorks® para plotagem em 3D dos componentes do trocador. Conhecendo as dimensões do protótipo, projetou-se um sistema de controle térmico, montando desta forma um circuito para acompanhamento da troca de calor.

3.1 O MÉTODO DA EFETIVIDADE PARA O CÁLCULO DO NÚMERO DE UNIDADES DE TRANSFERÊNCIA – NUT

De acordo com Incropera (2008), este método é o mais recomendado para casos nos quais apenas as temperaturas de entrada de ambos os fluidos forem conhecidas – situação esta que pode ser obtida em laboratório e que será utilizada no projeto para a construção do trocador de calor específico aos propósitos deste trabalho.

3.1.1 Equações Fundamentais

A efetividade de um trocador de calor pode ser determinada a partir dos cálculos das seguintes variáveis:

3.1.1.1 Taxa de transferência de calor máxima possível (q_{\max})

Esta taxa poderia ser alcançada em um trocador de calor tipo contracorrente de comprimento infinito, onde um dos fluidos teria a máxima diferença de temperaturas, que seria dada pela subtração da temperatura de entrada do fluido quente ($T_{q,ent}$), menos a temperatura de entrada do fluido frio ($T_{f,ent}$). A expressão geral é:

$$q_{\max} = C_{\min}(T_{q,ent} - T_{f,ent}), \quad (17)$$

onde C_{\min} , é definida como a menor taxa de capacidade calorífica entre as taxas do fluido quente (C_q) e do fluido frio (C_f). Esta taxa pode ser obtida através da multiplicação da vazão mássica do fluido (\dot{m}) pelo seu calor específico a pressão constante (c_p), ou seja, $C = \dot{m}c_p$.

3.1.1.2 Efetividade (ε)

É a razão entre a taxa de transferência de calor real em um trocador de calor e a taxa de transferência de calor máxima possível. É por definição adimensional e seu valor encontra-se no intervalo $0 \leq \varepsilon \leq 1$. A fórmula para o cálculo da efetividade é definida como:

$$\varepsilon \equiv \frac{q}{q_{\max}}. \quad (18)$$

Ocorrem, portanto, duas situações possíveis:

- Se $C_q < C_f$,

$q_{\max} = \dot{m}_q c_{p,q}(T_{q,ent} - T_{f,ent})$ ou, dada a definição da taxa de capacidade calorífica, $q_{\max} = C_q (T_{q,ent} - T_{f,ent})$ e $q = C_q (T_{q,ent} - T_{q,sai})$, sendo $T_{q,sai}$ a temperatura de saída do fluido quente. Substituindo essas definições na equação (18) e simplificando C_q com C_{\min} , chega-se em:

$$\varepsilon = \frac{(T_{q,ent} - T_{q,sai})}{(T_{q,ent} - T_{f,ent})}. \quad (19)$$

- Se $C_f < C_q$,

$q_{\max} = \dot{m}_f c_{p,f}(T_{q,ent} - T_{f,ent})$ ou, dada a definição da taxa de capacidade calorífica, $q_{\max} = C_f (T_{q,ent} - T_{f,ent})$ e $q = C_f (T_{f,sai} - T_{f,ent})$, sendo $T_{f,sai}$ a temperatura de saída do fluido frio. Substituindo essas definições na equação (18) e simplificando C_f com C_{\min} , se obtém:

$$\varepsilon = \frac{(T_{f,sai} - T_{f,ent})}{(T_{q,ent} - T_{f,ent})}. \quad (20)$$

A efetividade é útil, pois se seu valor for conhecido, assim como $T_{q,ent}$ e $T_{f,ent}$, é possível determinar a taxa de transferência de calor real de imediato pela expressão:

$$q = \varepsilon C_{\min}(T_{q,ent} - T_{f,ent}). \quad (21)$$

3.1.1.3 Número de unidades de transferência (NUT)

É um parâmetro adimensional amplamente utilizado na análise de trocadores de calor, sendo definido como:

$$NUT \equiv \frac{UA}{C_{\min}}, \quad (22)$$

onde U é o coeficiente global de transferência de calor e “ A ” é a área da superfície de transferência de calor.

Expressões para o cálculo da Efetividade (ε) em função do NUT, para diferentes tipos de trocadores de calor, podem ser encontradas na Tabela 1:

Tabela 1 – Expressões para o cálculo da Efetividade de diferentes tipos de trocadores de calor

Configuração do Escoamento	Relação
Tubos concêntricos (bitubulares)	
Escoamento paralelo	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Escoamento contracorrente	$\varepsilon = \frac{1 - \exp[-NUT(1 - C_r)]}{1 - C_r \exp[-NUT(1 - C_r)]} \quad (C_r < 1)$
	$\varepsilon = \frac{NUT}{1 + NUT} \quad (C_r = 1)$
Casco e tubos	
Um passe no casco (2, 4, ... passes nos tubos)	$\varepsilon_1 = 2 \left\{ 1 + C_r + (1 + C_r^2)^{1/2} \right. \\ \left. \times \frac{1 + \exp[-(NUT)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]}{1 - \exp[-(NUT)_1(1 + C_r^2)^{1/2}]} \right\}^{-1}$
n Passes no casco (2n, 4n, ... passes nos tubos)	$\varepsilon = \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - 1 \right] \left[\left(\frac{1 - \varepsilon_1 C_r}{1 - \varepsilon_1} \right)^n - C_r \right]^{-1}$
Escoamento cruzado (passe único)	
Dois fluidos não-misturados	$\varepsilon = 1 - \exp \left[\left(\frac{1}{C_r} \right) (NUT)^{0,22} \{ \exp[-C_r(NUT)^{0,78}] - 1 \} \right]$
C_{max} (misturado), C_{min} (não-misturado)	$\varepsilon = \left(\frac{1}{C_r} \right) (1 - \exp[-C_r(1 - \exp(-NUT))])$
C_{min} (misturado), C_{max} (não-misturado)	$\varepsilon = 1 - \exp(-C_r^{-1} \{1 - \exp[-C_r(NUT)]\})$
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$\varepsilon = 1 - \exp(-NUT)$

Fonte: Incropera (2008).

Onde C_r é definido como uma razão entre as taxas de capacidade calorífica, ou seja, $C_r \equiv C_{min}/C_{max}$. De acordo com Incropera (2008), para trocadores casco e tubo com múltiplos passes, a distribuição do NUT seria dada por $NUT = n(NUT)_1$, sendo n a quantidade de passes e $(NUT)_1$ o cálculo de NUT para apenas 1 passe, ou seja, assume-se que o $(NUT)_1$ está igualmente distribuído entre os múltiplos passes. Para determinar ε , $(NUT)_1$ deve ser calculado considerando-se a área de transferência de calor de um casco, ε_1 é então calculado utilizando a equação para um passe no tubo e ε é finalmente calculado utilizando a equação para n passes no casco.

Ainda segundo Incropera (2008), para cálculos envolvendo o projeto de trocadores de calor é mais conveniente trabalhar com relações $\varepsilon - NUT$ na forma:

$$NUT = f\left(\varepsilon, \frac{C_{min}}{C_{max}}\right)$$

Ou seja, o NUT é obtido em função da efetividade e da razão entre C_{min} e C_{max} .
Relações explícitas para o NUT em função do ε e C_r são fornecidas na Tabela 2:

Tabela 2 - Relações do NUT para diferentes tipos de trocadores de calor

Configuração do Escoamento	Relação
Tubos concêntricos (bitubulares)	
Escoamento paralelo	$NUT = -\frac{\ln[1 - \varepsilon(1 + C_r)]}{1 + C_r}$
Escoamento contracorrente	$NUT = \frac{1}{C_r - 1} \ln\left(\frac{\varepsilon - 1}{\varepsilon C_r - 1}\right) \quad (C_r < 1)$
	$NUT = \frac{\varepsilon}{1 - \varepsilon} \quad (C_r = 1)$
Casco e tubos	
Um passe no casco (2, 4, ... passes nos tubos)	$(NUT)_1 = -(1 + C_r^2)^{-1/2} \ln\left(\frac{E - 1}{E + 1}\right)$ $E = \frac{2/\varepsilon_1 - (1 + C_r)}{(1 + C_r^2)^{1/2}}$
n Passes no casco ($2n, 4n, \dots$ passes nos tubos)	Use as Equações 11.30b e 11.30c com $e_1 = \frac{F - 1}{F + C_r} \quad F = \left(\frac{\varepsilon C_r - 1}{\varepsilon - 1}\right)^{1/n} \quad NUT = n(NUT)_1$
Escoamento cruzado (passe único)	
C_{max} (misturado), C_{min} (não-misturado)	$NUT = -\ln\left[1 + \left(\frac{1}{C_r}\right) \ln(1 - \varepsilon C_r)\right]$
C_{min} (misturado), C_{max} (não-misturado)	$NUT = -\left(\frac{1}{C_r}\right) \ln[C_r \ln(1 - \varepsilon) + 1]$
Todos os trocadores ($C_r = 0$)	$NUT = -\ln(1 - \varepsilon)$

Fonte: Incropera (2008).

Se $NUT \leq 0,25$, Incropera (2008) afirma que todos os trocadores de calor possuem aproximadamente a mesma efetividade, independentemente do valor de C_r , e ε pode, mais uma vez, ser calculado pela equação para todos os trocadores ($C_r = 0$) da Tabela 1. Para qualquer trocador, os valores máximo e mínimo da efetividade estão associados a $C_r = 0$ e $C_r = 1$, respectivamente.

A aplicação do método ε -NUT no projeto de trocadores de calor se dá pelo cálculo inicial de ε e C_r , com estes valores pode-se, então, determinar a equação apropriada (ou

gráfico) para obter o valor do NUT, que através do rearranjo da equação (22), permite o cálculo da área, A.

3.2 CÁLCULOS REALIZADOS PARA O PROJETO DO PROTÓTIPO

Através das equações descritas nos tópicos anteriores, montou-se uma tabela no software Excel[®] de forma a facilitar a realização dos cálculos. A mesma está demonstrada, de maneira geral, na Figura 6 abaixo:

Memorial de Cálculo - Trocador de Calor em Serpentina						
Propriedades			Dimensões trocador		Observações	
Fluido Frio (água)		Fluido Quente (nanofluido)		D interno serpentina	0,03 m	área interna (tubo) = área do tubo que forma a serpentina
cp	4,18 kJ/kg.C	cp	3,80 kJ/kg.C	D casco	0,07 m	
p	997,60 kg/m³	p	10146,50 kg/m³	D tubo	0,01 m	área externa real = área do casco levando em consideração a área ocupada pela serpentina
μ	8,55E-04 N.s/m²	μ	8,55E-04 N.s/m²	Espessura tubo (e)	0,001 m	D tubo real = diâmetro do tubo que compõe a serpentina menos sua espessura.
v	0,50 m/s	v	0,50 m/s	D tubo real	0,004 m	
Re	26777,68 adm	Re	25811,26 adm	Altura (H)	0,32 m	D casco real = diâmetro do casco levando em consideração o espaço ocupado pela serpentina
m	0,05 kg/s	m	0,02 kg/s	Área interna (tubo)	4,75E-06 m²	
V	5,10E-05 m³/s	V	2,37E-06 m³/s	D externo serpentina	0,05 m	Diâmetro casco real
Cc	0,21 kW/C	Ch	0,09 kW/C	Diâmetro casco real	0,01 m	
Tf,e	23,00 C	Tq,e	40,00 C	Área externa real	1,02E-04 m²	
Tf,s	30,00 C	Tq,s	35,00 C			
Cmin	0,09 kW/C	Cmax	0,21 kW/C			
Cr	0,43 adm					
Taxa de Transferência de Calor Máxima Possível						
qmax	1,55642725 kW					
Efetividade						
cfórmula	0,09					
Se cfórmula=ch (valor retornado automaticamente)	eh 2,94E-01					
Se cfórmula=cc (valor retornado automaticamente)	ec 4,12E-01					
e	2,94E-01					
Taxa de Transferência de Calor Real						
q	4,58E-01 kW					
Relação do NUT (1 passe no casco e 2n passes nos tubos)						
E	4,93E+00					
NUT	3,78E-01					
U	5,00E+02 W/m²C					
A	6,92E-02 m²					
L	5,06 m					
#passes	46,69					
Lfinal	0,30 m					

Figura 6 - Tabela montada para auxiliar nos cálculos

Fonte: Autoria própria

3.2.1 Composição da Tabela dos Cálculos

A tabela foi montada de forma que cada quadro fornece as informações utilizadas nos cálculos, conforme mostrado nas subseções a seguir.

3.2.1.1 Propriedades

Informa-se ou calculam-se as propriedades hidro e termodinâmicas dos fluidos frio e quente, tais como: calor específico a pressão constante (c_p – informado), densidade (ρ – informado), viscosidade dinâmica (μ – informado), velocidade (v – calculado), Número de Reynolds (Re – calculado), vazão mássica (m – calculado), vazão volumétrica (V – calculado), taxa de capacidade calorífica (C – calculado), temperatura de entrada (T_e – informado) e temperatura de saída (T_s – informado). Sendo as propriedades informadas da água provenientes de Incropera (2008). Na Tabela 3 apresenta-se o quadro Propriedades completo:

Tabela 3 – Propriedades Dos Fluidos

Propriedades					
Fluido Frio (água)			Fluido Quente (nanofluido)		
cp	4,18	kJ/kgK	cp	3,80	kJ/kgK
ρ	997,60	kg/m ³	ρ	10146,50	kg/m ³
μ	$8,55 \cdot 10^{-4}$	Ns/m ²	μ	$8,55 \cdot 10^{-4}$	Ns/m ²
v	0,50	m/s	v	0,50	m/s
Re	26777,68	adm.	Re	25811,26	adm.
m	$5,09 \cdot 10^{-2}$	kg/s	m	0,02	kg/s
V	$5,10 \cdot 10^{-5}$	m ³ /s	V	$2,37 \cdot 10^{-6}$	m ³ /s
Cc	0,21	kW/°C	Ch	0,09	kW/°C
T_{f,e}	23	°C	T_{q,e}	40	°C
T_{f,s}	30	°C	T_{q,s}	35	°C

Os sub-índices c , f , h e q se referem à *cold* (frio) e *hot* (quente), respectivamente, de forma a caracterizar o fluido tratado.

Deve-se levar em consideração que, devido à falta de consistência entre os dados informados na bibliografia levantada, os valores utilizados das propriedades do nanofluido são estimativas baseadas em fatores médios encontrados durante a pesquisa, não representando necessariamente os valores reais das propriedades. O calor específico, a densidade e a viscosidade do nanofluido foram calculados de acordo com as equações (7), (1) e (2), respectivamente, para os valores levantados na bibliografia.

3.2.1.2 Dimensões do trocador

A seguir são informadas as dimensões estimadas do protótipo, sendo o desenho esquemático presente na Figura 6 um apoio para o esclarecimento destas dimensões. Os dados inseridos nesta tabela foram utilizados para o cálculo de algumas propriedades da Tabela 3. O quadro Observações serve para complementar e esclarecer alguns dos dados inseridos. A Tabela 4 traz as dimensões utilizadas e o Quadro 1 traz as Observações.

Tabela 4 – Dimensões Estimadas do Protótipo

Dimensões do Trocador		
D interno serpentina	0,03	m
D casco	0,07	m
D tubo	0,01	m
Espessura tubo (e)	0,001	m
D tubo real	0,004	m
Altura (H)	0,32	m
Área interna (tubo)	$4,75 \cdot 10^{-6}$	m ²
D externo serpentina	0,05	m
Diâmetro casco real	0,01	m
Área externa real	$1,02 \cdot 10^{-4}$	m ²

Observações	
Área interna (tubo)	Área do tubo que forma a serpentina.
Área externa real	Área do casco levando em consideração a área ocupada pela serpentina.
D tubo real	Diâmetro do tubo que compõe a serpentina menos sua espessura.
D casco real	Diâmetro do casco levando em consideração o espaço ocupado pela serpentina.

Quadro 1 – Observações
Fonte: Autoria Própria.

A Figura 7 traz um desenho esquemático, de modo a esclarecer algumas das variáveis adotadas na Tabela 4:

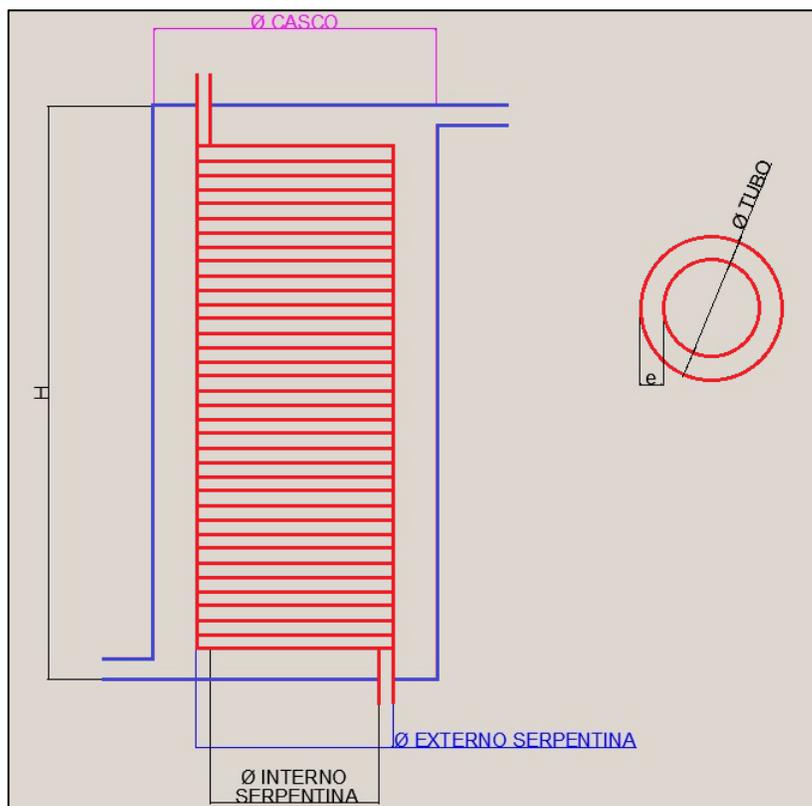


Figura 7 – Desenho explicativo sobre as dimensões do trocador de calor.

Fonte: Autoria Própria.

Vale ressaltar que as dimensões informadas foram escolhidas com base nos materiais presentes no mercado e de forma a manter um tamanho aprazível para pesquisas.

3.2.2 Informações Obtidas

Com base nas informações inseridas nos quadros anteriores, os seguintes dados são calculados automaticamente pelo software Excel[®], como mostrado na Tabela 5 abaixo.

Tabela 5 – Dados Obtidos no Memorial de Cálculo

Taxas de Capacidade Calorífica Mínima e Máxima	C_{min}	0,09 kW/°C
	C_{max}	0,21 kW/°C
	C_r	0,43
Taxa de transferência de calor máxima possível (q_{max})	1,556 kW	
Efetividade	Cfórmula = 0,09 kW/°C	
	Cfórmula=Ch	$\epsilon_h=0,294$
	Cfórmula=Cc	$\epsilon_c=0,412$
	ϵ	0,294
Taxa de transferência de calor real (q)	0,458 kW	
Relação do NUT (1 passe no casco e 2n passes nos tubos)	E	4,93
	NUT	0,378
Dimensionamento da serpentina	U	500 W/m ² °C
	A	6,92.10 ⁻² m ²
	L	5,06 m
	#passes	46,69
	Lfinal	0,30 m

Onde #passes significa o número de passes obtidos com o enrolamento da serpentina.

As seguintes observações podem ser feitas a respeito dos dados obtidos:

- **Taxas de capacidade calorífica mínima e máxima (C_{\min} e C_{\max})**

Através do uso da função lógica SE, disponível no Excel, determinou-se como C_{\min} , o menor valor entre a taxa de capacidade calorífica do fluido frio, C_c , e a taxa de capacidade calorífica do fluido quente, C_q , e como C_{\max} , o maior. A Tabela 5 apresenta os valores de C_{\min} e C_{\max} . Sendo a Razão entre as taxas de capacidade calorífica (C_r), calculada como mostrado no item 3.1.1.3 deste capítulo.

- **Taxa de transferência de calor máxima possível (q_{\max})**

Calculado conforme mostrado no item 3.1.1.1 deste capítulo

- **Efetividade**

Com base na fórmula fornecida no item 3.1.1.2 para efetividade, considerando fluidos que não passam por mudança de fase e admitindo-se calores específicos constantes, montou-se uma tabela para identificar se $C_q < C_f$ ou se $C_f > C_q$, e com isso calcula-se automaticamente, também com o uso da função lógica SE, a efetividade através da fórmula apropriada, podendo ser a equação (19) ou (20), dependendo de que variável, C_h ou C_c , assumirá o valor de C_{\min} .

- **Taxa de transferência de calor real (q)**

Obtida através do valor da efetividade retornado automaticamente e calculada conforme a equação (21) do item 3.1.1.2 deste capítulo.

- **Relação do NUT (1 passe no casco e 2n passes nos tubos)**

Calculado de acordo com a Tabela 2 deste capítulo.

- **Dimensionamento da Serpentina**

Através da equação (22) deste capítulo, e considerando-se o valor de U de acordo com o cálculo do calor transferido, encontrou-se o valor da área da superfície de transferência de calor da serpentina, A :

$$A = \frac{NUT.C_{\min}}{U} \quad (23)$$

Com o valor de A, foi possível estimar o comprimento L da serpentina, necessário para conseguir a taxa de transferência de calor calculada:

$$L = \frac{A}{\pi D_{Tubo\ Real}}. \quad (24)$$

Levando-se ainda em consideração o diâmetro interno da serpentina, a partir do valor L encontrado, estimou-se o número de passes possíveis:

$$\#passes = \frac{L}{\pi D_{interno\ Serpentina}}. \quad (25)$$

E com isso, chegou-se ao comprimento L final da serpentina:

$$L_{final} = \#passes \cdot D_{tubo}. \quad (26)$$

Todas essas equações foram montadas na planilha do Excel[®], de forma que se algum valor for alterado, o novo comprimento final L será calculado automaticamente. A quantidade de passes obtida foi arredondada para cima, ou seja, 47 passes.

3.3 DESENHOS DO PROTÓTIPO

A partir da realização dos cálculos e da obtenção de novos dados para as dimensões do protótipo, foi possível elaborar os desenhos do mesmo com o uso do Software SolidWorks[®].

O primeiro componente plotado foi a serpentina, cujas dimensões estão presentes nas Tabelas 4 e 5. A Figura 8 traz o modelo gráfico gerado:

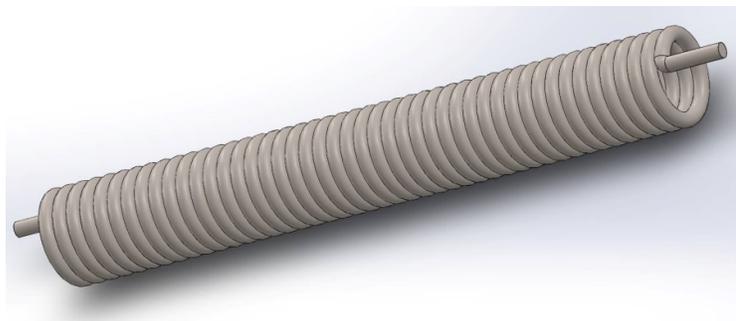


Figura 8 – Serpentina

Fonte: Autoria Própria.

O diâmetro do tubo que compõe a serpentina foi definido previamente como sendo 6,35mm (1/4”), pois este é um tamanho disponível comercialmente, que se adequa aos requerimentos do projeto, bem como possibilita a fabricação da serpentina sem que haja danos ao cano durante o enrolamento da mesmo.

Tendo-se a serpentina e as dimensões estimadas para o casco, também presentes na Tabela 4, plotou-se então o casco fechado, como apresentado na Figura 9:

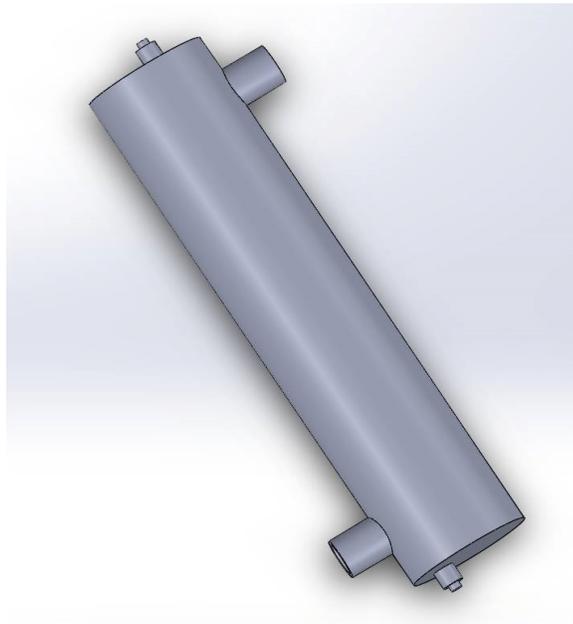


Figura 9 – Casco fechado

Fonte: Autoria Própria.

A entrada e saída do fluido frio foram posicionadas nos conectores maiores colocados nas laterais do casco, e as do fluido quente, foram posicionadas nos conectores menores, posicionados nas extremidades do cilindro.

Juntando-se ambas plotagens, se tem o trocador montado, como mostrado na Figura 10:

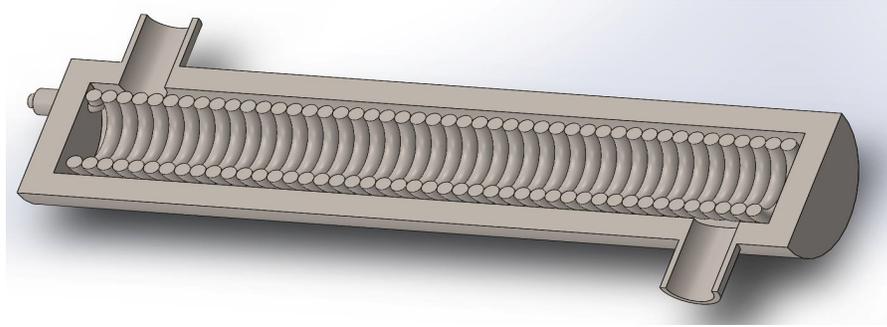


Figura 10 – Trocador montado.

Fonte: Autoria Própria.

O trocador de calor será revestido por um isolante térmico, no caso, fibra de vidro, de forma a minimizar as perdas de calor para o ambiente.

3.3.1 Projeto do Sistema de Controle

A partir da plotagem dos componentes do trocador, definiram-se os componentes necessários para a montagem de um sistema de controle, que permitirá o acompanhamento das variações térmicas decorrentes da troca de calor, provando assim a eficácia ou não do protótipo projetado. Na Figura 11, tem-se o esquemático do circuito projetado, com os equipamentos necessários e suas localizações.

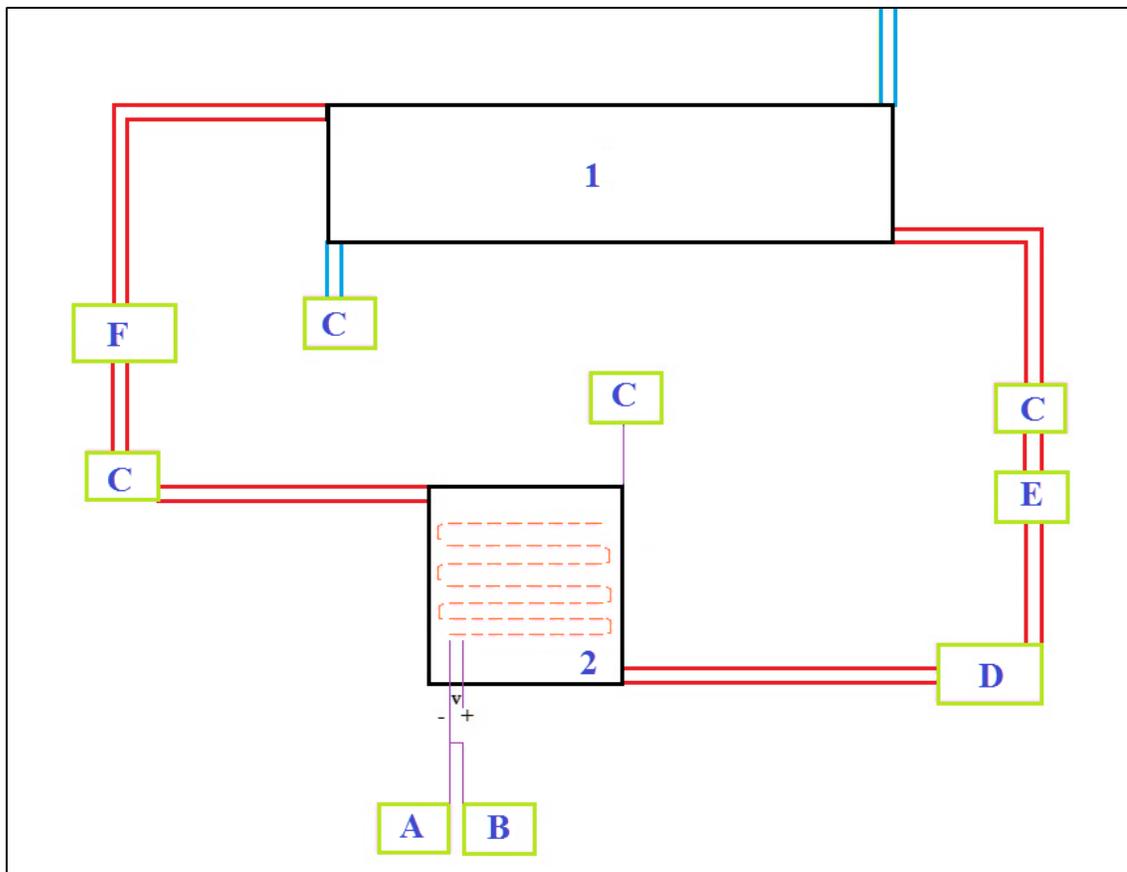


Figura 11 – Esquema representativo da montagem do sistema do trocador de calor

Fonte: Autoria própria

Nesta figura:

1 – Trocador de calor; 2 – Reservatório do nanofluido (com a resistência de aquecimento representada em verde); A – Controlador de temperatura; B – Relé; C – Termopar; D – Bomba; E – By Pass; F – Rotâmetro.

As linhas vermelhas representam a trajetória do fluido quente (nanofluido) e as azuis, a do fluido frio (água).

O circuito funciona da seguinte forma:

O nanofluido fica contido num reservatório cilíndrico, com capacidade de até 1L de fluido e que tem um termopar dentro. Abaixo deste reservatório há uma resistência elétrica, que aquece o nanofluido até a temperatura estipulada nos cálculos ($T_{q,e} = 40^{\circ}\text{C}$), que é mostrada no controlador de temperatura, acionado pelo relé (quando o fluido começar a

esfriar, ele aciona automaticamente, de forma a manter a temperatura sempre aproximadamente constante).

Após o aquecimento do nanofluido, o mesmo é direcionado à bomba, que contém um By Pass, para ajuste da vazão. Na saída da bomba há um termopar para aferir a temperatura de entrada do fluido quente ($T_{q,e}$), o nanofluido então é encaminhado ao trocador de calor. Depois da transferência de calor, o nanofluido irá para um rotâmetro, para controle de vazão, e após o mesmo há um termopar para verificar a temperatura de saída do fluido quente ($T_{q,s}$).

O fluido frio será proveniente de uma torneira comum, cuja temperatura é aferida por um termômetro comum. Na saída do fluido frio há também um termopar, para aferição da temperatura do mesmo ($T_{f,s}$). O fluido frio é então descartado diretamente em um ralo, enquanto o fluido quente retorna para o reservatório, fechando o sistema.

3.4 MATERIAIS E MÉTODOS PARA A CONSTRUÇÃO DO TROCADOR DE CALOR

O protótipo do trocador de calor e de seu sistema de controle foi construído por uma empresa terceirizada, a Multiman, localizada em Ponta Grossa/PR.

O trocador de calor (serpentina e casco) foi construído em aço inoxidável, material escolhido devido à sua inércia reativa, o que evita problemas de alteração da composição do nanofluido, bem como a possibilidade de danificação do protótipo. O mesmo material também foi utilizado na construção do reservatório do nanofluido.

A Figura 12 mostra a serpentina construída que foi posicionada dentro do casco do trocador de calor:



Figura 12- Serpentina do trocador de calor.

Fonte: Autoria Própria

Nas Figuras 13 e 14 são apresentadas imagens do trocador e do circuito em fase de testes, sendo que a montagem do sistema foi apenas experimental para verificar o funcionamento dos equipamentos utilizados.

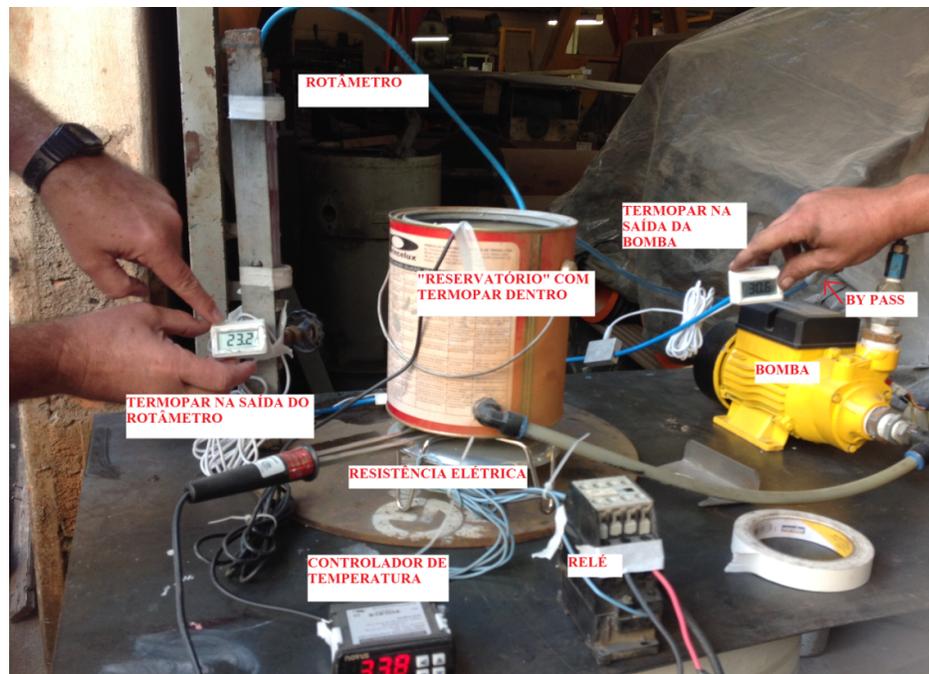


Figura 13 - Sistema de controle improvisado, montado apenas para verificação dos equipamentos.

Fonte: Autoria Própria.

O trocador de calor não aparece na Figura 13, pois o mesmo estava no chão, para facilitar o descarte da água, como pode ser visto na Figura 14.



Figura 14 - Trocador de calor, sem revestimento térmico, em fase de teste de funcionamento.

Fonte: Autoria Própria.

Após os testes de verificação de funcionamento, o sistema foi finalizado e montado, tal como mostrado nas Figuras 15 a 19.



Figura 15 - Sistema montado, sendo: 1) Reservatório de nanofluido; 2) Trocador de calor; 3) Central de controle de temperaturas e 4) Rotâmetro.

Fonte: Autoria Própria.

Sendo destacado em vermelho: 1- Reservatório de nanofluido; 2- Trocador de calor; montado dentro de uma estrutura metálica que visa proteger o revestimento térmico de fibra de vidro aplicado. 3- Central de controle de temperaturas, onde se encontram todos os visores dos termopares utilizados; 4- Rotâmetro.

Os numerais em preto que estão escritos na central de controle servem apenas para identificar os termopares instalados ao longo do sistema.

Apesar de não evidentes nas figuras, a bomba e a resistência estão localizadas abaixo da mesa de suporte do sistema, de forma a mantê-las seguras contra acidentes e contatos diretos.

A Figura 16 traz uma vista superior do sistema montado:

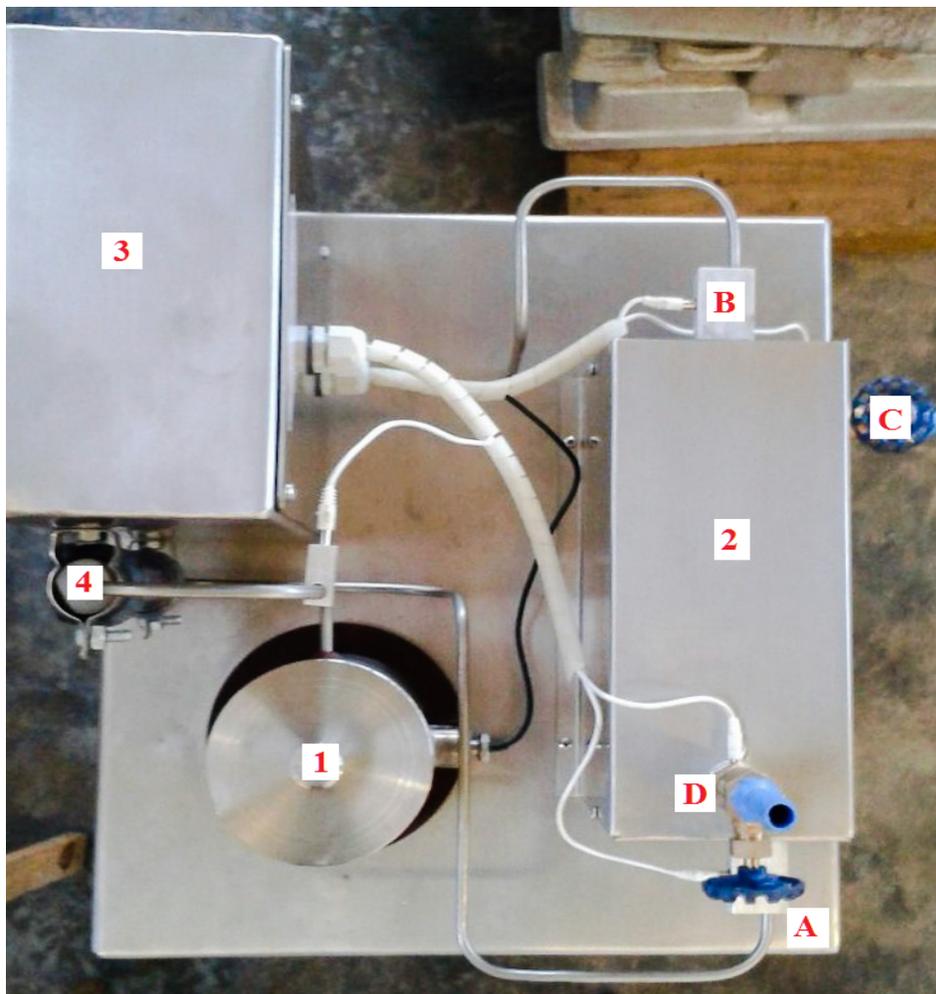


Figura 16 – Vista superior do sistema montado, sendo: 1) Reservatório de nanofluido; 2) Trocador de calor; 3) Central de controle de temperaturas; 4) Rotâmetro; A) Saída do nanofluido; B) Entrada do nanofluido; C) Entrada do fluido frio e D) Saída do fluido frio.

Fonte: Autoria Própria.

Sendo destacado em vermelho: A- Saída do nanofluido; B-Entrada do nanofluido; C- Entrada do fluido frio; D- Saída do fluido frio.

A Figura 17 mostra outra vista do sistema, deixando evidente a entrada e saída do fluido frio, bem como apontando o reservatório, o trocador e a central de controle.

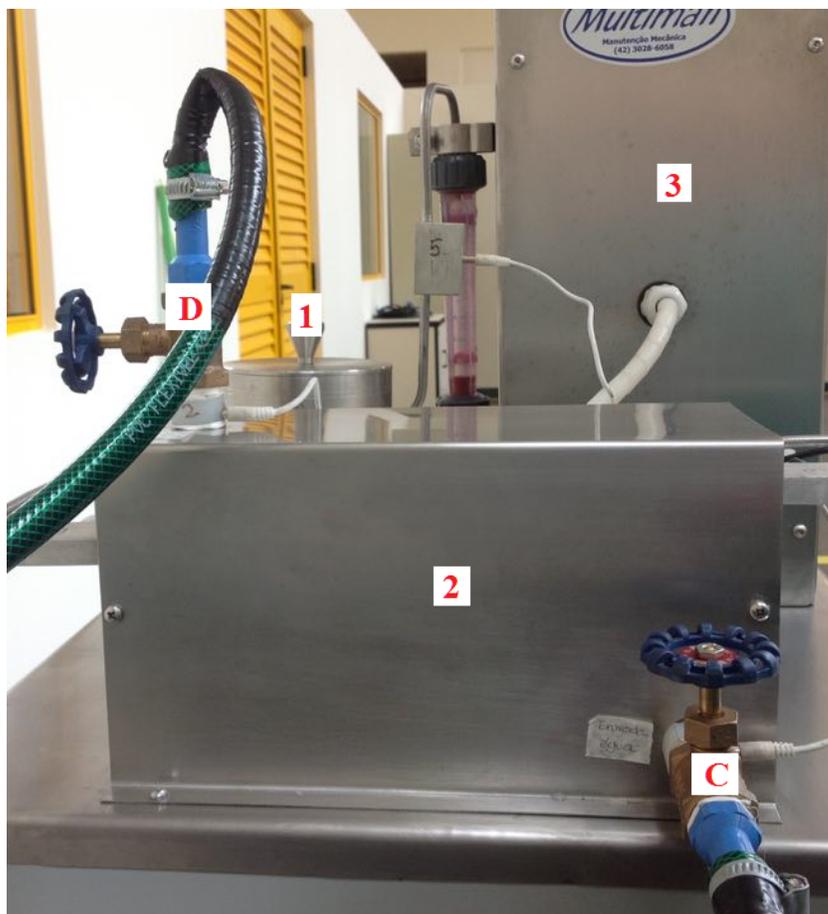


Figura 17 – Vista do sistema montado, sendo: 1) Reservatório de nanofluido; 2) Trocador de calor; 3) Central de controle de temperaturas; C) Entrada do fluido frio e D) Saída do fluido frio.

Fonte: Autoria Própria.

As Figuras 18 e 19 são as vistas laterais direita e esquerda, respectivamente, nas quais ficam evidenciadas todos os componentes do sistema, bem como as entradas e saídas de ambos os fluidos.



Figura 18 – Vista lateral direita do sistema montado, sendo: 1) Reservatório de nanofluido; 4) Rotâmetro; A) Saída do nanofluido e D) Saída do fluido frio.

Fonte: Autoria Própria.

Nessa Figura é visível que para se realizar a aferição da temperatura, tanto na entrada quanto na saída do nanofluido, foi preciso construir um mini reservatório em ambas as localizações, de forma que o termopar pudesse entrar em contato direto com o nanofluido, garantindo uma medição correta da temperatura.

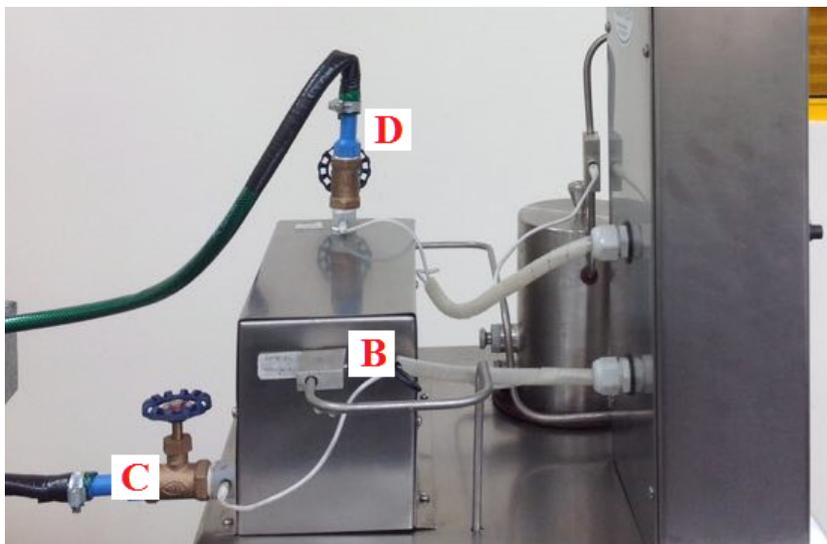


Figura 19 – Vista lateral esquerda do sistema montado, sendo: B) Entrada do nanofluido; C) Entrada do fluido frio e D) Saída do fluido frio.

Fonte: Autoria Própria.

Na Figura 19, o mini reservatório é visível na entrada do nanofluido. A entrada e saída do fluido frio não precisaram de tal adaptação, pois foram construídas para o uso de mangueiras comuns no mercado, cuja vazão garante o contato ideal do termopar com o fluido.

Com o protótipo pronto, foi possível passar à fase de testes de transferência de calor utilizando o nanofluido de ouro como líquido de arrefecimento.

3.4.1 Propagação de Erros dos Equipamentos do Trocador de Calor

Os erros propagados nas leituras obtidas no trocador de calor seriam provenientes dos erros dos termopares e do controlador de temperatura. Estes valores são informados pelos fabricantes e são mostrados na Tabela 6.

Tabela 6 – Erros dos Termopares e do Controlador de Temperatura

Equipamento	Erro de leitura ($\overline{\delta T}$)
Termopar tipo J	$\pm 2^\circ\text{C}$
Controlador de Temperatura Novus 321	$\pm 3^\circ\text{C}$

3.4.1.1 Propagação de erros nas variações de temperatura

As variações de temperatura dos fluidos são dadas pelas fórmulas:

$$\Delta T_f = T_{f,s} - T_{f,e}, \quad (27)$$

$$\Delta T_q = T_{q,e} - T_{q,s}. \quad (28)$$

A propagação de erros para somas ou diferenças de variáveis é dada pela raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros associados às medidas, ou seja:

$$\overline{\delta T_f} = \sqrt{(\overline{\delta T_{f,s}})^2 + (\overline{\delta T_{f,e}})^2}, \quad (29)$$

$$\overline{\delta T_q} = \sqrt{(\overline{\delta T_{q,e}})^2 + (\overline{\delta T_{q,s}})^2}, \quad (30)$$

onde os sub-índices f e q se referem à frio e quente, respectivamente, e os sub-índices e e s se referem à entra e sai, respectivamente. $\overline{\delta T}$ é o erro associado àquela temperatura medida.

O fluido frio tem sua temperatura de entrada e saída aferidas por termopares tipo J, ou seja, $\overline{\delta T_{f,s}} = \overline{\delta T_{f,e}} = \pm 2^\circ\text{C}$. O fluido quente tem sua temperatura de entrada aferida pelo controlador de temperatura Novus N321 e a de saída por um termopar tipo J, o que implica em $\overline{\delta T_{q,e}} = \pm 3^\circ\text{C}$ e $\overline{\delta T_{q,s}} = \pm 2^\circ\text{C}$. Substituindo estes valores nas equações (29) e (30) encontra-se $\overline{\delta T_f} = 2,8^\circ\text{C}$ e $\overline{\delta T_q} = 3,6^\circ\text{C}$, que deverão ser levados em consideração durante a obtenção de dados do trocador de calor.

3.4.1.2 Propagação de erros no cálculo do calor específico

Como citado na seção 2.2.2.2.2, o calor específico de um fluido também pode ser obtido pelas diferenças de temperaturas aferidas no trocador de calor, o que o torna sujeito à erros devido os equipamentos existentes no trocador. Considerando a equação (16) desta mesma seção, o calor específico pode ser considerado como função das variações de temperatura:

$$c_{p,q} = f(\Delta T_f, \Delta T_q).$$

A leitura do real valor de c_p seria dada da forma:

$$c_p = \bar{c}_p \pm \overline{\Delta c_p}. \quad (31)$$

Onde \bar{c}_p é o valor de c_p calculado para os valores médios de ΔT_f e ΔT_q , ou seja:

$$\bar{c}_{p,q} = \frac{m_f c_{p,f} \bar{\Delta T}_f}{m_q \bar{\Delta T}_q}. \quad (32)$$

O erro associado ao cálculo do c_p em função das temperaturas, $\overline{\delta c_p}$, é dado por:

$$\overline{\delta c_p} = \sqrt{\left(\left(\frac{\partial c_{p,q}}{\partial \Delta T_q} \right)^2 \cdot \overline{\delta T_q^2} \right) + \left(\left(\frac{\partial c_{p,q}}{\partial \Delta T_f} \right)^2 \cdot \overline{\delta T_f^2} \right)}, \quad (33)$$

na qual $\frac{\partial c_{p,q}}{\partial \Delta T}$ é a derivada parcial de $c_{p,q}$ em relação a ΔT , sub-índice q para quente e f para frio, calculada em seu valor médio, $\bar{\Delta T}$, ou seja:

$$\frac{\partial c_{p,q}}{\partial \Delta T_q} = \frac{-m_f c_{p,f} \bar{\Delta T}_f}{m_q \bar{\Delta T}_q^2}, \quad (34)$$

$$\frac{\partial c_{p,q}}{\partial \Delta T_f} = \frac{m_f c_{p,f}}{m_q \bar{\Delta T}_q}. \quad (35)$$

Para a equação (35) também se tem que $\overline{\delta T_q}$ e $\overline{\delta T_f}$ são os valores calculados na subseção 3.4.1.1, ou seja, 3,6°C e 2,8°C, respectivamente.

O erro associado ao cálculo do c_p vai depender, portanto, das diferenças de temperaturas obtidas para cada fluido quente utilizado.

3.4.2 Correção da Leitura do Rotâmetro

O rotâmetro instalado no trocador de calor tem sua graduação feita para água a 20°C, o que agrega erros na leitura da vazão, considerando que o fluido quente sempre estará a uma temperatura superior a esta quando passar pelo equipamento.

A correção da leitura pode ser feita por meio da seguinte equação, fornecida pelo fabricante do rotâmetro utilizado:

$$F_c = \sqrt{\frac{(D_{flut} - \rho_1)(\rho_2)}{(D_{flut} - \rho_2)(\rho_1)}} \quad (36)$$

na qual F_c é o fator de correção da leitura, D_{flut} é o peso específico do material do flutuador, ρ_1 é a densidade do líquido de calibração e ρ_2 é a densidade do líquido que se deseja medir.

A vazão real será dada por:

$$\dot{V}_{real} = \dot{V}_{lida} F_c. \quad (37)$$

O flutuador existente no rotâmetro do trocador de calor é de Polipropileno carregado, com densidade de 1150 kg/m³, logo, peso específico de 11,28 N/m³. Água comum a 20°C é o líquido de calibração, portanto, ρ_1 é 998,24 kg/m³ e a densidade do líquido que se deseja medir, ρ_2 , dependerá do fluido testado e de sua temperatura no momento em que passa pelo rotâmetro.

4 TESTES PRELIMINARES REALIZADOS NO TROCADOR DE CALOR

Após a construção do protótipo do trocador de calor, foram feitos testes para verificação do correto funcionamento do mesmo, bem como testes preliminares utilizando o nanofluido de ouro como fluido de arrefecimento.

4.1 TESTES DE FUNCIONAMENTO

Após o recebimento do trocador de calor, testes iniciais feitos com água destilada e etileno glicol foram realizados, com o objetivo de averiguar o funcionamento dos termopares, sensores, bomba, resistência e se o sistema estava funcionando do ponto de vista termodinâmico. Foram realizados três testes para ambos os fluidos, nos quais as vazões frias aumentavam gradativamente, de forma a possibilitar a verificação do comportamento da troca de calor em função desta vazão.

4.1.1 Água Destilada

Testes com água destilada foram realizados com o objetivo de se verificar a qualidade da aferição de temperaturas dos termopares instalados. O trocador teve água corrente como fluido frio, e no reservatório foi adicionada água destilada como fluido quente. Foram realizados três testes com três vazões diferentes para o fluido frio, como explicado anteriormente, de forma que a vazão do fluido quente variou de 25L/h a 50L/h, em faixas de 5L/h, para todos os testes. Foram medidas três variações de temperatura para cada vazão do fluido quente.

Para a medição das vazões do fluido frio, encheu-se um Becker com água proveniente do trocador de calor enquanto se marcou o tempo com um cronômetro. Os valores eram medidos após verificar-se que havia, no mínimo, uma diferença de 5°C entre as temperaturas de entrada e saída do fluido frio, garantindo assim a diminuição do erro proveniente dos termopares.

A Tabela 7 traz mais algumas informações sobre os testes.

Tabela 7 – Vazões Obtidas Para o Fluido Frio – Teste Água Destilada

Teste	Volume medido (ml)	Tempo medido (s)	\dot{V}_{obtida} (L/h)
1	400	57	25,26
2	400	47	30,64
3	400	42	34,29

O objetivo dos testes era calcular o calor específico da água destilada, para tanto se utilizou os dados da Tabela 8 como valores de referência, de forma a possibilitar a comparação de resultados.

Tabela 8 – Propriedades dos Fluidos na Temperatura Média de Entrada – Teste Água Destilada

Água Comum		Água Destilada	
Calor específico	4,180 kJ/kgK	Calor específico	4,179 kJ/kgK
Densidade	1000 kg/m ³	Densidade	991,83 kg/m ³

Fonte: Incropera (2008)

É importante ressaltar que para os cálculos realizados, a variação na temperatura de entrada do fluido frio foi levada em consideração, ou seja, o calor específico e a densidade utilizados eram os valores tabelados para a temperatura apontada pelo trocador de calor. A mesma consideração também foi feita para o fluido quente, utilizando-se a densidade referente à temperatura de entrada lida do mesmo.

Os resultados referentes às médias dos valores obtidos para o Teste 1 estão apresentados na Tabela 9. O valor de ρ_2 considerado é referente à temperatura média de saída do fluido quente, devido à localização do rotâmetro no sistema, como explicado na subseção 3.4.2.

Tabela 9 – Resultados Obtidos Para o Teste 1 Com Água Destilada

\dot{V}_{lida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
25	994,03	1,00329	25,082	5,76	5,42	4,23	0,07
30	991,08	1,00493	30,148	5,25	5,45	3,53	0,06
35	991,09	1,00492	35,172	4,90	5,60	3,03	0,05
40	991,09	1,00492	40,197	4,75	5,55	2,65	0,04
45	991,09	1,00492	45,221	4,48	5,50	2,35	0,03
50	991,10	1,00491	50,246	4,27	6,30	2,12	0,03

Observa-se que houve uma grande variação do calor específico calculado.

Para o Teste 2, os resultados seguem na Tabela 10:

Tabela 10 - Resultados Obtidos Para o Teste 2 Com Água Destilada

\dot{V}_{lida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
25	993,60	1,00353	25,088	5,98	4,9	5,11	0,09
30	993,80	1,00342	30,103	5,63	4,65	4,26	0,07
35	993,60	1,00353	35,123	5,10	4,94	3,66	0,06
40	993,50	1,00358	40,143	4,73	4,83	3,20	0,05
45	993,40	1,00364	45,164	4,48	5,10	2,85	0,04
50	993,40	1,00364	50,182	4,23	5,08	2,57	0,04

Nota-se, novamente, uma ampla variação do calor específico calculado para a água destilada.

A Tabela 11 traz os resultados do Teste 3:

Tabela 11 - Resultados Obtidos Para o Teste 3 Com Água Destilada

\dot{V}_{lida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
25	994,60	1,00297	25,074	6,56	5,36	5,72	0,11
30	994,30	1,00314	30,094	6,60	6,46	4,78	0,08
35	994,30	1,00314	35,110	6,46	5,98	4,10	0,07
40	994,50	1,00303	40,121	6,20	6,28	3,60	0,06
45	994,20	1,00320	45,144	6,13	7,08	3,20	0,05
50	994,00	1,00331	50,165	5,54	7,16	2,89	0,04

Assim como para os testes anteriores, o c_p calculado só é aceitável na faixa de 30 a 35 L/h, pois se encontra mais próximo do valor tabelado de 4,18 kJ/kgK.

Dados os resultados gerados, estima-se que a vazão apropriada para a água destilada, agindo como fluido quente seria em torno dos 30L/h, para vazões frias também entre 30L/h e 35L/h.

4.1.2 Etileno Glicol

Neste caso, o fluido quente foi o etileno glicol, o mesmo procedimento dos testes realizados com água destilada foi adotado nesta etapa. Para o cálculo do calor específico do etileno glicol, utilizaram-se os dados mostrados da Tabela 12 como referência:

Tabela 12 - Propriedades dos Fluidos na Temperatura Média de Entrada – Teste Etileno Glicol

Água Comum		Etileno Glicol	
Calor específico	4,180 kJ/kgK	Calor específico	2,488 kJ/kgK
Densidade	1000 kg/m ³	Densidade	1099 kg/m ³

Fonte: Incropera (2008)

Assim como para a água destilada, foram realizados três testes com três vazões diferentes para o fluido frio, com a coleta de três variações de temperatura para as seguintes vazões do fluido quente: 60 L/h, 55 L/h, 50 L/h e 45 L/h. A Tabela 13 traz mais algumas informações sobre os testes.

Tabela 13 – Vazões Obtidas Para o Fluido Frio – Teste Etileno Glicol

Teste	Volume medido (ml)	Tempo medido (s)	\dot{V}_{obtida} (L/h)
1	400	65	22,15
2	290	38	27,47
3	420	50	30,24

O mesmo procedimento para medição da vazão do fluido frio realizado nos testes com água destilada foi realizado nos testes com etileno glicol.

Os resultados referente às médias dos valores obtidos para o Teste 1 estão apresentados nas Tabela 14 abaixo:

Tabela 14 - Resultados Obtidos Para o Teste 1 Com Etileno Glicol

\dot{V}_{tida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
45	1105,11	0,94638	42,587	15,00	7,00	1,918	0,026
50	1105,78	0,94606	47,303	11,90	7,20	1,749	0,024
55	1105,27	0,94630	52,047	12,90	6,53	1,580	0,021
60	1106,00	0,94596	56,758	11,90	7,93	1,461	0,020

Observa-se que para nenhum valor de vazão no Teste 1 houveram resultados aceitáveis.

Os resultados obtidos para o Teste 2 são mostrados na Tabela 15.

Tabela 15 - Resultados Obtidos Para o Teste 2 Com Etileno Glicol

\dot{V}_{lida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
45	1104,34	0,94675	42,604	13,43	5,60	2,68	0,04
50	1104,67	0,94659	47,329	16,02	5,46	2,36	0,03
55	1104,41	0,94671	52,069	15,48	5,86	2,13	0,03
60	1104,72	0,94657	56,794	16,06	5,64	1,93	0,03

Para os valores obtidos no Teste 2, assim como nos testes com água destilada, houve uma grande variação dos calores específicos calculados.

O Teste 3 traz seus resultados na Tabela 16:

Tabela 16 - Resultados Obtidos Para o Teste 3 Com Etileno Glicol

\dot{V}_{lida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
45	1104,03	0,94689	42,610	18,14	4,86	2,59	0,04
50	1104,35	0,94674	47,337	16,48	5,14	2,33	0,03
55	1104,53	0,94666	52,066	14,73	5,23	2,13	0,03
60	1104,75	0,94655	56,793	13,33	5,40	1,97	0,03

Pelos testes realizados, observa-se que a faixa de vazão na qual o calor específico do etileno glicol é aceitável é entre 45 e 50L/h, pois o calor específico encontrado coincidirá com o tabelado de 2,49 kJ/kgK.

Tanto nos testes com água destilada quanto com etileno glicol, ficou evidente que o calor específico do fluido quente só pode ser considerado válido para algumas vazões quentes quando a vazão do fluido frio era superior à 30L/h. Tal fato pode ser explicado por um possível erro de construção do protótipo, que faz com que o trocador de calor não seja plenamente preenchido pelo fluido frio, levando a uma troca deficiente de calor. Maiores vazões de fluido frio, ao mesmo tempo em que aumentam o volume frio dentro do trocador,

também diminuem a diferença entre as temperaturas de entrada e saída deste fluido, o que por sua vez, devido à baixa precisão dos termopares, aumenta o erro associado àquela leitura, resultando em maiores erros no cálculo do calor específico. Tal fato foi levado em consideração nos testes posteriormente realizados.

4.2 TESTES PARA COMPARAÇÃO DE CALOR TROCADO

Estes testes foram realizados com o objetivo de coletar dados para comparação do calor trocado quando três fluidos quentes são submetidos ao mesmo fluido frio de vazão constante. Devido ao erro comentado ao final da seção 4.1.2, foi adotada uma vazão fria constante de 34,55 L/h, para garantir o preenchimento do trocador de calor com volume frio adequado. Os fluidos quentes, água destilada, etileno glicol e nanofluido de ouro com $\phi=0,11$, tiveram dados coletados para suas vazões variando de 25L/h a 50L/h.

4.2.1 Dados Coletados para Água Destilada

Para este teste, utilizou-se a Tabela 17 com valores de referências, seguindo o mesmo procedimento realizado na seção 4.1.1 para a realização dos cálculos.

Tabela 17 - Propriedades dos Fluidos na Temperatura Média de Entrada – Água Destilada

Água Comum		Água Destilada	
Calor específico	4,180 kJ/kgK	Calor específico	4,179 kJ/kgK
Densidade	1000 kg/m ³	Densidade	991,75 kg/m ³

Fonte: Incropera (2008)

Os dados coletados apresentam-se na Tabela 18:

Tabela 18 – Dados Obtidos da Água Destilada no Teste de Troca de Calor

\dot{V}_{lida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
25	994,71	1,00291	25,073	7,20	4,60	5,737	0,110
30	994,05	1,00328	30,098	6,93	5,60	4,803	0,085
35	994,26	1,00316	35,111	6,37	5,23	4,119	0,068
40	994,10	1,00325	40,130	5,67	5,40	3,614	0,057
45	994,09	1,00326	45,147	6,43	5,47	3,206	0,049
50	994,08	1,00326	50,163	5,20	5,30	2,894	0,044

Novamente há uma grande variação nos cálculos do calor específico, sendo este somente aceitável para uma vazão quente entre 30 e 35L/h.

4.2.2 Dados Coletados para Etileno Glicol

Para este teste, assim como para a água destilada, utilizou-se a Tabela 19 com valores de referências, seguindo o mesmo procedimento realizado na seção 4.1.2 para a realização dos cálculos.

Tabela 19 - Propriedades dos Fluidos na Temperatura Média de Entrada – Etileno Glicol

Água Comum		Etileno Glicol	
Calor específico	4,180 kJ/kgK	Calor específico	2,537 kJ/kgK
Densidade	1000 kg/m ³	Densidade	1091,27 kg/m ³

Fonte: Incropera (2008)

Os dados coletados apresentam-se na Tabela 20:

Tabela 20 – Dados Obtidos do Etileno Glicol no Teste de Troca de Calor

\dot{V}_{lida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ (°C)	$\overline{\Delta T}_f$ (°C)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
25	1106,51	0,94571	23,643	19,33	3,87	5,28	0,09
30	1105,49	0,94620	28,386	17,57	4,23	4,42	0,07
35	1106,24	0,94585	33,105	20,27	4,10	3,76	0,06
40	1106,48	0,94573	37,829	20,50	3,87	3,29	0,05
45	1105,91	0,94600	42,570	19,47	4,23	2,93	0,04
50	1105,09	0,94639	47,319	16,70	4,50	2,67	0,04

Os erros percebidos na Tabela 20 já eram esperados, pois comparando com a Tabela 16, o etileno glicol apresenta um melhor comportamento para vazões quentes entre 45 e 60L/h para vazões frias em torno dos 30L/h. Pode-se assumir que obter-se-ia melhores resultados para maiores vazões quentes.

4.2.3 Dados Coletados para Nanofluido de Ouro ($\varphi=0,11$)

Para se obter o nanofluido utilizado, diluiu-se 100ml de uma solução concentrada de nanopartículas de ouro em 800ml de água destilada. Mais informações sobre a solução de nanopartículas utilizada são mostradas na Tabela 21:

Tabela 21 – Características das NPAu utilizadas

Partículas /ml	$3,9 \cdot 10^{12}$
Diâmetro nanopartículas (nm)	12

Para a obtenção da concentração, utilizou-se a equação (38):

$$\varphi_1 v_1 = \varphi_2 v_2, \quad (38)$$

na qual φ_1 é a concentração da solução concentrada utilizada, $3,9 \cdot 10^{12}$ partículas/ml, v_1 é o volume utilizado da solução concentrada, φ_2 é a concentração que se deseja calcular e v_2 é o volume total obtido de nanofluido (volume da solução concentrada mais o volume de fluido base).

Para este teste, o nanofluido teve sua densidade aferida com um densímetro e seu valor de calor específico considerado foi calculado de acordo com a equação (7) apresentada na literatura, utilizando as propriedades da água destilada (fluido base) a 23°C e o calor específico das nanopartículas como o calor específico do ouro na mesma temperatura. As informações obtidas para temperatura ambiente são apresentadas na Tabela 22.

Tabela 22 - Propriedades dos Fluidos na Temperatura Ambiente – Teste NF 0,11

Água Comum		NF 0,11	
Calor específico	4,180 kJ/kgK	Calor específico	3,989 kJ/kgK
Densidade	1000 kg/m ³	Densidade	990 kg/m ³

Os resultados obtidos encontram-se na Tabela 23.

Tabela 23 – Dados Obtidos do Nanofluido ($\varphi = 0,11$) no Teste de Troca de Calor

\dot{V}_{tida} (L/h)	ρ_2	Fc	\dot{V}_{real} (L/h)	$\overline{\Delta T}_q$ ($^\circ\text{C}$)	$\overline{\Delta T}_f$ ($^\circ\text{C}$)	c_p (kJ/kgK)	$\overline{\delta c_p}$
25	993,80	1,00342	25,085	6,10	4,10	5,74	0,11
30	993,46	1,00361	30,108	5,53	4,43	4,80	0,08
35	993,63	1,00351	35,123	5,27	4,33	4,12	0,07
40	993,36	1,00366	40,146	4,85	4,50	3,61	0,06
45	993,48	1,00359	45,162	4,70	4,33	3,21	0,05
50	993,34	1,00367	50,183	4,50	4,65	2,89	0,04

Como o nanofluido utilizado possui uma densidade muito próxima à de seu fluido base, considerou-se ρ_2 como a densidade da água destilada para a temperatura de saída média obtida do nanofluido.

4.4 RESULTADOS DE TROCA DE CALOR

Com os dados obtidos na seção 4.3, calculou-se o calor trocado por cada fluido por meio das equações (14) e (15). A partir dos valores encontrados, calculou-se então o Coeficiente Global de Transferência de Calor, U , através da equação:

$$U = \frac{Q}{A \cdot \Delta T_{ml}}, \quad (39)$$

na qual Q é o calor trocado pelo fluido, A é a área de transferência de calor, no caso a área externa da serpentina e ΔT_{ml} é a média logarítmica das diferenças de temperatura que, de acordo com Incropera (2008), é dada por:

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)}, \quad (40)$$

onde, para trocadores com escoamento paralelo:

$$\Delta T_1 = T_{q,ent} - T_{f,ent}, \quad (41)$$

$$\Delta T_2 = T_{q,sai} - T_{f,sai}. \quad (42)$$

Os resultados obtidos estão demonstrados na Tabela 24:

Tabela 24 – Coeficiente Global de Transferência de Calor Considerando o Calor Específico Calculado

Vazão quente (L/h)	$U_{\text{Água Destilada}}$ (kJ/m ² K)	$U_{\text{Etileno Glicol}}$ (kJ/m ² K)	$U_{\text{Nanofluido } (\phi=0,11)}$ (kJ/m ² K)
25	10,53	9,04	11,49
30	9,74	8,58	11,64
35	10,01	9,07	11,62
40	10,45	8,90	11,50
45	9,77	8,84	11,65
50	10,40	8,56	11,75

Com estes valores, o comportamento obtido é demonstrado na Figura 20:

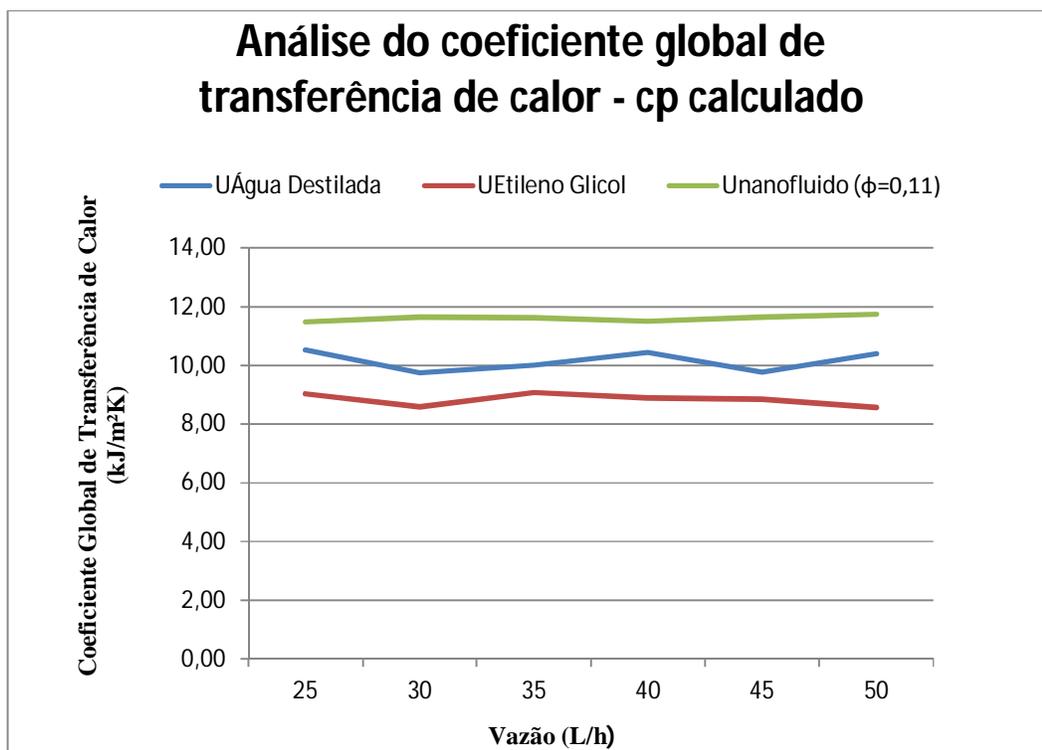


Figura 20 – Coeficiente global de transferência de calor de cada fluido considerando o calor específico calculado.

Fonte: Autoria Própria

O comportamento obtido não se enquadra no que era esperado, pois como já analisado ao longo dos testes realizados, o trocador de calor apresentou erros construtivos que inviabilizaram a obtenção de resultados que condizem com valores reais.

Construindo-se um gráfico comparativo de coeficiente global de transferência de calor, porém utilizando-se o calor específico tabelado, os valores obtidos seriam os apresentados na Tabela 25.

Tabela 25 – Coeficiente Global de Transferência de Calor Considerando o Calor Específico Tabelado

Vazão quente (L/h)	$U_{\text{Água Destilada}}$ (kJ/m ² K)	$U_{\text{Etileno Glicol}}$ (kJ/m ² K)	$U_{\text{Nanofluido } (\varphi=0,11)}$ (kJ/m ² K)
25	7,67	4,35	7,98
30	8,48	4,92	9,67
35	10,16	6,12	11,26
40	12,08	6,87	12,71
45	12,74	7,65	14,49
50	15,01	8,14	16,20

Com estes valores, o comportamento seria conforme o mostrado na Figura 21:

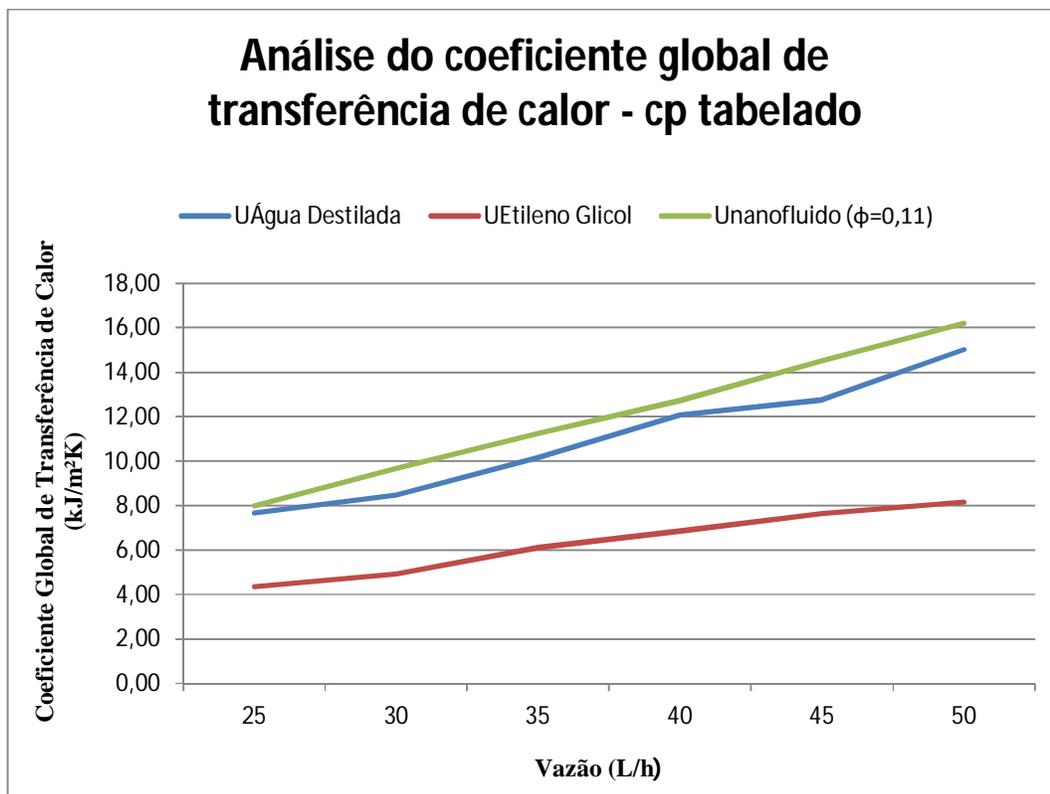


Figura 21 – Coeficiente global de transferência de calor de cada fluido considerando o calor específico tabelado.

Fonte: Autoria Própria

A Figura 21 ilustra um comportamento que seria o mais próxima da realidade, colocando o nanofluido como fluido com maior troca de calor. Analisando pela Tabela 25 e Figura 21, pode-se dizer que com um aumento da concentração do nanofluido, o mesmo, provavelmente, trocaria uma quantidade ainda mais considerável de calor em relação aos outros dois fluidos analisados.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Projetou-se e construiu-se um trocador de calor que serve aos propósitos do trabalho, porém ao longo do desenvolvimento deste, identificaram-se problemas construtivos, que devem ser corrigidos antes do desenvolvimento de maiores pesquisas relacionadas ao uso de nanofluidos neste protótipo.

Sugere-se para trabalhos futuros as seguintes correções no protótipo criado:

- Revisão do modelo matemático utilizado, levando-se em consideração as propriedades termofísicas medidas do nanofluido a ser utilizado, e não as calculadas, para o cálculo das dimensões mais apropriadas para o protótipo.
- Modificação dos compartimentos de entrada e saída do nanofluido no trocador, deixando-os no sentido contracorrente, que, conforme Incropera (2008), eleva o calor trocado entre os fluidos.
- Reposicionamento do trocador de calor, colocando-o na posição vertical, de forma a permitir o preenchimento completo do casco com o fluido frio, sendo a saída deste localizada na parte superior do protótipo.
- Troca dos termopares utilizados, buscando-se equipamentos mais precisos, como por exemplo, o uso de sensores do tipo PT 100.
- Troca ou desenvolvimento de um rotâmetro mais preciso e adaptado às características do fluido quente analisado, ou seja, com graduação referente à temperatura de saída quente e sua densidade para a mesma.
- Troca da bomba utilizada por um modelo com carcaça de material não reativo. Durante a realização de testes com nanofluido, percebeu-se que o mesmo, após passagem pelo trocador de calor, oxidava-se, apesar do protótipo ter sido feito de aço inoxidável, deixando a bomba, cuja carcaça é de ferro fundido (único modelo disponível para os requisitos do sistema- baixa vazão e potência), como possível fonte do problema.

O comportamento de troca de calor do nanofluido de ouro não pode ser plenamente analisado devido aos erros embutidos no trocador, porém percebeu-se que este fluido teve capacidade de troca de calor superior ao do etileno glicol. Sugere-se a realização de novos testes, posteriores às modificações propostas no protótipo, com diferentes concentrações de

nanofluido e até mesmo variações do material utilizado para a produção das nanopartículas que compõem o nanofluido, como por exemplo, o uso de nanopartículas de prata, titânio ou cobre.

REFERÊNCIAS

BADARRA FILHO, E.P; RIBATSKI, G. J. C; PARISE, J. A. R. **Escoamento monofásico de nanofluidos no interior de tubos.** In: Brazilian Congress of Thermal Engineering and Science. Belo Horizonte, 2008, v. 12, p. 1-10.

BECK, M.P; YUAN, Y; WARRIER, P; TEJA, A. S. **The effect of particle size on the thermal conductivity of alumina nanofluids.** Journal Nanoparticle Research, 2009, v. 11, p. 1129-1136.

CORCIONE, M. **Heat transfer features of buoyancy-driven nanofluids inside rectangular enclosures differentially heated at the sidewalls.** International Journal of Thermal Science, 2012, v. 49, p. 1536-1546.

CHOI, S. U. S; XU, X; KEBLINSKI, P; YU, W. **Nanofluids can take the heat.** Illinois: ANL, 2002, 9p. Relatório Técnico.

CHOI, S. U. S. **Anomalous Thermal Conductivity Enhancement in Nanotube Suspensions.** Applied Physics Letter , 2001, v. 79, p. 2252-2254.

CHONG, K. P. **Nanoscience and Engineering in Mechanics and Materials.** J. of Physics & Chemistry of Solids, Elsevier, 2004, v. 65, p. 1501-1506.

CHONG, K. P. **Nano Science and Engineering in Mechanics and Smart Materials.** Plenary Lecture, 2nd Int'l Conf. on Smart Materials and Nanotechnology in Engineering, Weihai, China, July 2009.

Da SILVA, A. C. M. **Transferência de calor em nanofluidos – potencialidades e desafios.** 2010. Dissertação de mestrado – Universidade de Aveiro, Aveiro, 2010.

DAS, S. K; CHOI, S. U; YU, W; PRADEEP, T. **Nanofluids: Science and technology.** John Wiley & Son Inc., 2008.

ELIAS, M. M; MIQDAD, M. MAHBUBUL, I. M; SAIDUR, R. et al. **Effect of nanoparticle shape on the heat transfer and thermodynamic performance of a shell and tube heat exchanger.** International Communications in Heat and Mass Transfer, 2013, v. 44, p. 93-99.

GHERASIM, I; ROY, G; NGUYEN, C. T; VO-KNOG, D. **Experimental investigation of nanofluids in confined laminar radial flows.** International Journal of Thermal Science, 2009, v. 48, p. 1486-1493.

GHASEMI, B; AMINOSSADATI, S. **Brownian motion of nanoparticles in a triangular enclosure with natural convection.** International Journal of Thermal Science, 2010, v. 4, p. 931-940.

HWANG, Y; LEE, J-K; JEONG, Y-M; CHEONG, S; AHN Y-C; KIM S. H. **Production and dispersion stability of nanoparticles in nanofluids.** Powder Technology, 2008, v. 186, p. 145-153.

INCROPERA, Frank P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa.** 6. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2008. xix, 643 p. + CD-ROM ISBN 8521613784.

JERÓNIMO, M. A. S; MELO, L. F; BRAGA, A. S; FERREIRA, P. J. B. F; MARTINS, C. **Monitoring the thermal efficiency of fouled heat exchanger. – a simplified method.** *Exper. Thermal and Fluid Science*, 1997, v. 14, p. 455–463.

KAKAÇ, S; LIU, H; PRAMUANJAROENKIJ, A. **Heat exchangers: selection, rating and thermal design.** 3rd. ed. Boca Raton, US: CRC Press, 2012. 615 p. ISBN 9781439849903.

KANNADASAN, N; RAMANATHAN, K; SURESH, S. **Comparison of heat transfer and pressure drop in horizontal and vertically helically coiled heat exchanger with CuO/water based nanofluids.** *Exp. Therm. Fluid. Sci*, 2012, v. 42, p. 64-70.

KHAIRUL, M. A; SAIDUR, R; RAHMAN, M. M; ALIM, M. A; HOSSAIN, A; ABDIN, Z. **Heat transfer and thermodynamic analyses of a helically coiled heat exchanger using different types of nanofluids.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 2013, v. 67, p. 398-403.

LEE, C. H., PETERSON, G. P. **The effect of particle size on the effective thermal conductivity of Al₂O₃-water nanofluids.** Journal of Applied Physics, 2007, v. 101, id 044312.

LEE, W. J; KJEANG, E. **Nanofluidic fuel cell.** Journal of Power Sources, 2013, v. 242, p. 472-477.

LENART, V. M; TURCHIELLO, R. F; GOYA, G. F; GÓMEZ, S. L. **Enhanced Thermal Lens Effect in Gold Nanoparticle-Doped Lyotropic Liquid Crystal by Nanoparticle Clustering Probed by Z-Scan Technique.** Brazilian Journal of Physics (Impresso), 2015, v. 45, p. 213-218.

MOHAMMED, H. A; NARREIN, K. **Thermal and hydraulic characteristics of nanofluids flow in a helically coiled tube heat exchanger.** International Communications in Heat and Mass Transfer, 2012, v. 39, p. 1375-1383.

OLIVEIRA, G. A. **Síntese e caracterização de nanofluidos de prate.** 2012. 120f. Dissertação de mestrado – Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, 2012.

PRABJANJAN, D. G; RAGHAVAN, G. S. V; RENNIE, T. J. **Comparison of heat transfer rates between a straight tube heat exchanger and a helically coiled heat exchanger.** International Communications in Heat and Mass Transfer, 2002, v. 29, p. 185-191.

SisNano: Sistema Nacional de Laboratórios em Nanotecnologias. Disponível em: <<http://nano.mct.gov.br/data/archive/1f3b275b40-4eb7134f234.pdf>>. Acesso em: 29 ago. 2014.

TURKEVICH, J., Stevenson, P. C., Hillier, J. **A study of the nucleation and growth processes in the synthesis of colloidal gold.** Discuss. Faraday. Soc. 1951, v. 11, p. 55–75.

VAJHA, R. S; DAS, D. K. **Experimental determination of thermal conductivity of three nanofluids and development of new correlations.** International Journal of Heat and Mass Transfer, 2009, v. 52, p. 4675-4692.

XIE, H. Q. **Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumina particles.** Journal of Applied Physics, 2002, v. 91, p. 4568-4572.

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

WEN, D. S; DING, Y. L. **Formulation of nanofluids for natural convective heat transfer applications.** International Journal of Heat and Fluid Flow, 2005, v. 26, p. 855-864.

YU, W; FRANCE, D. M; CHOI, S. U. S; RUTBORT, J. L. **Review and assessment of nanofluido technology for transportation and other applications.** U.S.: ANL – DOE, 2007, 75p. Relatório Técnico: ANL/ESD/07-9.