



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA

ROGÉRIO FELICIANO DE MOURA SANTOS

**BALANÇO DE ENERGIA E AVALIAÇÃO HEURÍSTICA DE PARÂMETROS DE
ABSORÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOTÉRMICO BASEADO NO
NANOFLUIDO DIÓXIDO DE TITÂNIO-ÁGUA DEIONIZADA**

FORTALEZA

2019

ROGÉRIO FELICIANO DE MOURA SANTOS

BALANÇO DE ENERGIA E AVALIAÇÃO HEURÍSTICA DE PARÂMETROS DE
ABSORÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOTÉRMICO BASEADO NO NANOFLUIDO
DIÓXIDO DE TITÂNIO-ÁGUA DEIONIZADA

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de concentração: Processos, equipamentos e sistemas para energias renováveis.

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

FORTALEZA

2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Biblioteca Universitária
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

S238b Santos, Rogério Feliciano de Moura.

Balanco de energia e avaliação heurística de parâmetros de absorção de um sistema solar fototérmico baseado no nanofluido dióxido de titânio-água deionizada / Rogério Feliciano de Moura Santos. – 2019. 81 f. : il.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2019.

Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

1. Nanopartículas. 2. Balanço de energia. 3. Propriedades ópticas. 4. Busca Harmônica. I. Título.

CDD 620.1

ROGÉRIO FELICIANO DE MOURA SANTOS

BALANÇO DE ENERGIA E AVALIAÇÃO HEURÍSTICA DE PARÂMETROS DE
ABSORÇÃO DE UM SISTEMA SOLAR FOTOTÉRMICO BASEADO NO
NANOFLUIDO DIÓXIDO DE TITÂNIO-ÁGUA DEIONIZADA

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para a obtenção do Título de Mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos, Equipamentos e Sistemas para Energias Renováveis.

Aprovada em 12/04/2019

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha (Orientador)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Dr. André Valente Bueno
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Prof. Me. Erilson de Sousa Barbosa
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Deus e à minha família.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por me guiar e me abençoar todos os dias, me proporcionando esta oportunidade única.

Aos meus pais, Marlene e Abrão, pelo amor incondicional, compreensão e as palavras de apoio não obstante a distância física.

Aos meus irmãos, Alice e Paulo Bruno, pela amizade em todos os momentos.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Ao professor Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, pela paciência, disponibilidade em todos os momentos e pela excelente orientação, bem como ao professor Dr. Ricardo José Pontes Lima que liderou e organizou o estudo desse projeto.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. André Valente Bueno e Me. Erilson de Sousa Barbosa pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao Valdi, secretário do programa de pós-graduação pela grande ajuda durante todo mestrado.

Aos colegas da turma de mestrado, pelo companheirismo no decorrer da caminhada, especialmente o Stéphano Praxedes, pela amizade e presença diária nas tarefas do laboratório e ao Marcus Macedo e Lindemberg Ferreira, pelo auxílio nos códigos computacionais, essenciais para a finalização deste estudo.

“Dum Deus calculat et cogitationem exercet, fit mundus (Enquanto Deus calcula e exerce seu pensamento, o mundo se faz). ”

(Gottfried Wilhelm Leibniz)

RESUMO

A absorção solar direta baseada em nanopartículas é uma tecnologia que tem se mostrado promissora para sistemas que utilizam a energia como calor útil. Este trabalho investigou experimentalmente o comportamento dos perfis de temperatura de quatro concentrações (12,5 ppm; 25 ppm; 50 ppm; 75 ppm) de nanopartículas de dióxido de titânio dispersas em água deionizada em um sistema de absorção direta da luz solar. O balanço de energia do sistema foi desenvolvido para analisar os processos de transferência de calor envolvidos. Além disso, o método computacional meta-heurístico da Busca Harmônica foi utilizado para encontrar as propriedades ópticas de absorvidade do fluido e albedo do solo. O sistema de testes é composto por perfis de alumínio e contém duas células de testes de vidro. Os experimentos foram realizados durante o período compreendido entre outubro e dezembro de 2018, das 06:00 às 18:00 horas. Em cada célula foram inseridos três termopares responsáveis pela medição da temperatura. Além disso, outro termopar foi colocado na parte de fora da estrutura para a medição dos dados da temperatura ambiente. Os dados da radiação solar e velocidade do vento foram monitorados por piranômetros e anemômetro. As nanopartículas foram dispersas através de agitação ultrassônica. Para a análise do experimento, foram selecionados dados de duas condições de céu distintas: céu claro e céu nublado. Nos dias de céu claro foram observados dois picos e um vale nos perfis de temperatura, tendo a concentração de 50 ppm alcançado o maior valor de temperatura de 47,2 °C, com um aumento na temperatura de 6,2% em relação à da célula contendo apenas água na primeira hora observada. A convecção entre o ar e a superfície do vidro, direcionada pela velocidade do vento, foi o processo que governou a perda térmica, segundo o balanço de energia. Um coeficiente de correlação de Pearson de 0,73 foi obtido entre os valores medidos experimentalmente e os simulados pelo método meta-heurístico da Busca Harmônica para a variação de entalpia do sistema. Além disso, a Busca Harmônica encontrou comportamento semelhante, tanto para a manhã como para a tarde, no perfil da absorvidade relacionada à parcela de radiação direta, em condições de alta radiação incidente, baixa perda térmica e ângulo de inclinação solar na faixa entre 45° e 75°. As demais absorvidades e o albedo do solo mostraram variações comportamentais devido às prováveis mudanças momentâneas na condição de céu e na topografia do local, respectivamente.

Palavras-chave: Nanopartículas. Balanço de energia. Propriedades ópticas. Busca Harmônica.

ABSTRACT

Direct solar absorption based on nanoparticles is a technology that has shown promise for systems that use energy as useful heat. This work investigated the behavior of temperature profiles of four concentrations (12.5 ppm, 25 ppm, 50 ppm, 75 ppm) of titanium dioxide nanoparticles dispersed in deionized water in a direct sunlight absorption system. The energy balance of the system was developed to analyze the heat transfer processes involved. In addition, the computational meta-heuristic method of Harmonic Search was used to find the optical properties of the fluid absorptance and soil albedo. Test system consists of aluminum profiles and contains two glass test cells. The experiments were carried out during the period between October and December of 2018, from 06:00 to 18:00 hours. In each cell were inserted three thermocouples for to measure the temperature. Furthermore, another thermocouple was placed on the outside of the structure for measuring ambient temperature data. Data from solar radiation and wind speed were monitored by pyranometers and anemometer. The nanoparticles were dispersed by ultrasonic stirring. Data were selected from two different sky conditions for analysis: clear sky and cloudy sky. On days of clear sky two peaks and one valley were observed in the temperature profiles, the concentration of 50 ppm reached the highest temperature value of 47.2 °C, with a temperature increase of 6.2% over that of the cell containing only water at the first observed hour. The convection between the air and the surface of the glass, directed by the wind speed, was the process that governed the thermal loss, according to the energy balance. A Pearson correlation coefficient of 0.73 was obtained between the values measured experimentally and those simulated by the Harmonic Search metaheuristic method for the system enthalpy change. In addition, Harmonic Search found similar behavior, both in the morning and in the afternoon, in the absorptance profile related to the direct radiation plot, under conditions of high incident radiation, low thermal loss and angle of solar inclination in the range between 45° and 75°. The other absorptances and soil albedo showed behavioral changes due to the probable momentary changes in the sky condition and the local topography, respectively.

Keywords: Nanoparticles. Energy balance. Optical properties. Search Harmonic.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	– Representação esquemática da radiação solar atravessando a atmosfera.....	20
Figura 2	– MET de nanopartículas de óxido de cobre a esquerda e CNT a direita.....	21
Figura 3	– MET de (a) nanopartículas de cobre, (b) óxido de cobre e (c) alumina.....	22
Figura 4	– Esquema da produção de nanofluidos por evaporação-condensação.....	23
Figura 5	– Vista esquemática de um sistema homogeneizador de nanopartículas.....	24
Figura 6	– Representação da estabilização estérica.....	25
Figura 7	– Esquema da estabilização eletrostática em uma nanopartícula.....	26
Figura 8	– Condutividade térmica de algumas substâncias em relação à da água.....	27
Figura 9	– Condutividade térmica para diferentes fluidos base.....	27
Figura 10	– Transmitância em nanofluidos de óxidos metálicos.....	31
Figura 11	– Transmitância em nanofluidos de metais.....	31
Figura 12	– Coeficiente de Absorção em nanofluidos à base de óxidos metálicos.....	32
Figura 13	– Coeficiente de absorção em nanofluidos à base de metais.....	33
Figura 14	– Vista 3D de um coletor solar triangular preenchido com nanofluido.....	34
Figura 15	– Coletor solar cônico.....	35
Figura 16	– Eficiência do coletor em função da taxa de escoamento.....	35
Figura 17	– Eficiência do coletor em função da radiação incidente.....	35
Figura 18	– Mudança da geração de entropia com a fração volumétrica.....	36
Figura 19	– Aparato experimental do sistema de absorção de luz solar direta.....	37
Figura 20	– Perfis das temperaturas do experimento de 06 de setembro de 2013.....	37
Figura 21	– Experiência de iluminação sob condições naturais de luz solar.....	38
Figura 22	– Vista esquemática da configuração experimental sob um simulador solar.....	39
Figura 23	– Parede Solar.....	40
Figura 24	– Datalogger.....	41

Figura 25 – Piranômetros.....	42
Figura 26 – Anemômetro.....	42
Figura 27 – Termopares dentro da célula de testes.....	43
Figura 28 – Termopar sob escudo de radiação solar.....	43
Figura 29 – Calibração dos termopares.....	44
Figura 30 – Processador ultrassônico.....	44
Figura 31 – Secção transversal esquematizada do volume de controle.....	47
Figura 32 – Circuito térmico da parede solar.....	51
Figura 33 – Circuitos das resistências térmicas da parede solar.....	51
Figura 34 – Fluxograma do algoritmo da Busca Harmônica.....	55

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 – Temperatura e radiação – 12,5 ppm-água deionizada – 12-12-2018.....	59
Gráfico 2 – Temperatura e radiação – 25 ppm-água deionizada – 20-11-2018.....	59
Gráfico 3 – Temperatura e radiação – 50 ppm-água deionizada – 26-10-2018.....	60
Gráfico 4 – Temperatura e radiação – 75 ppm-água deionizada – 04-11-2018.....	61
Gráfico 5 – Rendimento do nanofluido em relação à água deionizada – céu claro.....	63
Gráfico 6 – Variação transiente das temperaturas – céu claro – 26-10-2018.....	63
Gráfico 7 – Temperatura e radiação – 12,5 ppm-água deionizada – 04-12-2018.....	64
Gráfico 8 – Temperatura e radiação – 25 ppm-água deionizada – 12-11-2018.....	65
Gráfico 9 – Temperatura e radiação – 50 ppm-água deionizada – 21-10-2018.....	65
Gráfico 10 – Temperatura e radiação – 75 ppm-água deionizada – 31-10-2018.....	66
Gráfico 11 – Variação transiente das temperaturas – céu nublado – 21-10-2018.....	67
Gráfico 12 – Perda térmica para água em céu claro e céu nublado.....	68
Gráfico 13 – Resistências Térmicas na célula inferior.....	69
Gráfico 14 – Resistência Térmica R_3 para céu claro e nublado.....	69
Gráfico 15 – Coeficientes de transferência de calor de R_1	70
Gráfico 16 – Coeficientes de transferência de calor por radiação em R_1	70
Gráfico 17 – Perfis de Q_{real} e $Q_{simulado}$ da água no dia 26-10-2018.....	71
Gráfico 18 – α_{direta} em função de θ para água em 26-10-2018.....	73

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Investigações de autores na condutividade térmica dos nanofluidos.....	27
Tabela 2 – Propriedades térmicas.....	45
Tabela 3 – Equações para o cálculo do ângulo de incidência solar.....	46
Tabela 4 – R de Pearson entre Q_{real} e Q_{simulado} da água em 26-10-2018.....	72
Tabela 5 – Valores simulados das absortividades e albedo do solo.....	74

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A	Área
B	Parâmetro da equação do tempo
bw	Bandwidth (Largura de banda)
CNT	Carbon nanotubes (Nanotubos de carbono)
c_p	Calor específico
d	Dia do ano
D	Diâmetro
DASC	Direct Absorption Solar Collector (Coletor solar de absorção direta)
E	Equação do tempo em minutos
EG	Etilenoglicol
G	Ganho de energia por radiação
Gr	Número de Grashof
H	Hora
HM	Harmony Memory (Memória Harmônica)
HMCR	Harmony Memory Considering Rate (Taxa de Consideração de Memória Harmônica)
I	Radiação
k	Condutividade térmica
kPa	Quilopascal
l	Longitude
L	Espessura da parede de fluido
LESGN	Laboratório de Energia Solar e Gás Natural
m	Massa
MET	Microscópio eletrônico de transmissão
MEV	Microscópio eletrônico de varredura
ml	Mililitros
mm	Milímetros
n	Fator de forma
nm	Nanometro
°C	Graus Celsius
PAR	Pitching Adjust Rate (Taxa de Consideração de Som)

ppm	Partículas por milhão
P_r	Número de Prandt
PTE	Photothermal Efficiency (Eficiência fototérmico)
Q	Quantidade de energia
R	Coefficiente de correlação de Pearson
r	Refletividade da radiação não polarizada
R_a	Número de Rayleigh
SAR	Specific Absorption Rate (Taxa de absorção específica)
SWCNTs	Single Wall Carbon Nanotubes (Nanotubos de carbono de parede única)
T	Temperatura
t	Tempo
U	Coefficiente global de perdas térmicas
V	Velocidade
VEROS	Evaporação de vácuo para uma técnica de substratos de óleo corrente
w	Espessura da placa/cobertura de vidro

LISTA DE SÍMBOLOS GREGOS

α	Absortividade
γ	Ângulo de azimute da superfície
δ	Ângulo de declinação solar
Δ	Variação
ε	Emissividade
ζ	Difusividade térmica
θ	Ângulo de incidência solar
λ	Comprimento de onda
ν	Viscosidade cinemática
ρ	Refletância
τ	Transmitância
φ	Latitude
Φ	Fração volumétrica
Ψ	Esfericidade
ω	Ângulo da hora solar

SUBSCRITOS

água	Água deionizada
ar	Ar ambiente
difusa	Referente à radiação difusa
direta	Referente à radiação direta
f	Fluido (água ou nanofluido)
fb	Fluido base
Loc	Local
m	Média
nf	Nanofluido
np	Nanopartículas
Pad	Padrão
refletida	Referente à radiação refletida
solo	Referente ao solo do local onde está fixada a parede solar
vidro	Coberturas (placas) de vidro

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	17
2	OBJETIVOS	19
2.1	Geral	19
2.2	Específicos	19
3	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	20
3.1	Fundamentos da radiação solar	20
3.2	Nanofluidos: conceitos iniciais	21
3.3	Métodos de preparação dos nanofluidos	22
3.4	Estabilização	24
3.5	Propriedades térmicas e ópticas dos nanofluidos	26
3.5.1	<i>Condutividade térmica</i>	26
3.5.2	<i>Calor específico</i>	29
3.5.3	<i>Transmitância</i>	30
3.5.4	<i>Absorção</i>	32
3.6	Aplicações solares térmicas dos nanofluidos	33
4	MATERIAIS E MÉTODOS	40
4.1	Preparação e configuração da estrutura experimental	40
4.2	Medição, armazenamento e coleta de dados	41
4.3	Preparação do nanofluido	44
4.4	Cálculo do ângulo de incidência solar	45
4.5	Balanco de energia do sistema	46
4.6	Método meta-heurístico da Busca Harmônica	54
4.7	Coefficiente de correlação de Pearson	56
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	58
5.1	Testes em dias de céu claro	58
5.2	Testes em dias de céu nublado	64
5.3	Perda térmica	67
5.4	Propriedades ópticas obtidas a partir da Busca Harmônica	71
6	CONCLUSÃO	75
	REFERÊNCIAS	77

1 INTRODUÇÃO

A energia é um fator indispensável para o desenvolvimento dos países. Os sistemas solares desempenham um papel significativo na produção de energia a partir de fontes renováveis, convertendo a radiação solar em calor útil ou eletricidade. Segundo Borzogan e Shafahi (2015), levando-se em conta a proteção ambiental e a incerteza sobre a disponibilidade dos combustíveis fósseis no futuro, a energia solar é uma forma de energia alternativa melhor em relação às outras fontes renováveis, devido à sua alta disponibilidade. Com isso, vários dispositivos que utilizam a energia solar vêm sendo desenvolvidos e estudados.

Conforme Bandarra Filho *et al.* (2014), os sistemas solares térmicos como, por exemplo, coletores solares, são amplamente utilizados para aproveitar a energia solar em aplicações que utilizam o calor útil do processo.

Os coletores solares são amplamente classificados como coletores de rastreamento e não rastreamento. Os coletores não rastreadores são mantidos fixos e instalados em ângulos de inclinação e orientação particulares, cujas magnitudes dependem da localização geográfica, para maximizar o aproveitamento da radiação solar. Os coletores de rastreamento são projetados para rastrear o movimento do sol de modo que as radiações solares incidentes sempre caiam perpendicularmente a eles. Os coletores solares de rastreamento são classificados como coletores de rastreamento de um eixo e dois eixos. Os coletores não rastreadores são categorizados como coletores planos, evacuados e parabólicos compostos. Coletor parabólico, coletor cilíndrico e refletor linear de Fresnel se enquadram na categoria de sistemas de rastreamento de eixo único, onde o receptor de torre central, refletor de prato parabólico e lente circular de Fresnel pertencem a sistemas de rastreamento de eixos duplos (SUMAN *et al.*, 2015).

O aprimoramento da transferência de calor em dispositivos solares é um dos problemas significativos na economia de energia e em projetos compactos. Um dos métodos que tem se mostrado eficaz é a substituição do fluido de trabalho por nanofluidos como uma estratégia para melhorar as características de transferência de calor do fluido.

De acordo com Elsheikh *et al.* (2017), nos últimos anos os pesquisadores têm se interessado pelo uso de nanofluidos em coletores, aquecedores de água, sistemas de refrigeração solar, células solares, sistemas solares de refrigeração e uma combinação de diferentes dispositivos devido à maior condutividade térmica dos nanofluidos e às propriedades de absorção de radiação das nanopartículas. A inserção de nanopartículas que podem absorver energia solar diretamente dentro do volume do fluido é um desenvolvimento recente, ou seja, o

coletor solar de absorção direta (DASC). Neste, a energia solar é absorvida diretamente no volume de fluido pela radiação para as nanopartículas e para o fluido base.

Ainda segundo Elsheikh *et al.* (2017), os sistemas de energia solar que utilizam nanofluidos oferecem outros benefícios em relação às partículas de tamanho convencional, como o aumento da razão superfície-volume, resultando em um aumento significativo na capacidade de armazenar calor do nanofluido, bem como na absorção da energia solar. As características ópticas dos nanofluidos são melhores que as do fluido base, pois apresentam alta absorção e baixa emissão tanto na faixa do espectro solar quanto na faixa do espectro infravermelho, respectivamente. Além disso, os nanofluidos possuem boa estabilidade sob uma ampla faixa de gradientes de temperatura, alta densidade e alto coeficiente de transferência de calor convectivo, com baixo calor específico das nanopartículas que resultam no aumento da eficiência dos dispositivos térmicos.

Seguindo o viés de análise da capacidade de absorção de energia dos nanofluidos, este trabalho investigou, sob condições realísticas que incluíram 12 horas diárias de observação experimental, os efeitos da absorção direta de luz solar no nanofluido dióxido de titânio-água deionizada. Para analisar os processos de transferência de calor o balanço de energia do sistema foi desenvolvido. Os perfis de temperatura para diferentes concentrações de nanopartículas e a variação de energia térmica pela influência dos processos de transferência de calor também foram discutidos. Além disso, as propriedades ópticas de absorvidade do nanofluido e albedo do solo, envolvidas nas perdas de energia térmica, foram investigadas utilizando uma programação computacional meta-heurística. Os testes foram realizados no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural da Universidade Federal do Ceará.

2 OBJETIVOS

2.1 Geral

O objetivo deste trabalho consistiu em comparar o desempenho de água deionizada e nanopartículas de dióxido de titânio dispersas em água deionizada em um sistema solar de absorção direta, bem como analisar os processos de transferência de calor que governaram a variação da temperatura no sistema.

2.2 Específicos

Especificamente, os objetivos foram:

1. Construir a estrutura física do sistema de absorção direta para a realização dos testes no LESGN;
2. Dispersar as nanopartículas nas seguintes concentrações volumétricas no fluido base: 12,5 ppm (0,00125%), 25 ppm (0,0025%), 50 ppm (0,005%) e 75 ppm (0,0075%) por meio de um agitador ultrassônico;
3. Coletar semanalmente os dados experimentais de temperatura e radiação no período compreendido entre outubro e dezembro de 2018;
4. Realizar o balanço de energia do sistema;
5. Obter as propriedades ópticas de absortividade do fluido e albedo do solo, através da implementação do método meta-heurístico da Busca Harmônica;
6. Elaborar gráficos com os dados coletados dos experimentos;
7. Avaliar os resultados obtidos.

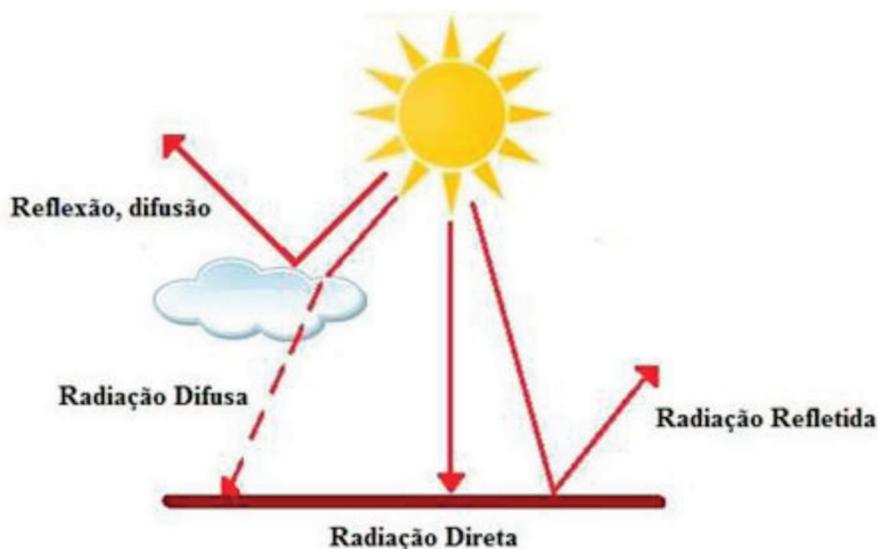
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Este capítulo apresenta uma abordagem dos temas necessários à compreensão do funcionamento e operação do sistema solar fototérmico de absorção direta. O capítulo está dividido em seis tópicos. Inicialmente estão apresentados alguns conceitos fundamentais acerca da radiação solar e em seguida sobre nanofluidos. Posteriormente estão explicitados os métodos de preparação dos nanofluidos, estabilização, propriedades e, por último, alguns estudos recentes de aplicações de nanofluidos em sistemas solares térmicos.

3.1 Fundamentos da radiação solar

A radiação solar pode ser definida como a energia emitida pelo sol sob a forma de ondas eletromagnéticas. É uma variável imprescindível para estudos que estão diretamente ligados ao clima e a projetos nos quais o objetivo é o aproveitamento da energia solar. A radiação ao atravessar a atmosfera terrestre sofre diversos fenômenos como a dispersão e a reflexão e seu valor, de acordo com Duffie e Beckman (2013), é de aproximadamente 1367 W/m^2 para medições realizadas fora da atmosfera e em uma superfície que esteja perpendicular ao raio incidente. Ao atravessar a atmosfera a radiação solar divide-se em algumas componentes, como poder ser observado na Figura 1, por isso é importante apresentar algumas definições sobre elas.

Figura 1 – Representação esquemática da radiação solar atravessando a atmosfera



Fonte: Pinho (2017)

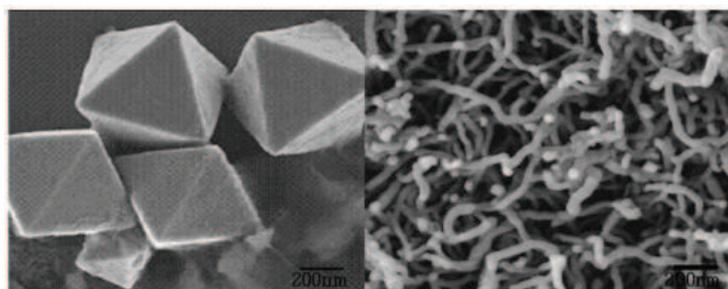
A radiação solar direta é aquela que é recebida do sol sem ter sido dispersada pela atmosfera, ela é a parte mais importante na geração de energia solar térmica. A radiação difusa é parcela de radiação recebida do sol após a sua direção ser alterada pela dispersão e atenuação dos componentes da atmosfera, como as nuvens, poeira, vapor d'água. A radiação refletida é aquela que resulta da reflexão da radiação solar em uma determinada superfície, dependendo, portanto, das propriedades ópticas dessa superfície, também denominada albedo. A soma das parcelas de radiação solar direta e da radiação solar difusa é chamada de radiação solar total. Muitas vezes ela também é referida como radiação global.

3.2 Nanofluidos: conceitos iniciais

Os nanofluidos são uma nova classe de fluidos térmicos, compostos por materiais sólidos e líquidos, criados através da suspensão desses materiais em escala nanométrica, ou seja, com um diâmetro que compreende a faixa entre 1 e 100 nm (nanopartículas, nanofibras, nanotubos, nanofios, etc.) em fluidos de base convencionais. Em outras palavras, os nanofluidos são suspensões coloidais de nanoescala contendo nanomateriais condensados. (YU e XIE, 2012).

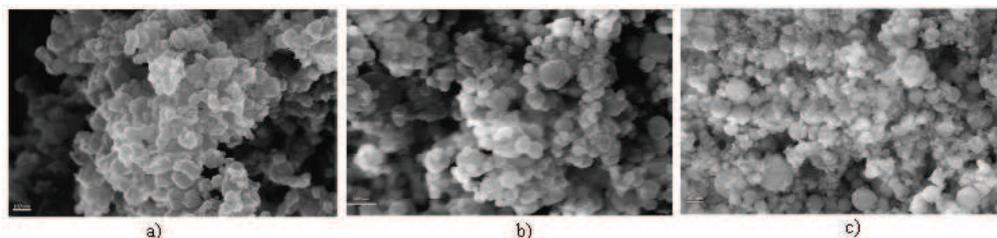
Conforme Silva (2010), essas nanopartículas têm sido obtidas a partir de diversos materiais, tais como óxidos cerâmicos (Al_2O_3 , CuO) nitretos cerâmicos (AlN , SiN), carbonetos cerâmicos (TiC , SiC), metais (Cu , Ag , Au), semicondutores (TiO_2 , SiC), nanotubos de carbono (CNT) e materiais compósitos como liga de nanopartículas de $\text{Al}_{70}\text{C}_{30}$ ou nanopartículas compósitas com matriz polimérica. Os líquidos que vêm sendo mais utilizados como base são: a água, o etilenoglicol e o óleo térmico. As Figuras 2 e 3 ilustram imagens de diferentes nanopartículas obtidas por microscopia eletrônica de transmissão.

Figura 2 - MET de nanopartículas de óxido de cobre a esquerda e CNT a direita.



Fonte: Fan e Wang (2011).

Figura 3 - Imagens por MET de (a) nanopartículas de cobre, (b) óxido de cobre e (c) alumina.



Fonte: Adaptado de Kim *et al.* (2007).

As nanopartículas são geralmente classificadas com base na sua morfologia, dimensionalidade, composição, uniformidade e aglomeração. Com base na morfologia, as nanopartículas podem ser estruturais planas, esféricas e cristalinas (FARIQ *et al.*, 2017).

Em relação à dimensionalidade, as nanopartículas podem ser classificadas como unidimensionais, bidimensionais e tridimensionais. As nanopartículas unidimensionais incluem filmes finos utilizados em dispositivos eletrônicos e sensoriais. As nanopartículas bidimensionais incluem nanotubos de carbono que possuem alta capacidade de adsorção e estabilidade. As nanopartículas tridimensionais contêm dendrímeros, pontos quânticos, etc. (PAL *et al.*, 2011).

3.3 Métodos de preparação dos nanofluidos

A preparação de nanofluidos é o primeiro passo chave em estudos experimentais com estes. O nanofluido não é simplesmente uma mistura líquida/sólida e, por isso, necessita na sua preparação de requisitos especiais, como uma suspensão uniforme, suspensão estável, baixa aglomeração de partículas e nenhuma alteração química do fluido. A alteração do pH da suspensão, o uso de ativadores de superfície ou dispersantes, bem como o uso de vibração ultrassônica, são algumas sugestões para se estabilizar as suspensões (XUAN e LI, 2000).

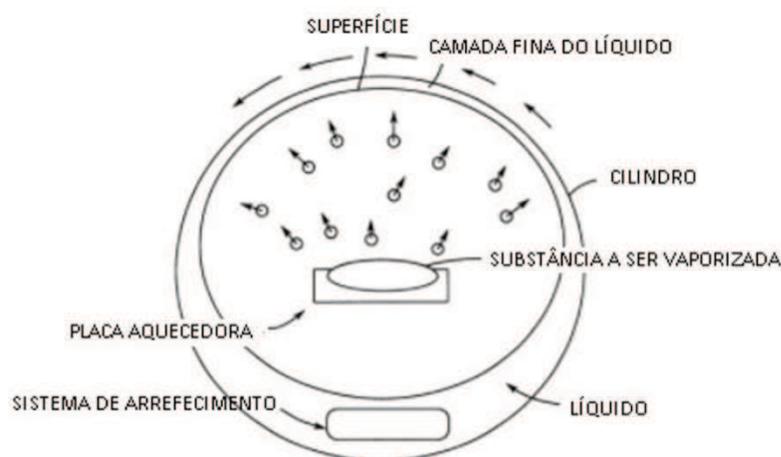
Existem principalmente duas técnicas usadas para produzir nanofluidos: o método de um passo e de dois passos. A técnica de um passo combina a produção de nanopartículas e a dispersão de nanopartículas no fluido base em um único passo. Neste método, os processos de secagem, armazenamento, transporte e dispersão de nanopartículas são evitados, de modo que a aglomeração de nanopartículas é minimizada e a estabilidade dos fluidos aumenta (LI *et al.*, 2009).

Em um dos métodos comuns, chamado método de evaporação direta de um passo, o nanofluido é produzido pela solidificação das nanopartículas, que estão inicialmente em fase gasosa, dentro do fluido base. A abordagem de evaporação direta de um único passo foi

desenvolvida por Akoh *et al.* (1978) e é chamada de evaporação de vácuo para uma técnica de substratos de óleo corrente (do inglês VEROS).

Choi e Eastman (2001) produziram um nanofluido com partículas de cobre nanocristalinas dispersas, utilizando um método de preparação com base na técnica VEROS. Com o sistema mostrado esquematicamente na Figura 4, o cobre nanocristalino foi evaporado de forma resistiva em dois tipos de óleo da bomba. As partículas nanocristalinas são produzidas por evaporação direta em um líquido de baixa pressão de vapor. Um cilindro é submetido a um vácuo. O cilindro contém uma placa aquecedora que aquece a substância a ser vaporizada. O cilindro contendo o líquido a ser tratado é rotacionado para transportar uma fina camada do líquido na superfície. O líquido é arrefecido por um sistema de refrigeração para evitar que este aumente a pressão de vapor dentro do cilindro.

Figura 4 - Esquema da produção de nanofluidos por evaporação-condensação.



Fonte: Adaptado de Choi e Eastman (2001).

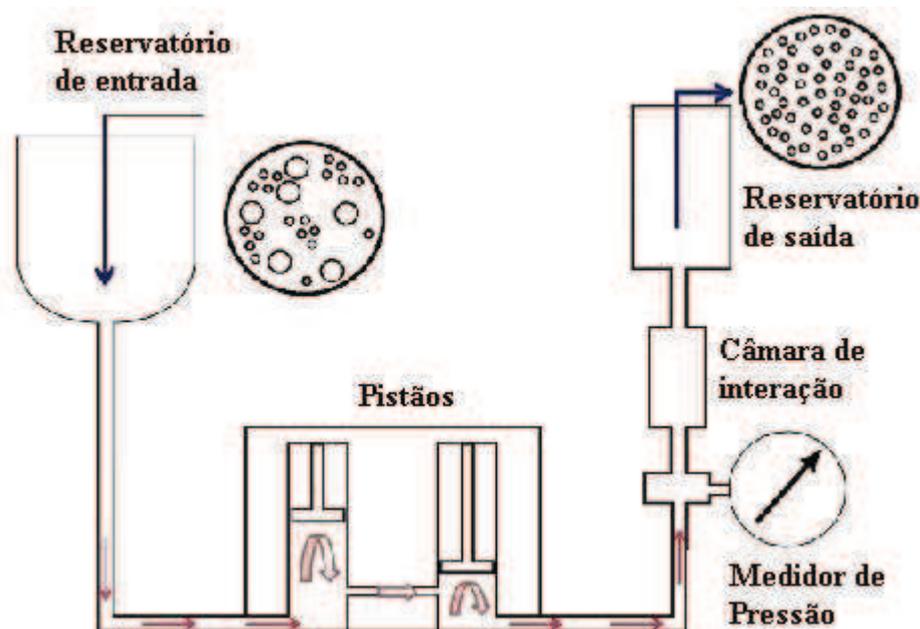
O método físico de um passo tem como limitação não poder sintetizar nanofluidos em grande escala, e o seu custo também é alto. Como consequência disto, o método químico de um passo tem se desenvolvendo rapidamente.

Zhu *et al.* (2004) apresentaram um método de síntese química de um passo para preparar nanofluidos de nanopartículas de cobre dispersas em etilenoglicol. O experimento consistiu na mistura de 25 ml de solução de etilenoglicol de sulfato de cobre penta-hidratado com 5 ml de solução de etilenoglicol de polivinilpirrolidona num copo de 100 ml, seguido de agitação magnética durante 30 min. Em seguida, adicionou-se 25 ml de solução de etileno glicol de hipofosfito de sódio e agitou-se durante mais 15 minutos. A mistura foi colocada em um forno de microondas para reagir por 5 minutos sob potência média. A cor da mistura passou de

azul a vermelho escuro após a reação. Depois de arrefecer até a temperatura ambiente, obteve-se o nanofluido de cobre.

O método de dois passos é o método mais utilizado para a preparação de nanofluidos. Nanopartículas, nanofibras, nanotubos ou outros nanomateriais utilizados neste método são primeiramente produzidos como pós secos por métodos químicos ou físicos. Em seguida, o pó nanométrico é disperso em um fluido no segundo passo de processamento com a ajuda de agitação de força magnética intensiva, agitação ultrassônica, mistura de alto cisalhamento, homogeneização (Figura 5) e moagem de bolas. O método de duas etapas é o mais econômico para produzir nanofluidos em larga escala, porque as técnicas de síntese de nanopulsão já foram ampliadas para níveis de produção industrial (YU e XIE, 2012).

Figura 5 - Vista esquemática de um sistema homogeneizador.



Fonte: Adaptado de Bandarra Filho *et al.* (2014)

3.4 Estabilização

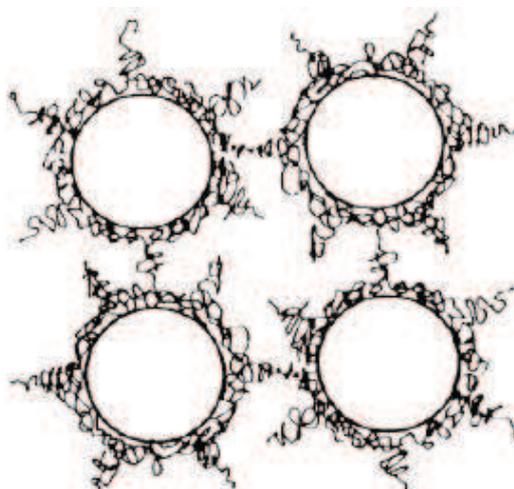
De acordo com Saidur *et al.* (2015) a estabilidade da dispersão é considerada como uma das questões mais desafiadoras que limitam o uso prático e o desenvolvimento de nanofluidos, especialmente para nanofluidos térmicos, pois de acordo com Yu *et al.* (2017) estes são submetidos a altas temperaturas ou repetidos ciclos de aquecimento/resfriamento, o que aumenta bastante a probabilidade de colisão e tendência de agregação das nanopartículas.

Além disso, segundo Yu e Xie (2012) a investigação sobre estabilidade também é uma questão chave que influencia as propriedades dos nanofluidos para aplicações, como a diminuição da condutividade térmica devido à aglomeração das nanopartículas, sendo por isso necessário estudar e analisar fatores influenciadores para a estabilidade da dispersão dos nanofluidos.

De acordo com Silva (2010), as nanopartículas possuem uma elevada energia na superfície e, como consequência, elas tendem a aglomerar-se com facilidade, dificultando a dispersão. A fim de contrariar esta tendência natural das nanopartículas e mantê-las afastadas entre si, faz-se necessário que as forças repulsivas sejam suficientemente grandes de modo que o efeito de aproximação entre as partículas seja superado. Essa interação repulsiva é produzida principalmente por dois mecanismos: a repulsão eletrostática e a estabilização estérica.

Na estabilização estérica são adicionados polímeros à suspensão que ao se adsorverem à superfície da partícula evitam que estas se aproximem. Essa adsorção cria uma barreira com espessura suficiente para manter as partículas separadas através de bloqueios estéricos entre as camadas poliméricas, como esquematizado na Figura 6.

Figura 6 - Representação da estabilização estérica.

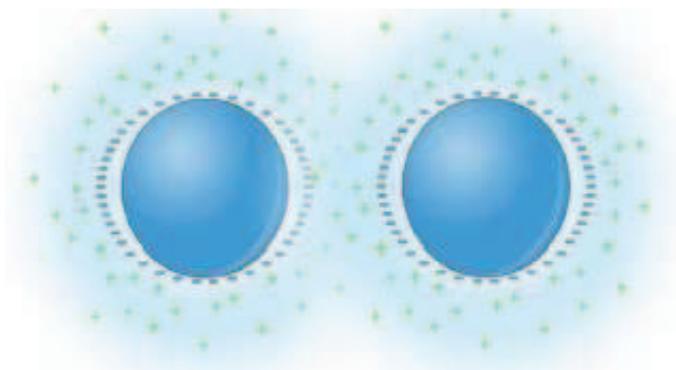


Fonte: Silva (2010)

Segundo Silva (2010), na estabilização eletrostática a presença de carga em partículas suspensas resulta num aumento de contra-íons à superfície, levando com que em torno de cada partícula se forme uma dupla camada elétrica. O íon, de carga positiva ou negativa, e o contra-íon, formam a parte fixa da dupla camada elétrica, onde os íons se encontram fortemente ligados à superfície. Mais distante da superfície encontra-se a parte

difusa da dupla camada que consiste em íons de polaridades diferentes, os quais se estendem sobre a fase líquida. Quando a partícula se move, existe uma fronteira imaginária dentro da camada difusa onde os íons acompanham o movimento da partícula formando um sistema estável, como mostra a Figura 7.

Figura 7 - Esquema da estabilização eletrostática em uma nanopartícula.



Fonte: Yu *et al.* (2017).

3.5 Propriedades dos nanofluidos

A incorporação de nanopartículas no fluido base conduz a alterações nas propriedades termofísicas e ópticas, como a condutividade térmica, viscosidade, calor específico, transmitância e a absorção que, por sua vez, afetam a transferência de calor. Essas propriedades dos nanofluidos são discutidas a seguir.

3.5.1 Condutividade térmica

A incorporação de nanopartículas no fluido base conduz a alterações nas propriedades termofísicas que, por sua vez, afetam a transferência de calor convectiva. Diversos estudos mostram que a condutividade térmica dos nanofluidos é maior do que os fluidos de base. A literatura recente listada pela Tabela 1 mostra a investigação, por diferentes autores, de parâmetros que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos, como a fração volumétrica, tamanho da partícula (T. P.) e tipo de fluido base. Nesta seção esses parâmetros serão discutidos.

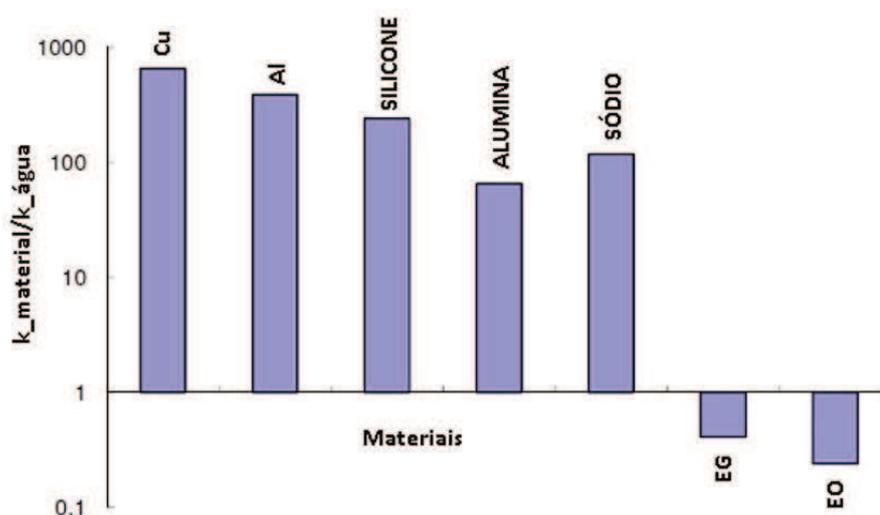
Tabela 1 – Investigações de autores na condutividade térmica dos nanofluidos

Autor	Nanofluido	Φ (% volume)	T.P. (nm)	Melhoria (%)	Parâmetro investigado
Lee <i>et al.</i> 2011	SiC – Água deionizada	0.001- 0.1 - 1.0 - 2.0 - 3.0	100	7.2 (máxima)	Concentração de partícula
Khedkar <i>et al.</i> 2012	CuO – Água	7.5	25	32.3	Tipo de fluido base
	CuO – MEG	7.5	25	21.3	
Angayarkanni e Philip 2014	TiO ₂ – Água	4	13.5	14.92	Composição da partícula
	SiO ₂ – Água	6	15	18	
Buonomo <i>et al.</i> 2015	Al ₂ O ₃ – Água	0.5 - 1.0 - 2.0- 3.0 e 4.0	40	14.4 (máxima)	Concentração de partícula e Temperatura
Khedkar <i>et al.</i> 2016	TiO ₂ – EG	1.0 a 7.0	5	19.52 (máxima)	Concentração de partícula e Temperatura

Fonte: Elaborada pelo autor.

Como é possível observar na Tabela 1, diferentes parâmetros podem afetar a condutividade térmica dos nanofluidos. É sabido que um desses parâmetros é a composição das nanopartículas, pois suspensões de partículas metálicas possuem uma condutividade térmica superior à de suspensões de partículas de óxidos, como pode ser observado na Figura 8.

Figura 8 – Condutividade térmica de algumas substâncias em relação à da água.



Fonte: Adaptado de Campos (2009).

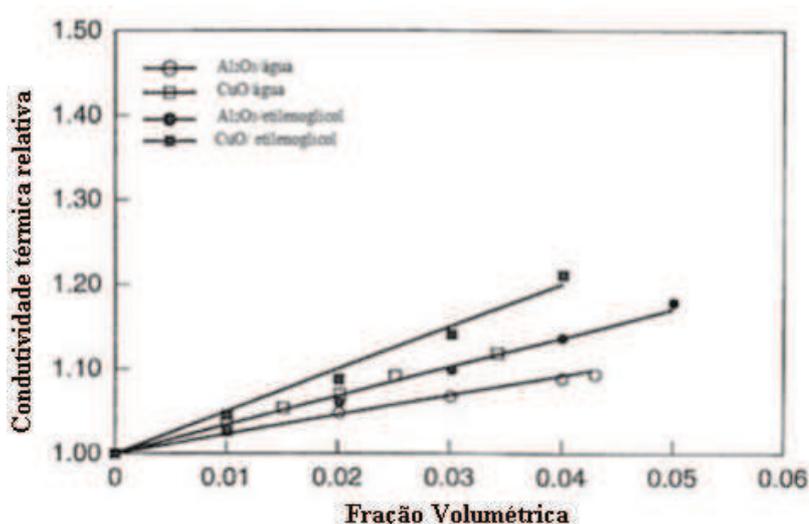
No entanto, de acordo com Silva (2010), apesar da baixa condutividade térmica das partículas de óxidos, o que faz com que seja necessário utilizar uma maior fração volumétrica

destas para alcançar um acréscimo na condutividade térmica equivalente à de suspensões com partículas metálicas, estas têm sido as mais utilizadas tanto pela maior facilidade de fabricação e estabilização, como pelo fato das partículas metálicas puras mostrarem uma tendência a oxidar-se com facilidade.

Outro parâmetro que pode ser destacado como influenciador da condutividade térmica é o tipo de fluido base utilizado na formulação do nanofluido. Segundo Silva (2010), embora não se tenha verificado em todos os trabalhos experimentais, a tendência tem sido que para uma mesma partícula suspensa, quanto menor a condutividade térmica do fluido base, maior a condutividade térmica do nanofluido.

Estudos como os de Lee *et al.* (2011) e Xie *et al.* (2002) corroboram com o que foi dito acima, pois como pode ser visto na Figura 9, apesar da maior condutividade térmica da água em relação ao etilenoglicol, o aumento da condutividade térmica relativamente ao fluido base para os nanofluidos Al_2O_3 -água e CuO -água é inferior aos nanofluidos com etilenoglicol.

Figura 9 – Condutividade térmica para diferentes fluidos base.



Fonte: Adaptado de Lee *et al.* (2011)

O efeito da temperatura do nanofluido na melhoria de sua condutividade térmica tem sido estudado por muitos pesquisadores. Patel *et al.* (2003) observaram que os incrementos na condutividade térmica foram diretamente proporcionais à temperatura em dois tipos de nanopartículas de ouro utilizando água e tolueno como fluidos de base. As partículas solúveis em água, de 10 a 20 nm de diâmetro médio, apresentaram aumento de condutividade térmica de 5% a 21% na faixa de temperatura de 30 a 60 ° C. Esse resultado está de acordo com as observações relatadas posteriormente por Khedkar *et al.* (2016), Aberoumand *et al.* (2016) e

Agarwal *et al.* (2016) para diferentes nanofluidos no que concerne à relação: aumento de condutividade térmica com aumento de temperatura.

Como visto, muitos estudos sobre nanofluidos, portanto, concentraram-se na condutividade térmica, que é o parâmetro mais complexo para o processo de transferência de calor (SUI *et al.*, 2017). De acordo com Ozerinç *et al.* (2010), Maxwell derivou uma equação que tem sido frequentemente utilizada no cálculo da condutividade térmica, que é definida como mostra a Equação 1:

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

Onde k_{nf} , k_{np} e k_{fb} são a condutividade térmica do nanofluido, das nanopartículas e do fluido base, respectivamente. A fração volumétrica das partículas na mistura é expressa por Φ . Conforme visto pela expressão, o efeito do tamanho e forma das partículas não foi incluído na análise.

Hamilton e Crosser (1962) estenderam o modelo de Maxwell para levar em conta o efeito da forma das partículas sólidas, além das condutividades térmicas de fases sólidas e líquidas e fração volumétrica de partículas. O modelo baseia-se na Equação 2 e é o seguinte:

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

No qual n é o fator de forma empírico e é definido pela Equação 3:

$$n = \frac{\Psi}{3} \quad (3)$$

Onde Ψ é a esfericidade. A esfericidade é a proporção da área superficial de uma esfera com um volume igual à da partícula para a área superficial da partícula. Ambas (Equação 2 e Equação 3) são usadas frequentemente para relacionar valores experimentais e teóricos.

3.5.2 Calor específico

O calor específico é uma das principais propriedades para analisar o processo de

transferência de calor. Em geral, as nanopartículas exibem menor calor específico do que os fluidos e, portanto, diminuem a quantidade de calor necessária para que um nanofluido atinja uma determinada temperatura. Isso produz um efeito positivo, pois proporciona aos nanofluidos a capacidade de armazenar calor com mais facilidade (SUI *et al.*, 2017).

Palm *et al.* (2006) apresentaram o seguinte modelo (Equação 4) para avaliar o calor específico do nanofluido.

$$(c_p)_{nf} = (1-\phi).(c_p)_{fb} + \phi(c_p)_{np} \quad (4)$$

Onde $(c_p)_{nf}$ é o calor específico do nanofluido. Zhou e Ni (2008) apresentaram uma investigação experimental sobre o calor específico do nanofluido Al_2O_3 à base de água com um calorímetro de varredura diferencial. O resultado indica que o calor específico do nanofluido diminui gradualmente à medida que a concentração do volume Φ de nanopartículas aumenta de 0,0% para 21,7%. A relação entre eles exibe um bom acordo com a predição do modelo de equilíbrio térmico (Equação 4).

Saeedinia *et al.* (2012) investigaram experimentalmente as capacidades de calor específico de nanofluidos de óleo de base de CuO com frações de peso de partícula de 0,2 a 2% em diferentes temperaturas. Neste experimento, os nanofluidos apresentaram uma capacidade térmica menos específica que a do fluido base e diminuíram com o aumento da concentração de nanofluidos. O resultado indicou que o calor específico dos nanofluidos com uma fração de 2% em peso era cerca de 23% inferior ao do fluido de base a 40 ° C.

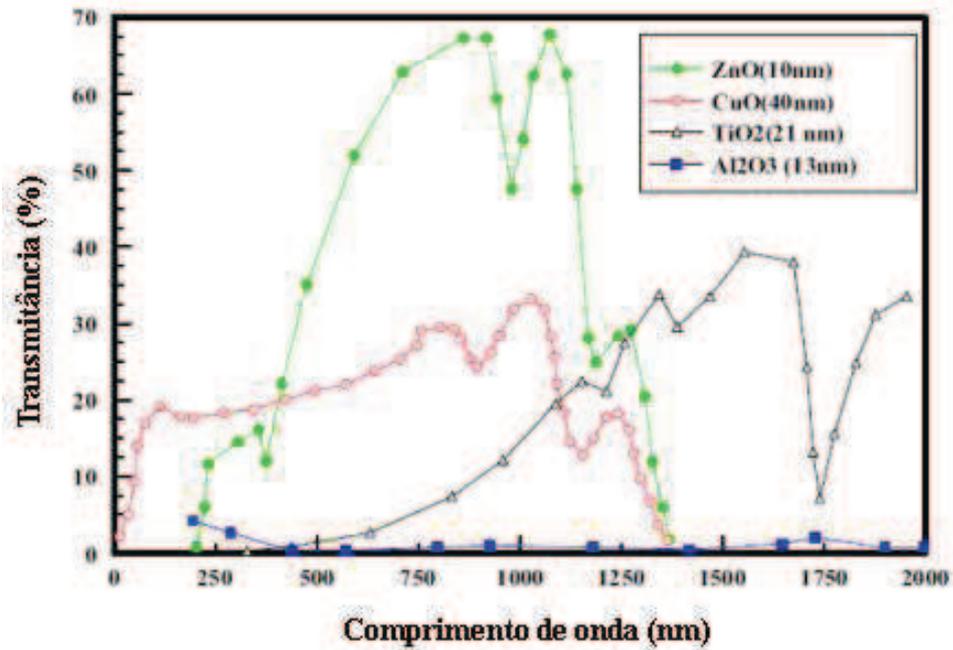
Barbes *et al.* (2014) realizaram experimentos em nanofluidos de nanopartículas de óxido de cobre à base de água e etileno-glicol e compararam-nos com a Equação 4. As medidas experimentais e as previsões do modelo estão em bom acordo.

3.5.3 Transmissão

A transmissão é a propriedade que a matéria possui de permitir que uma fração de luz incidente sobre ela, num determinado comprimento de onda, a atravesse. Segundo Ahmad *et al.* (2017) a transmissão em nanofluidos fabricados tanto a partir de metais, como de óxidos metálicos, geralmente diminui com o aumento da concentração das nanopartículas. Saidur *et al.* (2012) relataram um decréscimo de 60% na transmissão na região do espectro visível a partir de adição de nanopartículas de alumínio.

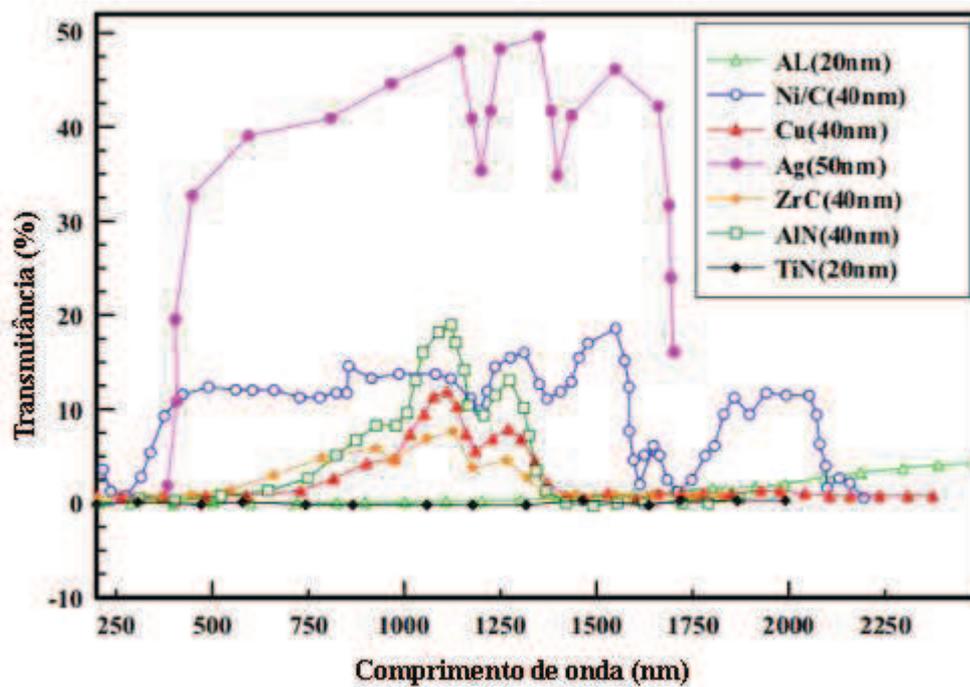
A percentagem de transmitância de diferentes nanofluidos com base em diferentes tipos de óxidos metálicos em metais é mostrada nas Figuras 10 e 11, respectivamente.

Figura 10 – Transmitância em nanofluidos de óxidos metálicos



Fonte: Adaptado de Ahmad *et al* (2017)

Figura 11 – Transmitância em nanofluidos de metais



Fonte: Adaptado de Ahmad *et al* (2017)

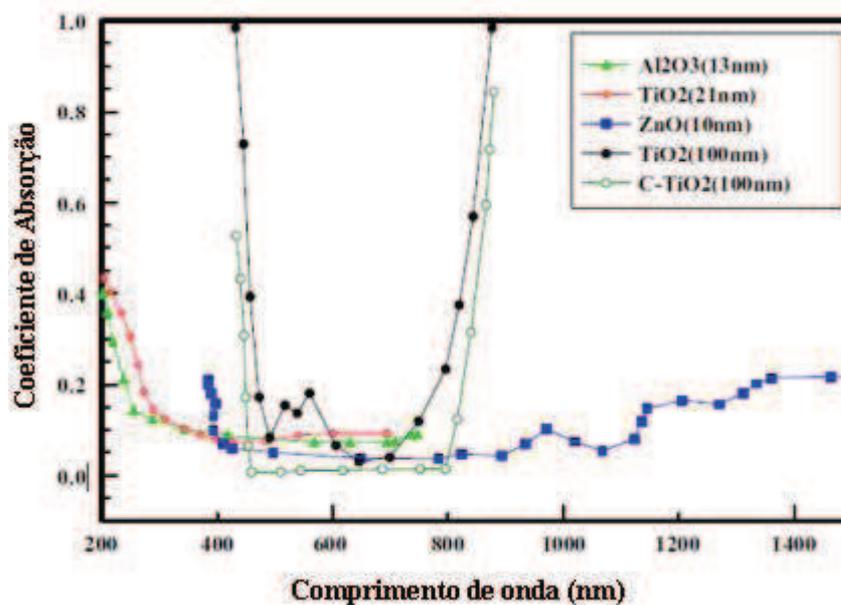
3.5.4 Absorção

A absorção é um parâmetro chave para estimar a capacidade dos fluidos em capturar energia. O coeficiente de absorção pode ser definido como a extensão no espectro de comprimento de ondas na qual um material absorve energia.

Vários pesquisadores investigaram a absorção de nanofluidos à base de metais levando em consideração o tipo de fluido base, tamanho de partícula e fração volumétrica. São os casos de Rativa e Gómez-Malagón (2015) que estudaram a propriedade óptica de absorção em nanofluidos de ouro e prata, e de Saidur *et al.* (2012) em nanofluido de alumínio para diferentes concentrações volumétricas e tamanhos de nanopartículas. De acordo com Ahmad *et al.* (2017) o coeficiente de absorção de nanofluidos com nanopartículas metálicas é linearmente proporcional à fração volumétrica.

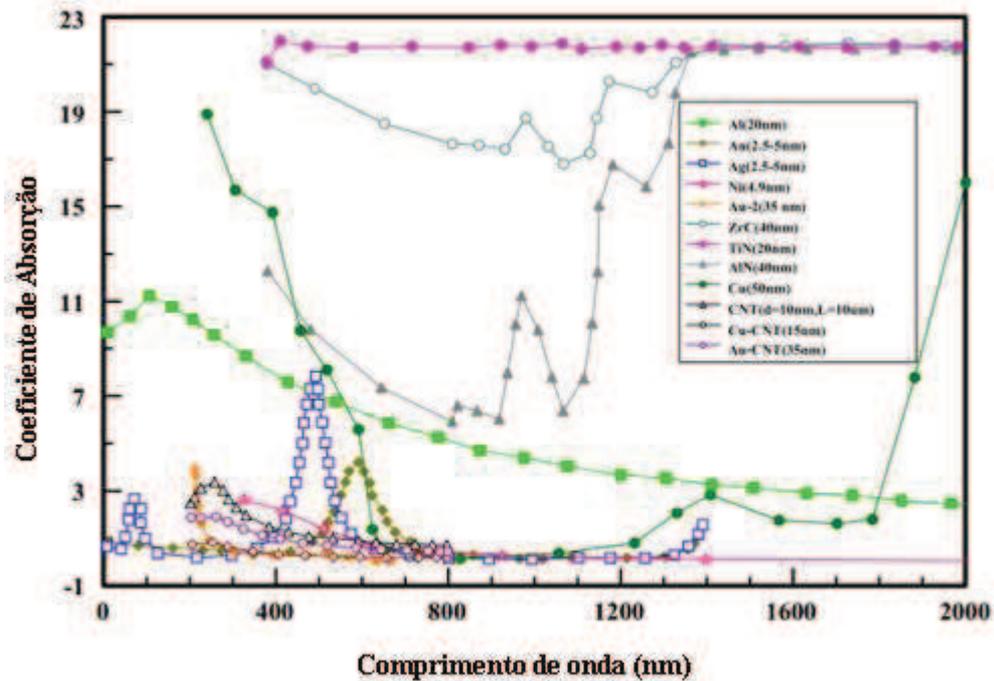
Já em estudos como os de Said *et al.* (2014), para nanofluidos a partir de metais óxidos como Al_2O_3 (alumina) e TiO_2 (titânia) com diferentes concentrações volumétricas, foi observado que o coeficiente de absorção se manteve praticamente igual para todas as concentrações. Além disso, foi relatado que ambos os nanofluidos possuem coeficiente de absorção insignificantes na faixa compreendida entre o ultravioleta e o infravermelho. O coeficiente de absorção de diferentes nanofluidos com base em diferentes óxidos metálicos e em metais são mostrados nas Figuras 12 e 13, respectivamente.

Figura 12 – Coeficiente de absorção de nanofluidos à base de óxidos metálicos.



Fonte: Adaptado de Ahmad *et al.* (2017)

Figura 13 – Coeficiente de absorção de nanofluidos à base de metais.



Fonte: Adaptado de Ahmad *et al.* (2017)

3.6 Aplicações solares térmicas dos nanofluidos

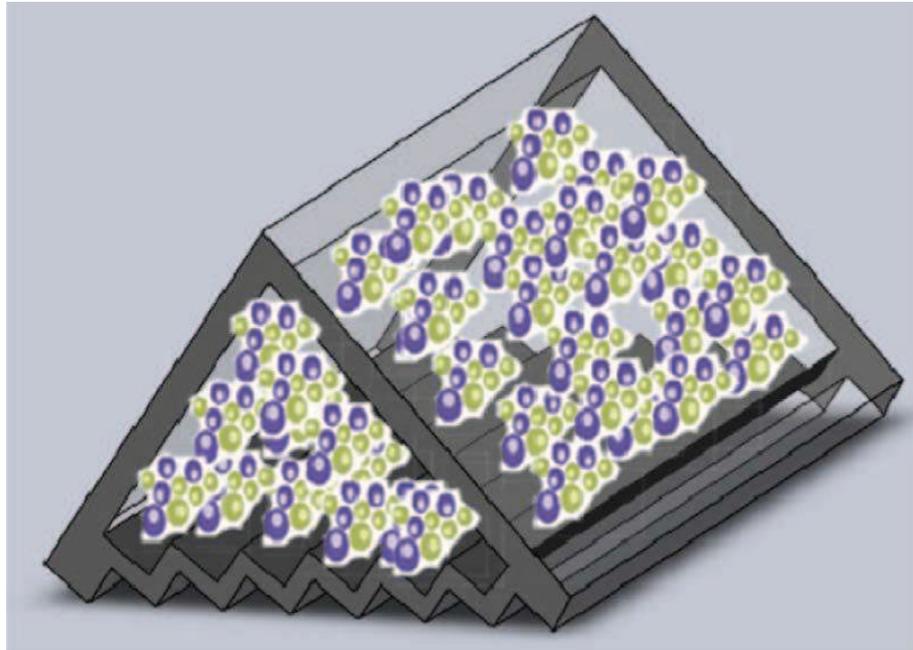
O nanofluido desempenha um papel de suma importância em muitas aplicações que acarretam em um grande impacto no desenvolvimento de equipamentos para inúmeras aplicações de engenharia e medicina. As aplicações dos nanofluidos têm um amplo espectro no campo prático, de modo que exigem artigos de revisão separados a serem cobertos. A seguir, serão abordados estudos sobre aplicações de nanofluidos em sistemas solares térmicos, que é o foco de estudo desse trabalho.

Rahman *et al.* (2014), realizaram um estudo de um coletor solar de formato triangular (Figura 14) com um fundo ondulado e três nanofluidos distintos à base de água: cobre, alumina e dióxido de titânio, pelo método de elementos finitos residuais ponderados de Galerkin para uma ampla gama de números de Grashof. Foi relatado um aumento na transferência de calor convectiva a partir da adição de nanopartículas à água, quando a fração volumétrica das nanopartículas sólidas é mantida em 0,05% ou 0,08% para altos valores de Gr. No entanto, para valores mais baixos de Gr, a condução é o principal modo de transferência de calor para qualquer valor de fração de volume sólido.

Além disso, os resultados mostraram que o nanofluido cobre-água possui um melhor desempenho do ponto de vista da transferência de calor em comparação com outros

nanofluidos investigados. Os resultados ainda mostraram uma melhoria de 24,28% na taxa de transferência de calor para $Gr = 10^6$ na fração volumétrica de 10% das partículas de cobre.

Figura 14 – Vista 3D de um coletor solar triangular preenchido com nanofluido



Fonte: Rahman *et al.* (2014)

Noghrehabadi *et al.* (2016) investigaram experimentalmente a viabilidade da utilização de um nanofluido de dióxido de silício-água para melhorar o desempenho térmico de um coletor solar cônico (Figura 15).

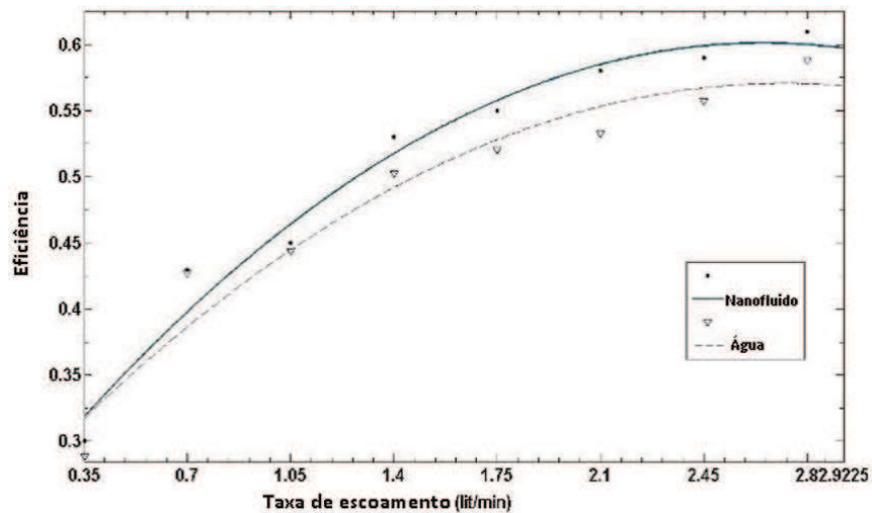
Os experimentos foram realizados com base na radiação solar, taxa de fluxo em massa e variação de temperatura. A eficiência do coletor solar cônico foi aumentada à medida que a taxa de fluxo em massa é aumentada para ambos fluidos de trabalho. A altas taxas de escoamento e maior radiação solar, o coletor com nanofluido apresentou maior aumento na eficiência em comparação com o coletor com água (Figuras 15 e 16). Além disso, a eficiência máxima alcançada foi de cerca de 62%, com um aumento na diferença de temperatura entre a entrada e a saída igual a $6,8^{\circ}C$ para o nanofluido.

Figura 15 - Coletor solar cônico



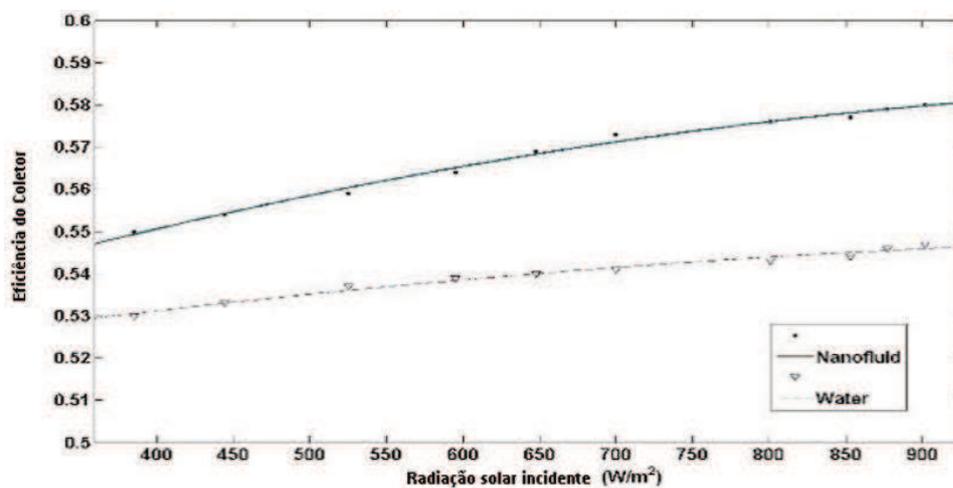
Fonte: Adaptado de Noghrehabadi *et al.* (2016)

Figura 16 – A eficiência do coletor em função da taxa de escoamento.



Fonte: Adaptado de Noghrehabadi *et al.* (2016)

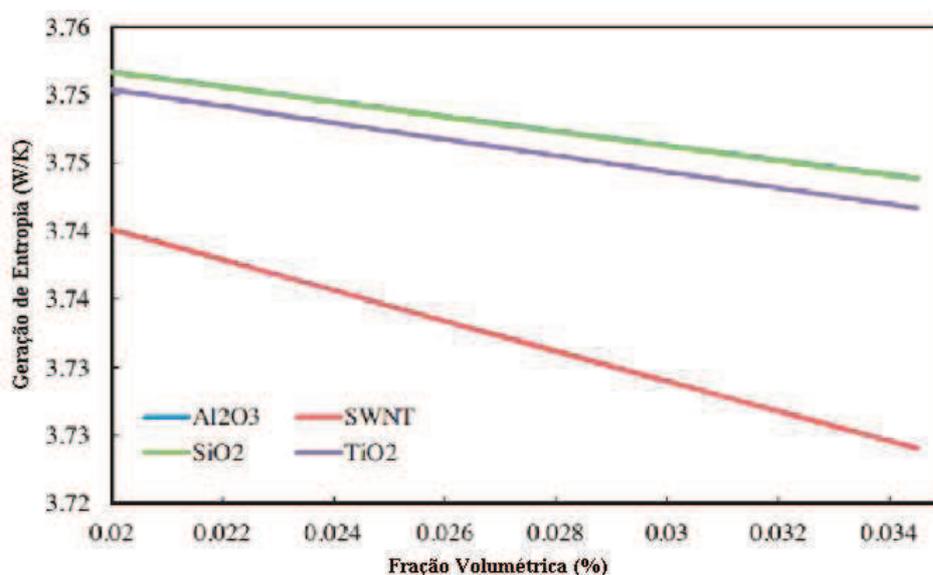
Figura 17 - Eficiência do coletor em função da radiação incidente.



Fonte: Adaptado de Noghrehabadi *et al.* (2016)

Said *et al.* (2014) descobriram que os nanofluidos com nanotubos de carbono de parede única (SWCNTs), em um coletor solar de placa plana, mostraram uma geração mínima de entropia comparada aos nanofluidos preparados pela suspensão de nanopartículas de Al_2O_3 , TiO_2 e SiO_2 no mesmo fluido base, como pode ser observado na Figura 18. Eles atribuíram a diminuição da geração de entropia ao aumento do fluxo de calor na placa absorvedora devido à adição de nanopartículas. Um agitador ultrassônico e um homogeneizador de alta pressão foi usado para dispersar as nanopartículas na água. Observou-se que os nanofluidos do SWCNT poderiam reduzir a geração de entropia em 4,34% e aumentar o coeficiente de transferência de calor em 15,33%.

Figura 18 – Mudança da geração de entropia com a fração volumétrica.



Fonte: Adaptado de Said *et al.* (2014).

Bandarra Filho *et al.* (2014) estudaram cinco concentrações volumétricas distintas de nanopartículas de prata, dispersas em água deionizada, como absorvedores diretos da luz solar para aplicações térmicas solares em células de teste compostas de acrílico (Figura 19). Seus resultados mostraram que a energia térmica máxima armazenada aumenta em 52%, 93% e 144% para a concentração de partículas de prata de 1,62, 3,25 e 6,5 ppm, respectivamente, devido às boas propriedades de conversão fototérmica das nanopartículas de prata.

De acordo com Bandarra Filho *et al.* (2014) o fenômeno mais marcante do experimento é que a maior temperatura global foi alcançada em concentrações muito baixas das nanopartículas de prata (6,5 ppm). Outra observação foi de que a temperatura do nanofluido de prata na concentração de 6,5 ppm variou em 10 graus Celsius na primeira meia hora, enquanto

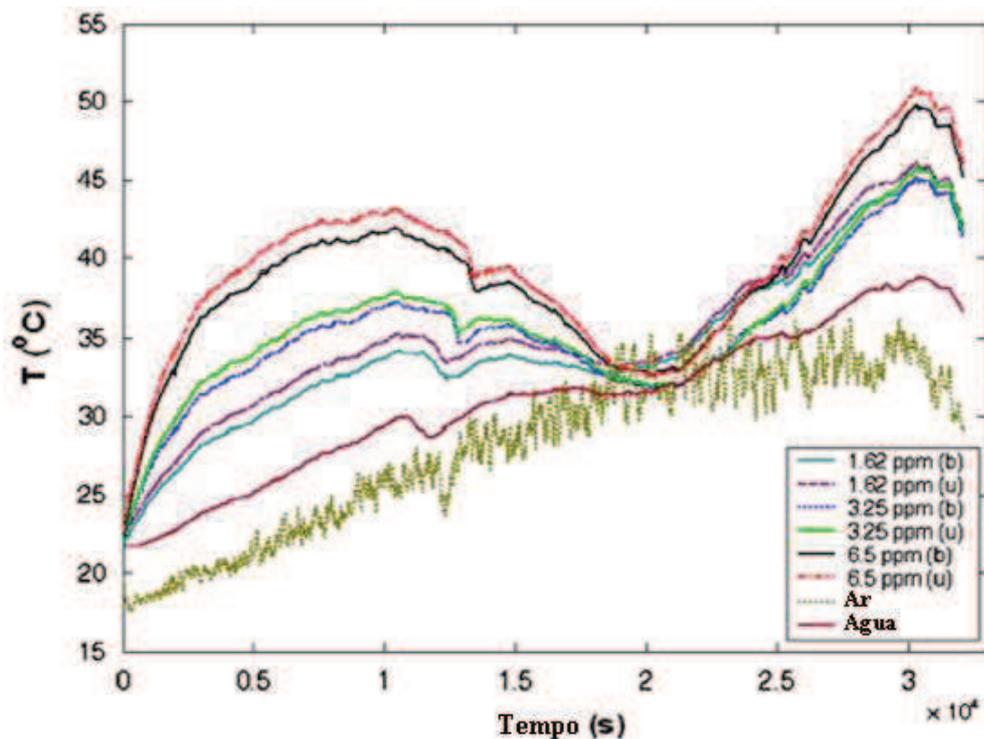
que um aumento de apenas 1 grau Celsius foi observado na temperatura da água deionizada. Além disso, foi destacado que a temperatura do nanofluido em todas as concentrações volumétricas apresentou um perfil de pico duplo, enquanto que a temperatura da água deionizada apresentou uma tendência geral de aumento ao longo do tempo, como pode ser observado na Figura 20.

Figura 19 - Aparato experimental do sistema de absorção de luz solar direta.



Fonte: Bandarra Filho *et al.* (2014).

Figura 20 – Perfis das temperaturas do experimento de 06 de setembro de 2013.

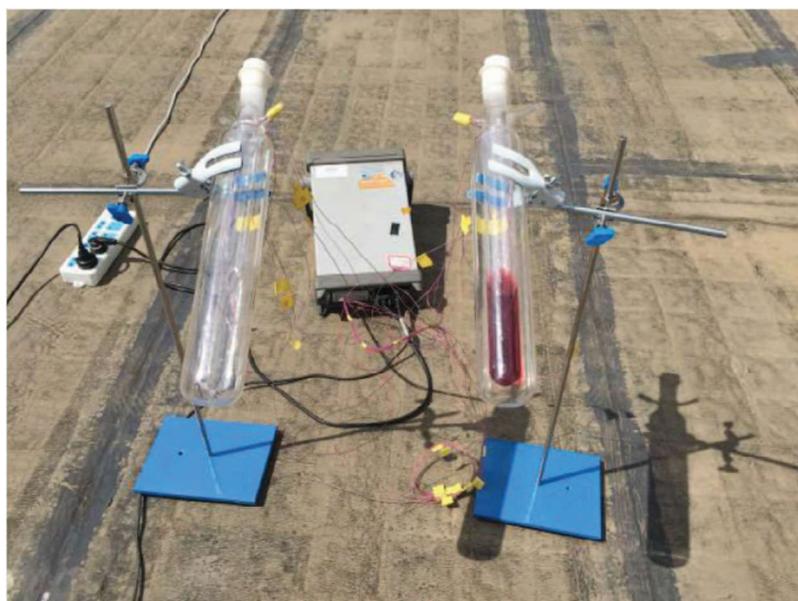


Fonte: Adaptado de Bandarra Filho *et al.* 2014

Eles também observaram que a influência da concentração de partículas na taxa de absorção específica (SAR) é apenas discernível no período inicial de aquecimento. Concluíram que a redução da SAR em maiores concentrações de partículas pode ser o resultado dos seguintes fatores: a formação de aglomerados e a redução da intensidade da luz solar no fluido devido às partículas depositadas na superfície.

Jin *et al.* (2016) investigaram experimentalmente a eficiência de conversão fototérmica de nanofluidos de ouro em um tubo cilíndrico (Figura 21) sob condições naturais de irradiação solar. Verificou-se que a eficiência fototérmica (TEP) dos nanofluidos de ouro era muito superior à da água pura e aumentou de forma não linear com a concentração de nanopartículas, atingindo 76,0% a uma concentração de 5,8 ppm. Um modelo matemático também foi estabelecido para calcular a eficiência da absorção solar sem conhecer o campo de temperatura dentro dos nanofluidos, podendo ser usado para prever a eficiência de conversão fototérmica teórica para os nanofluidos com base apenas em suas propriedades ópticas.

Figura 21 – Experiência de iluminação sob condições naturais de luz solar.



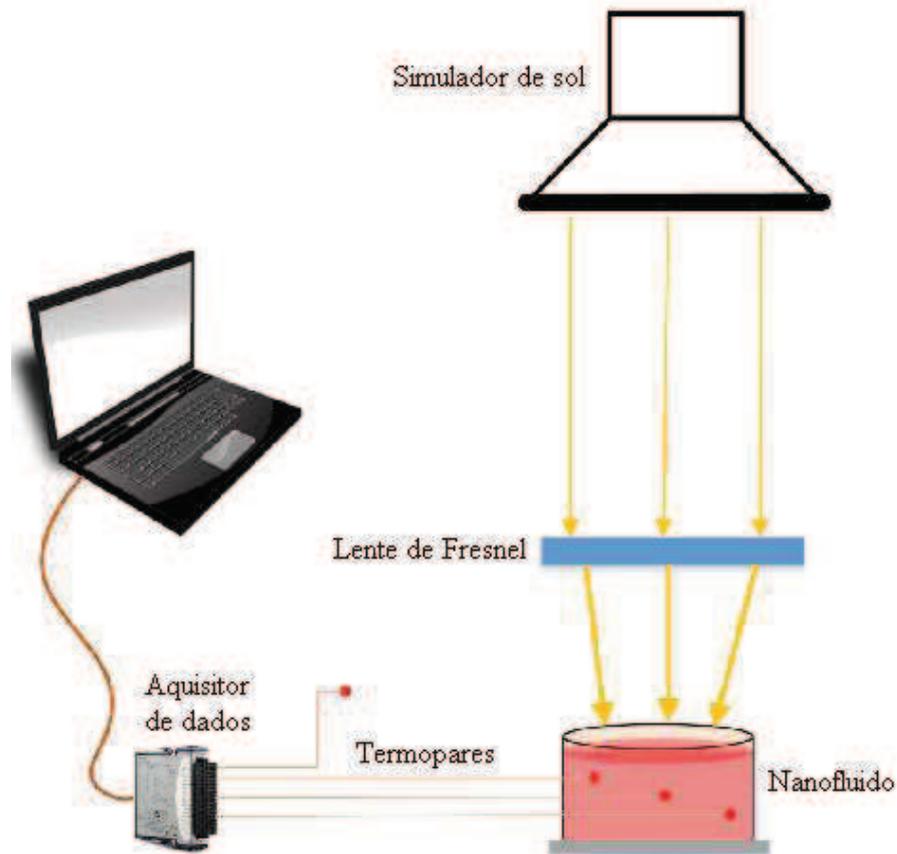
Fonte: Jin *et al.* (2016).

Wang *et al.* (2018) testaram a aplicação de um nanofluido baseado em tinta nanquim na conversão fototérmica. Além disso, compararam os resultados do nanofluido de tinta chinesa com outros dois nanofluidos, um a base de nanopartículas de cobre e o outro baseado em nanopartículas de óxido de cobre. Os resultados obtidos revelaram que o nanofluido de tinta chinesa possui surpreendentemente maior eficiência de conversão fototérmica do que os outros dois, além de mostrar uma estabilidade de dispersão mais satisfatória.

Amjad *et al.* (2018) investigaram o desempenho da conversão fototérmica de seis nanomateriais (prata, cobre, zinco, ferro, silício e alumina-gama) comumente usados em coletores solares de absorção direta (DASC) sob um foco de fluxo solar simulado (Figura 22). Os resultados mostram que todos os nanofluidos têm maior absorção da energia solar do que o fluido base e o nanofluido de prata se mostrou o melhor entre todos devido à sua forte natureza de ressonância plasmônica, isto é, a oscilação coletiva dos elétrons de condução em fase com a radiação eletromagnética incidente.

Segundo Liz-Marzán (2006), quando uma superfície metálica é excitada por luz, as cargas induzidas, que são uma característica dos plásmons de superfície, podem-se propagar como uma onda eletromagnética ao longo da interface entre materiais condutores e dielétricos. Elementos mais nobres, como cobre, prata e ouro, possuem bandas de transições que fazem com que a frequência de plasma seja deslocada para a parte visível do espectro, proporcionando-lhes cor. Um aumento de 99,7% na eficiência de conversão fototérmica da prata foi alcançado dentro do domínio experimental.

Figura 22 - Vista esquemática da configuração experimental sob um simulador solar.



Fonte: Adaptado de Amjad *et al.* (2018)

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados na realização dos trabalhos envolvendo o sistema de absorção solar direta. São apresentados o arranjo e a estrutura de testes, juntamente com seus métodos de acabamento e de fixação. Além disso, estão indicados os aparelhos utilizados nas medições de radiação, temperatura e velocidade do vento. O equacionamento para a obtenção de alguns dados analisados graficamente também está compreendido neste capítulo.

4.1 Preparação e configuração da estrutura experimental

O sistema de teste, nomeado de parede solar, incluiu um suporte feito a partir de perfis de alumínio e duas células de teste (Figura 23). A união dos perfis estruturais feita com parafusos de diferentes tamanhos.

Figura 23 – Parede Solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

A estrutura foi revestida com tinta branca para evitar o seu aquecimento e, conseqüentemente, a transferência de calor para as células através da condução pelo alumínio.

Na parte interna dos perfis foram abertas canaletas para a fixação das placas de vidro. A fim de evitar possíveis vibrações na estrutura, foram inseridos esteios para garantir uma melhor fixação no solo.

Duas células de teste foram selecionadas e fixadas no suporte, uma na parte superior e outra na parte inferior. Cada uma das células possui formato retangular e é constituída de duas placas de vidro branco temperado e transparente. Cada placa de vidro possui as seguintes dimensões: 1000 mm de comprimento, 500 mm de altura e 8 mm de espessura, separadas por um espaço de 5 mm onde foram inseridos os nanofluidos e a água deionizada. Cada célula de teste foi preenchida com um volume de 2,5 litros. Para evitar vazamentos e ajudar na fixação do vidro na estrutura, a folga nas canaletas compreendida entre a placa de vidro e os perfis de alumínio foi preenchida com silicone.

4.2 Medição, armazenamento e coleta de dados

O sistema de medição, armazenamento e coleta dos dados experimentais é composto por um aparelho *datalogger* modelo RX12 da OMEGA e um conjunto de sete termopares (Figura 24) conectados às suas portas, os quais registram e armazenam as temperaturas de dentro das células de teste e do ambiente externo.

Figura 24 – Data logger



Fonte: Elaborada pelo autor.

Além disso, ainda há um pireliômetro e que mede a radiação direta e dois piranômetros do tipo Eppley PSP (Figura 25), um sob um anel de sombreamento e que mede a radiação difusa e outro horizontal responsável por mensurar a radiação global. Há também um anemômetro (Figura 26) que registra os dados de velocidade do vento.

Figura 25 – Piranômetros



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 26 – Anemômetro



Fonte: Elaborada pelo autor

Foram construídos suportes de resina para fixar cada um dos termopares dentro das células de teste. Cada célula de teste conta com 3 termopares (Figura 27), um localizado ao centro, outro a esquerda e o outro a direita. Os termopares das extremidades estão espaçados em 13 centímetros das bordas da célula de teste e localizam-se na faixa central tomando a altura da célula de teste como referência. Há outro termopar medindo a temperatura do ambiente externo e que está localizado na parte superior da estrutura, estando sob a proteção de um escudo de radiação solar (Figura 28).

Figura 27 – Termopares na célula de testes



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 28 - Termopar sob escudo de radiação solar.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Todas as temperaturas foram medidas na frequência de 1 hertz, entretanto, para se realizar a análise dos dados e o balanço de energia, foi realizada uma média, para cada célula, de dois em dois minutos, nas temperaturas medidas pelos termopares, tendo em vista que os dados das radiações se encontram disponíveis apenas para essa mesma quantidade de tempo.

Os termopares são do tipo K e foram calibrados em banho termostático com água (Figura 29) contra um termômetro de vidro, com uma precisão de ± 0.1 °C.

Figura 29 – Calibração dos termopares em banho termostático.



Fonte: Elaborada pelo autor.

4.3 Preparação do Nanofluido

O nanofluido foi preparado seguindo a segunda etapa do método de dois passos, tendo em vista que as nanopartículas de dióxido de titânio já foram adquiridas do fornecedor nas condições necessárias para a dispersão. No que diz respeito à composição da estrutura cristalina das nanopartículas, ela é composta pelas estruturas de rutilo e anatase.

Um processador ultrassônico modelo UP100H (Figura 30) foi utilizado para realizar o processo de dispersão das nanopartículas no fluido base. A estabilização foi realizada a partir da adição do surfactante ácido esteárico na proporção de 0,3% da concentração volumétrica, sendo a correção da solução feita com hidróxido de sódio (NaOH) obtendo-se um valor de $\text{pH} = 10$.

Figura 30 – Processador Ultrassônico



Fonte: Elaborada pelo autor.

Foram formuladas 4 diferentes concentrações volumétricas de nanopartículas de dióxido de titânio para o nanofluido: 12,5 ppm (0,00125%), 25 ppm (0,0025%), 50 ppm (0,005%) e 75 ppm (0,0075%).

A Tabela 2 mostra os valores de algumas propriedades, como o calor específico, a condutividade térmica e a difusividade térmica dos elementos envolvidos nos testes. As propriedades listadas são para uma temperatura de 30 °C e a pressão de 101 kPa.

Tabela 2 – Propriedades térmicas.

Material	c_p (J/kg.°C)	k (W/m.°C)	ζ (m²/s)
TiO₂	720	8,4	28,2e-7
Água	4184	0,6	0,9525e-7
Vidro	880	0,937	4,26e-7
Acrílico	1600	0,201	1,055e-7

Fonte: Elaborado pelo autor.

4.4 Cálculo do ângulo de incidência solar

O ângulo de incidência solar θ , isto é, aquele que indica a direção da radiação direta sob uma determinada superfície, que neste trabalho é a parede solar, é uma variável dependente de outras que, por sua vez, também necessitam de cálculos prévios. Algumas possuem valores fixos, como é o caso da longitude local ($l_{loc} = 38,5778^\circ$), longitude do meridiano padrão ($l_{pad} = 45^\circ$), latitude local ($\varphi = 3,7452^\circ$) e ângulo de azimute da superfície (γ), este último tem valores fixos de -90° para antes do meio-dia solar, 0° ao meio-dia solar e 90° após esse período.

Já outras, dependem tanto das variáveis fixas, como de outras que mudam de acordo com o dia e o horário, como são os casos dos parâmetros B e E dos quais a equação da hora solar (H_{sol}) é dependente, do ângulo da hora solar (ω) que depende desta última e da declinação solar (δ) que possui um valor para cada dia do ano (d).

A Tabela 3 traz em ordem as equações necessárias para se encontrar o valor do ângulo de incidência solar. As equações foram retiradas de (Duffie & Beckman, 2013) e Goswani (2015), com adaptações de representação em algumas variáveis que foram feitas para não coincidir com termos já existentes neste presente trabalho.

Tabela 3 – Equações para o cálculo do ângulo de incidência solar.

Variável	Equação	
B	$B = (1 - d) \frac{360}{365}$	(5)
E	$E = 229,2 * (0,000075 + 0,001868 * \cos B - 0,0320077 * \sin B - 0,014615 * \cos 2B - 0,04089 * \sin 2B)$	(6)
H_{sol}	$H_{sol} = \text{horário padrão} + 4 * (L_{pad} - L_{loc}) + E$	(7)
ω	$\omega = (H_{solar} - 12) * 15^\circ$	(8)
δ	$\delta = 23,45 * \sin \left(360 \frac{284 + d}{365} \right)$	(9)
θ	$\cos \theta = -\sin \delta * \cos \varphi * \cos \gamma + \cos \delta * \sin \varphi * \cos \gamma * \cos \omega + \cos \delta * \sin \gamma * \sin \omega$	(10)

Fonte: Elaborada pelo autor.

4.5 Balanço de energia do sistema

Para a realização do balanço de energia do sistema de testes foram utilizadas várias considerações e equacionamentos contidos em Duffie e Beckman 2013. Contudo, a simbologia de algumas variáveis foi modificada a fim de evitar conflito com outros termos existentes neste trabalho.

O seguinte balanço de energia indica a distribuição da energia solar incidente em ganho útil, perdas térmicas e perdas ópticas para a parede solar como está esquematizado no volume de controle da Figura 31.

O calor armazenado no decorrer do período de testes é dado pela variação de entalpia do sistema, que como neste caso acontece a volume constante, é a própria variação de energia interna do sistema (Equação 11).

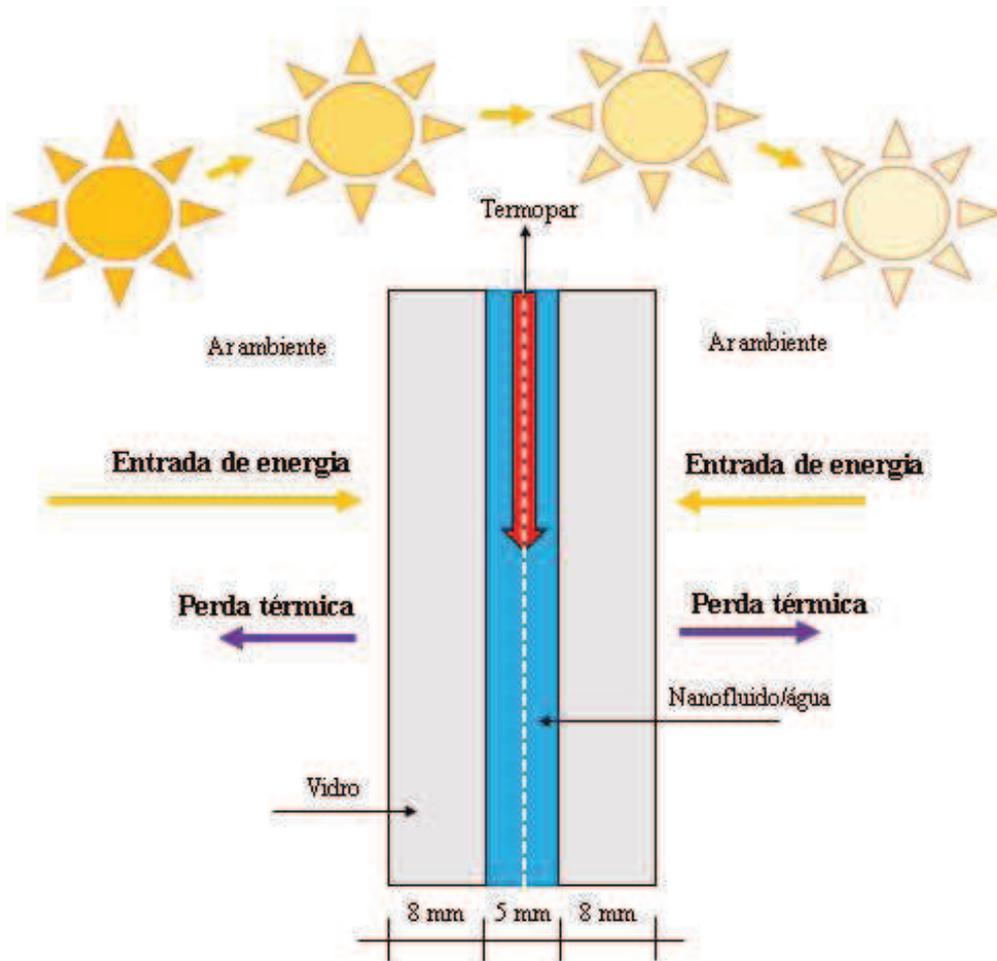
$$Q = mc_p (T_{(t)} - T_{(i)}) \quad (11)$$

Sendo Q igual a diferença entre a radiação solar absorvida e a perda térmica, multiplicados pela área útil das placas de vidro, que pode ser definida pela Equação 12:

$$Q = A[G - U(T_f - T_{ar})] \quad (12)$$

Onde G representa a radiação solar absorvida por cada célula de teste por unidade de área, que é igual a diferença entre a radiação solar incidente e as perdas ópticas. A energia térmica perdida pelas células de teste para o ambiente por condução, convecção e radiação pode ser representada como o produto do coeficiente de transferência de calor U vezes a diferença entre a temperatura média do fluido T_f e a temperatura ambiente T_{ar} , multiplicados pela área útil da célula de teste.

Figura 31 – Secção transversal esquematizada do volume de controle.



Fonte: Elaborado pelo autor

Com o intuito de facilitar o entendimento, primeiramente serão descritas as equações que governam a entrada de energia no sistema com as propriedades ópticas e em seguida as equações que regem as perdas de energia.

- **Ganhos**

Para o cálculo do ganho de energia absorvida pelo sistema de testes, foi utilizado o modelo difuso isotrópico desenvolvido por Liu e Jordan (1963), o qual considera que a radiação incidente possui três distribuições espaciais diferentes: radiação direta, radiação difusa e radiação refletida pelo solo.

O modelo de difuso isotrópico foi desenvolvido para valores de hora em hora, mas como o intuito deste trabalho foi analisar o comportamento dos fenômenos de transferência de calor de maneira mais detalhada, e como já fora mencionado que os valores das parcelas de radiação foram obtidos para cada 02 minutos, utilizou-se uma média móvel de 01 hora para se obter os valores das parcelas de radiação coerentes com a metodologia do modelo difuso isotrópico, mantendo a frequência de medição para cada dois minutos.

Sendo assim, a radiação absorvida pela parede solar, já levando em conta as perdas ópticas da cobertura de vidro e do fluido, foi obtida pela Equação 13.

$$G = I_{\text{direta}} \cos\theta (\tau\alpha)_{\text{direta}} + 2I_{\text{difusa}} (\tau\alpha)_{\text{difusa}} \left(\frac{1 + \cos\beta}{2}\right) + 2I_{\text{p_solo}} (\tau\alpha)_{\text{refletida}} \left(\frac{1 - \cos\beta}{2}\right) \quad (13)$$

I_{direta} , I_{difusa} e I são as parcelas de radiação direta, difusa e global. β corresponde ao ângulo de inclinação das células de teste e θ , como já explicitado anteriormente no tópico 4.4, corresponde ao ângulo de incidência solar da radiação direta. As parcelas de radiação difusa e refletida estão multiplicadas por 2 porque a estrutura recebe essas parcelas pelos dois lados (leste e oeste), enquanto que a radiação direta é direcionada apenas pela posição do sol, a leste pela manhã e oeste pela tarde, como mostrado na Figura 31.

No modelo difuso isotrópico, as parcelas de radiação difusa e refletida pelo solo também possuem ângulos de incidência que são funções da inclinação β da parede solar. As Equações 14 e 15 que descrevem esses ângulos foram desenvolvidas por Brandmuehl e Beckman (1980).

$$\theta_{\text{difusa}} = 59,7 - 0,1388\beta + 0,001497\beta^2 \quad (14)$$

$$\theta_{\text{refletida}} = 90 - 0,5788\beta + 0,002693\beta^2 \quad (15)$$

A transmissão, reflexão e absorção da radiação solar pelas várias partes de um

sistema solar térmico são importantes para determinar o seu desempenho. A transmitância, refletância e absorvidade são funções da radiação incidente e da espessura, índice de refração e coeficiente de extinção do material.

Antes de prosseguir com as explicações, vale destacar que tanto a absorvidade do fluido (α) para as diferentes parcelas de radiação, como o albedo do solo (ρ_{solo}), foram obtidos através do modelo meta-heurístico da Busca Harmônica, tendo em vista que esses valores não são comuns na literatura e o método permitiu avaliar de forma coerente essa lacuna, possibilitando a modelagem sem a dependência de aplicações genéricas, por se tratar de um sistema de testes com características distintas dos mais comuns, como por exemplo, o absorvedor é o próprio fluido ao invés da placa, no caso de um coletor de placa plana.

- **Transmitância**

O produto $\tau\alpha$ (Equação 16) é considerado como sendo uma propriedade resultante da combinação cobertura-absorvedor, isto é, da transmitância do vidro com a absorvidade do nanofluido para a célula superior e com a absorvidade da água na célula inferior.

$$(\tau\alpha) = \frac{\tau\alpha}{1 - (1 - \alpha)\rho_d} \quad (16)$$

Entretanto, para se chegar à equação anterior, primeiramente é necessário encontrar valores para a transmitância (τ) do vidro. Ela é obtida pelo produto das transmitâncias (Equação 17) que consideram as perdas devidas à absorção (τ_a) e reflexão (τ_r) da radiação incidente no vidro:

$$\tau = \tau_a \tau_r \quad (17)$$

Onde:

$$\tau_r = \frac{1}{2} \left(\frac{1 - r_{\parallel}}{1 + r_{\parallel}} + \frac{1 - r_{\perp}}{1 + r_{\perp}} \right) \quad (18)$$

A transmitância que leva em conta perdas por reflexão é função das refletividades perpendicular (Equação 19) e paralela (Equação 20) da radiação não polarizada, ao passar de

um meio para o outro, com diferentes índices de refração (n_1 e n_2).

As equações seguintes, desenvolvidas por Fresnel, para superfícies lisas, mostram que as refletividades da radiação não polarizada, por sua vez, são funções dos ângulos de incidência (θ) e de refração (θ_2) e, por fim, o ângulo de refração é obtido através da aplicação da lei de Snell (Equação 21).

$$r_{\perp} = \frac{\text{sen}^2(\theta_2 - \theta_1)}{\text{sen}^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (19)$$

$$r_{\parallel} = \frac{\tan^2(\theta_2 - \theta_1)}{\tan^2(\theta_2 + \theta_1)} \quad (20)$$

$$n_1 \text{sen} \theta_1 = n_2 \text{sen} \theta_2 \quad (21)$$

A absorção de radiação num meio parcialmente transparente é descrita pela lei de Bouguer (Equação 22), que se baseia no pressuposto de que a radiação absorvida é proporcional à intensidade local no meio e a distância x que a radiação percorreu no meio:

$$dI = -IKdx \quad (22)$$

Onde K é a constante de proporcionalidade, o coeficiente de extinção, que é assumido como uma constante no espectro solar. A integração ao longo do caminho real no meio (isto é, de zero a $w/\cos \theta_2$) produz a Equação 23:

$$\tau_a = \exp\left(\frac{-Kw}{\cos \theta_2}\right) \quad (23)$$

Onde τ_a é a transmitância que leva em conta as perdas por absorção e w a espessura do vidro. Para o vidro branco, o valor do coeficiente de extinção K é de aproximadamente 4 m^{-1} .

- **Refletância**

Com relação à reflexão da placa absorvedora que, neste caso, são os próprios fluidos (água deionizada e nanofluido de dióxido de titânio), supõe-se que seja difusa e não polarizada,

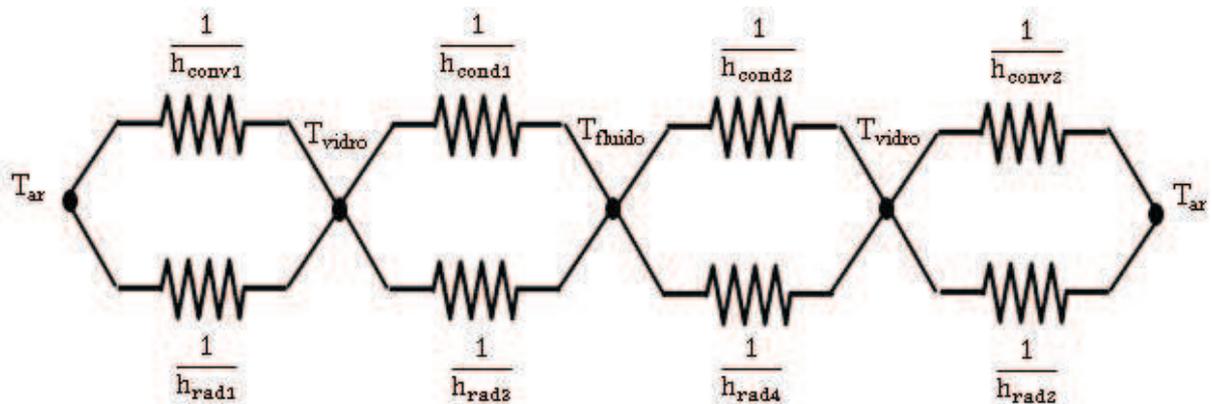
de modo que a fração que atinge a cobertura de vidro é uma radiação difusa que é refletida de volta para a placa absorvedora. A quantidade ρ_d presente na Equação 16 refere-se à refletância da parte interna da cobertura de vidro e pode ser estimada, segundo a Equação 24, como a diferença entre τ_a e τ em um ângulo de 60° (DUFFIE e BECKMAN, 2013).

$$\rho_d = \tau_a - \tau \quad (24)$$

- **Perdas**

As perdas de energia térmica foram divididas de acordo com o circuito térmico e de resistências térmicas apresentados nas figuras 32 e 33.

Figura 32 – Circuito térmico do volume de controle



Fonte: Elaborada pelo autor

Figura 33 – Circuito das resistências térmicas do volume de controle



Fonte: Elaborada pelo autor

- **Resistências entre o ar ambiente e o vidro**

A primeira resistência do sistema R_1 diz respeito à resistência térmica entre a cobertura de vidro e o meio exterior, com transferência de calor por convecção e radiação. Dessa

forma, a primeira resistência do circuito é dada pela Equação 25:

$$R_1 = \frac{1}{h_{\text{conv1}} + h_{\text{rad1}}} \quad (25)$$

Analogamente, a R_2 é obtida pela Equação 26:

$$R_2 = \frac{1}{h_{\text{conv2}} + h_{\text{rad2}}} \quad (26)$$

Para placas com área superficial de 0,5 m², Watmuff *et al.* (1977) elaboraram a seguinte equação que descreve o coeficiente de transferência de calor por convecção entre o ar e a superfície de vidro (Equação 27).

$$h_{\text{conv1}} = 2,8 + 3V \quad (27)$$

Onde V é a velocidade do vento. E sendo o circuito simétrico $h_{\text{conv1}} = h_{\text{conv2}}$. Já o coeficiente de transferência de calor por radiação entre o ar ambiente e a superfície do vidro é dado pela Equação 28:

$$h_{\text{rad1}} = \varepsilon_{\text{vidro}} \sigma (T_{\text{vidro}}^2 + T_{\text{ar}}^2) (T_{\text{vidro}} + T_{\text{ar}}) \quad (28)$$

Onde $\varepsilon_{\text{vidro}}$ é a emissividade do vidro e σ é a constante de Stephan-Boltzman. E assim como na relação anterior, $h_{\text{rad1}} = h_{\text{rad2}}$.

- **Resistências entre o vidro e o fluido**

A terceira resistência do circuito R_3 representa a resistência térmica entre o fluido de testes e o vidro.

$$R_3 = \frac{1}{h_{\text{cond1}} + h_{\text{rad3}}} \quad (29)$$

Analogamente, R_4 é obtida pela Equação 30:

$$R_4 = \frac{1}{h_{\text{cond}2} + h_{\text{rad}4}} \quad (30)$$

Em tese, haveria entre o fluido e o vidro transferência de calor por convecção, contudo, como a razão entre altura do vidro e a espessura da camada de fluido e a razão entre a largura do vidro e espessura da camada de fluido são $\gg 1$, e, além disso, de acordo com Incropera *et al.* (2011), o número de Rayleigh (Equação 31) é menor do que o valor crítico de $Ra = 1708$, a transferência de calor entre as superfícies se dá apenas por condução e radiação, com as duas superfícies (fluido e vidro) formando uma só resistência térmica,

$$R_a = \frac{g(T_f - T_{\text{vidro}})L^3 P_r}{T_m \nu^2} \quad (31)$$

Dessa forma, o coeficiente de condução (Equação 32) é obtido por:

$$h_{\text{cond}1} = \frac{k_f}{\frac{L}{2}} + \frac{k_{\text{vidro}}}{w} \quad (32)$$

Onde k_f e k_{vidro} são as condutividades térmicas do fluido e do vidro, L é a espessura da camada de fluido e w a espessura do vidro. Pelo que já foi exposto anteriormente com relação ao circuito térmico, $h_{\text{cond}1} = h_{\text{cond}2}$.

O coeficiente de transferência de calor por radiação entre o fluido e o vidro é dado pela Equação 33:

$$h_{\text{rad}3} = \frac{\sigma(T_{\text{vidro}}^2 + T_f^2)(T_{\text{vidro}} - T_f)}{\frac{1}{\epsilon_f} + \frac{1}{\epsilon_{\text{vidro}}} - 1} \quad (33)$$

E analogamente às outras considerações, tem-se $h_{\text{rad}3} = h_{\text{rad}4}$.

- **Coeficiente global de perdas de calor**

O coeficiente global de perdas de calor é obtido pelo inverso das somas das

resistências térmicas que descrevem o circuito.

$$U = (R_1 + R_2 + R_3 + R_4)^{-1} \quad (34)$$

Como a temperatura do vidro não estava sendo medida por nenhum instrumento, para poder descobrir o seu valor, foi necessário realizar um processo iterativo que consistiu em estimar um valor inicial para se calcular os coeficientes de transferência de calor por condução e radiação.

Em seguida, utilizou-se a Equação 35 para comparar a temperatura encontrada com o seu valor estimado inicialmente, repetindo o processo até se chegar na igualdade.

$$T_{\text{vidro}} = T_f \left(\frac{U(T_f - T_{\text{ar}})}{h_{\text{cond1}} + h_{\text{rad3}}} \right) \quad (35)$$

4.6 Método meta-heurístico da Busca Harmônica

A Busca Harmônica é um algoritmo meta-heurístico que se baseia na analogia do fenômeno artificial de um grupo musical em busca da melhor harmonia. Esta busca ocorre por meio da combinação dos elementos existentes e a geração de novos elementos que são combinados para formar possíveis soluções (SANTOS, 2018).

A performance musical busca a harmonia mais prazerosa, determinada pela estimativa estética, do ponto de vista humano, assim como os algoritmos de otimização buscam o melhor estado, isto é, o ótimo global, determinado pela função objetivo (MACÊDO, 2018)

Uma analogia com a improvisação do Jazz foi estabelecida por Meziane *et al.* (2014), tendo como objetivo de esclarecer o princípio da Memória Harmônica (HM), considerando um trio de músicos composto por um guitarrista, um contrabaixista e um pianista. A analogia consistiu no seguinte: cada músico toca um conjunto de notas musicais criando uma harmonia primária composta por: guitarrista (Sol, Si, Re, Fa, Mi); contrabaixista (Fa, Mi, Re, La, Si); pianista (Si, Re, Mi, Do, La). O guitarrista toca aleatoriamente uma nota musical (Sol) fora de seu arranjo; o contrabaixista toca aleatoriamente uma nota musical (Si) fora de seu conjunto e o pianista toca aleatoriamente uma nota musical (Re) fora de seu conjunto. Assim sendo, a nova harmonia (Sol, Si, Re) composta pelo trio torna-se uma outra harmonia musical. Se a nova harmonia for melhor do que a pior harmonia existente no HM, inclui-se a nova

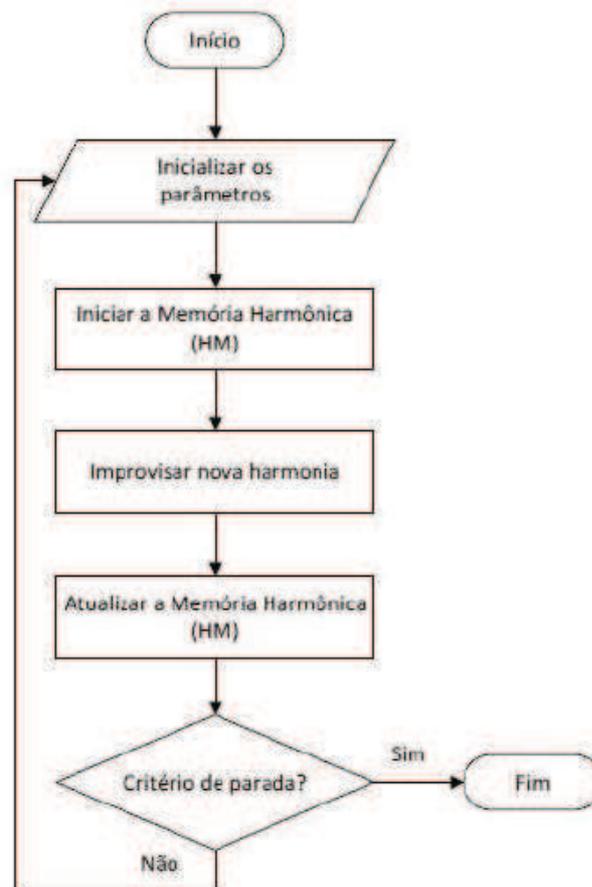
harmonia e a pior será excluída, sendo este processo repetido até que a melhor harmonia seja obtida.

A consideração inicial é a de que a melhor solução existe primeiramente na Memória Harmônica, todavia, quando esse não é o caso, com o propósito de se encontrar o ótimo global, um outro parâmetro é inicializado, a Taxa de Consideração da Memória Harmônica (HMCR), ele trata-se de um número que varia entre 0 e 1 (MACÊDO, 2018).

A fim de aprimorar as soluções, evitando que o método se prenda a mínimos locais, outro parâmetro é iniciado, denominado de Taxa de Ajuste de Som (PAR), que, por sua vez, também varia entre 0 e 1. Esse parâmetro imita o ajuste de afinação de cada instrumento para ajustar o conjunto (GEEM *et al.*, 2001).

De acordo com Askarzadeh e Zebajadi (2014) o grau de similaridade é controlado por um parâmetro denominado largura de banda, *bw*. A Figura 34 apresenta o esquema do algoritmo da Busca Harmônica em fluxograma.

Figura 34 – Fluxograma do algoritmo da Busca Harmônica



Fonte: Macêdo (2018)

O método utilizado neste trabalho na seleção dos parâmetros da busca harmônica das variáveis das absorvidades dos fluidos (α) e albedo do solo (ρ_{solo}) foi proposto por Askarzadeh e Zebarjadi (2014) e baseia-se nas Equações 36, 37 e 38

$$\text{HCMR} = 0,9 + 0,1 * \text{rand}(0,1) \quad (36)$$

$$\text{PAR} = \frac{1 - \text{rand}(0,1)}{2} \quad (37)$$

$$\text{bw} = \text{rand}(0,1) \quad (38)$$

Onde $\text{rand}(0,1)$ é o número aleatório no intervalo de 0 a 1.

4.7 Coeficiente de correlação de Pearson (R)

A fim de verificar a eficácia da aplicação do método meta-heurístico da Busca Harmônica, comparando os valores da variação de entalpia na parede solar (Equação 15) com os valores obtidos pela (Equação 16), a partir do balanço de energia, foi utilizado o coeficiente de correlação de Pearson.

O coeficiente de correlação de Pearson é calculado de acordo com a Equação 39:

$$R = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \cdot \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (39)$$

Onde X_1, X_2, \dots, X_n e Y_1, Y_2, \dots, Y_n são os valores medidos de ambas as variáveis e os valores \bar{X} e \bar{Y} são as médias aritméticas dos conjuntos de valores das variáveis.

O coeficiente de correlação de Pearson (R), também chamado de coeficiente de correlação produto-momento ou o R de Pearson, mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas. O coeficiente de correlação Pearson varia de -1 a 1. O sinal indica direção positiva ou negativa do relacionamento e o valor sugere a força da relação entre as variáveis. Entretanto, como valores extremos (-1 ou 1) dificilmente são encontrados na prática, muitos pesquisadores discutiram a forma de interpretar a magnitude dos coeficientes.

Para Cohen (1988), valores entre 0,10 e 0,29 podem ser considerados pequenos; valores entre 0,30 e 0,49 podem ser considerados como médios; e valores entre 0,50 e 1 podem ser interpretados como grandes. Dancey e Reidy (2005) apontam uma classificação ligeiramente diferente, denotando valores entre 0,10 e 0,30 como fracos, valores entre 0,40 até 0,6 como moderados e, por fim, valores entre 0,70 até 1 como fortes. Vale destacar que para o valor de R igual a 0, a interpretação é a de que não há correlação entre as variáveis testadas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo apresenta os resultados experimentais e suas análises a partir dos testes realizados no LESGN, utilizando, na célula superior, quatro concentrações volumétricas do nanofluido dióxido de titânio-água deionizada, isto é, 0,00125% (12,5 ppm), 0,0025% (25 ppm), 0,005% (50 ppm), 0,0075% (75 ppm) e somente água deionizada na célula inferior. Os testes foram realizados durante o período compreendido entre 19 de outubro de 2018 e 12 de dezembro de 2018, cada concentração de nanopartículas foi analisada separadamente durante o período de duas semanas e observadas em um intervalo de tempo de 12 horas de duração, compreendido entre 06:00 e 18:00 horas.

Levando em conta o comportamento das parcelas da radiação solar, foram escolhidas duas condições de céu para análise e discussão dos resultados experimentais: céu claro, isto é, com predominância de radiação direta e céu nublado, com predominância de radiação difusa. Uma das principais dificuldades foi a de encontrar dias similares nas condições de céu claro e nublado para as diferentes concentrações do nanofluido, tendo em vista que cada concentração foi submetida ao teste em dias diferentes e as condições de céu e climáticas variaram.

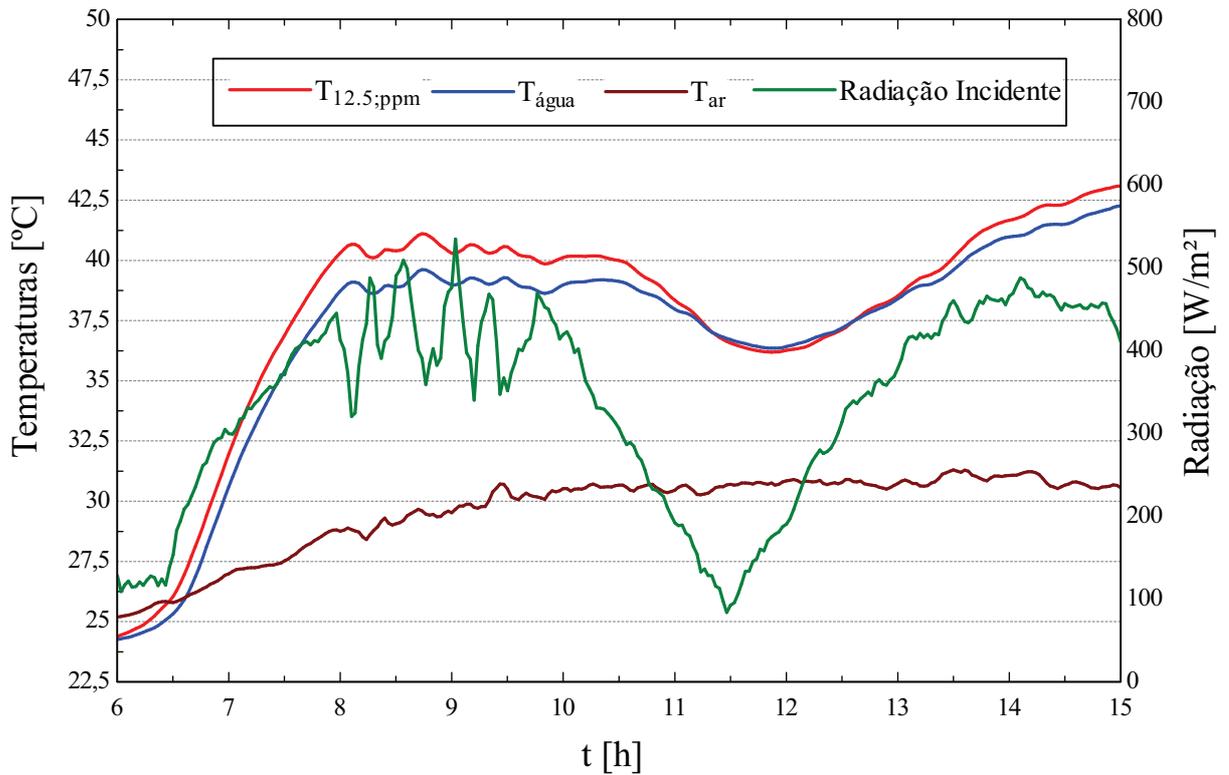
Uma análise do balanço de energia e das propriedades ópticas de absorvidade do nanofluido e da água deionizada, obtidas por meio do método meta-heurístico da Busca Harmônica Simples, e uma correlação entre os valores medidos com os simulados estão apresentadas nos tópicos posteriores.

5.1 Testes em dias de céu claro

Algumas observações podem ser feitas a partir da observação dos gráficos 1, 2, 3 e 4, que mostram os perfis da radiação incidente (produto da radiação direta com cosseno de θ somado à parcela de radiação difusa) sobre a parede solar e os das temperaturas do ar externo, da água e do nanofluido para as concentrações de 12,5 ppm (12 de dezembro de 2018, neste os dados de temperatura só foram medidos até as 15:00 horas devido a problemas no *data logger*), 25 ppm (20 de novembro de 2018), 50 ppm (26 de outubro de 2018) e 75 ppm (04 de novembro de 2018), respectivamente, em função do tempo.

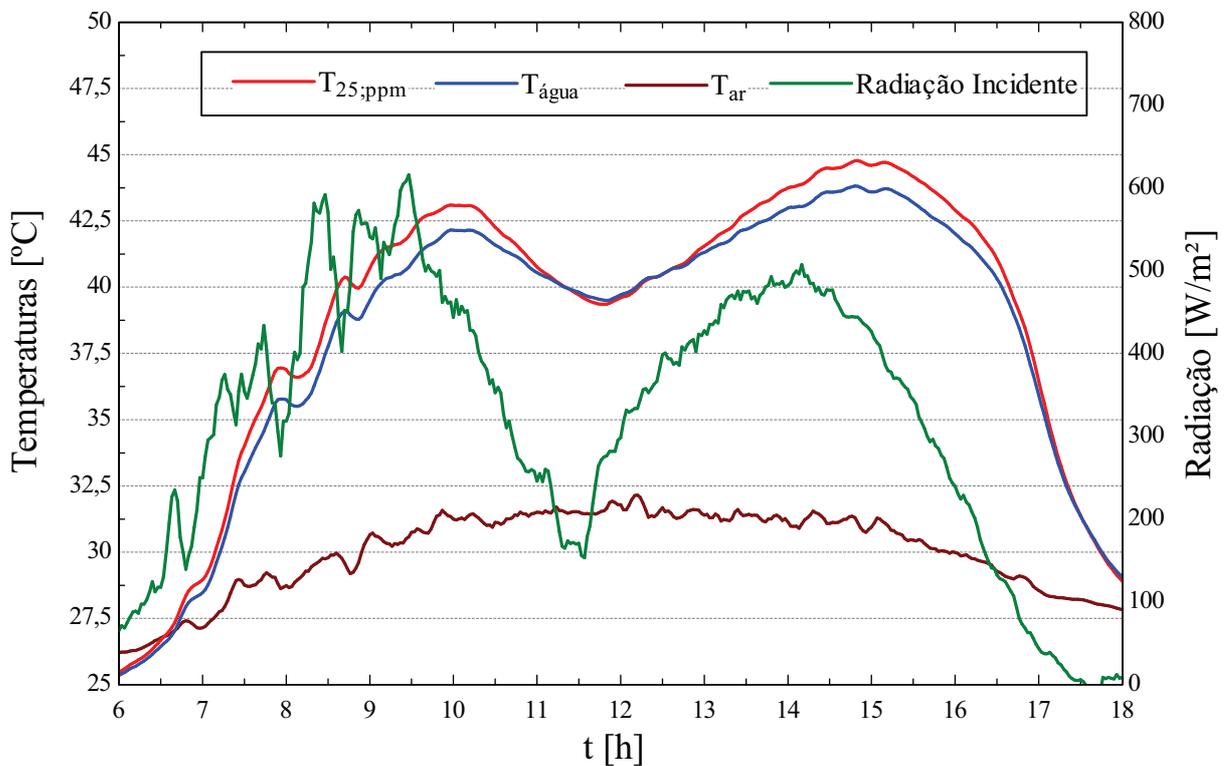
A primeira observação é a de que os perfis de temperatura das concentrações do nanofluido e da água possuem comportamentos semelhantes, com dois picos e um vale entre eles.

Gráfico 1 – Temperatura e radiação – 12,5 ppm-água deionizada – 12-12-2018



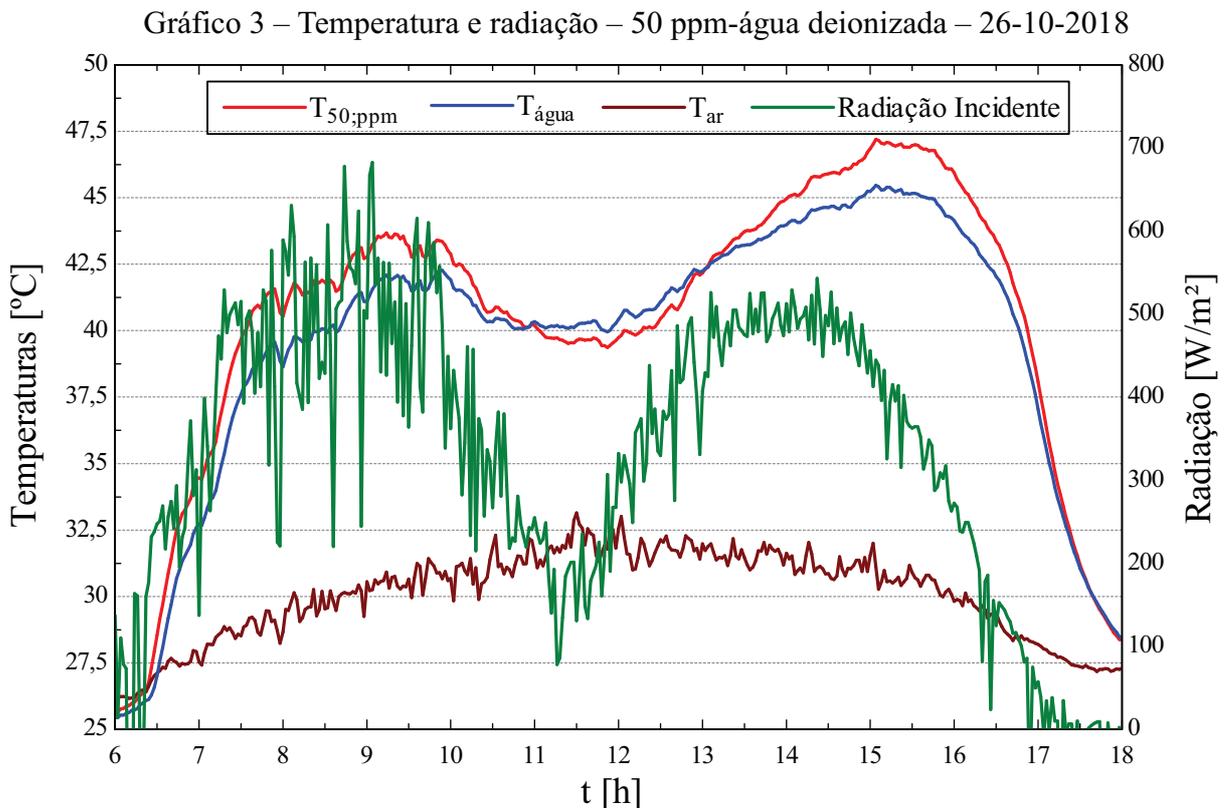
Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 2 – Temperatura e radiação – 25 ppm-água deionizada – 20-11-2018



Fonte: Elaborado pelo autor.

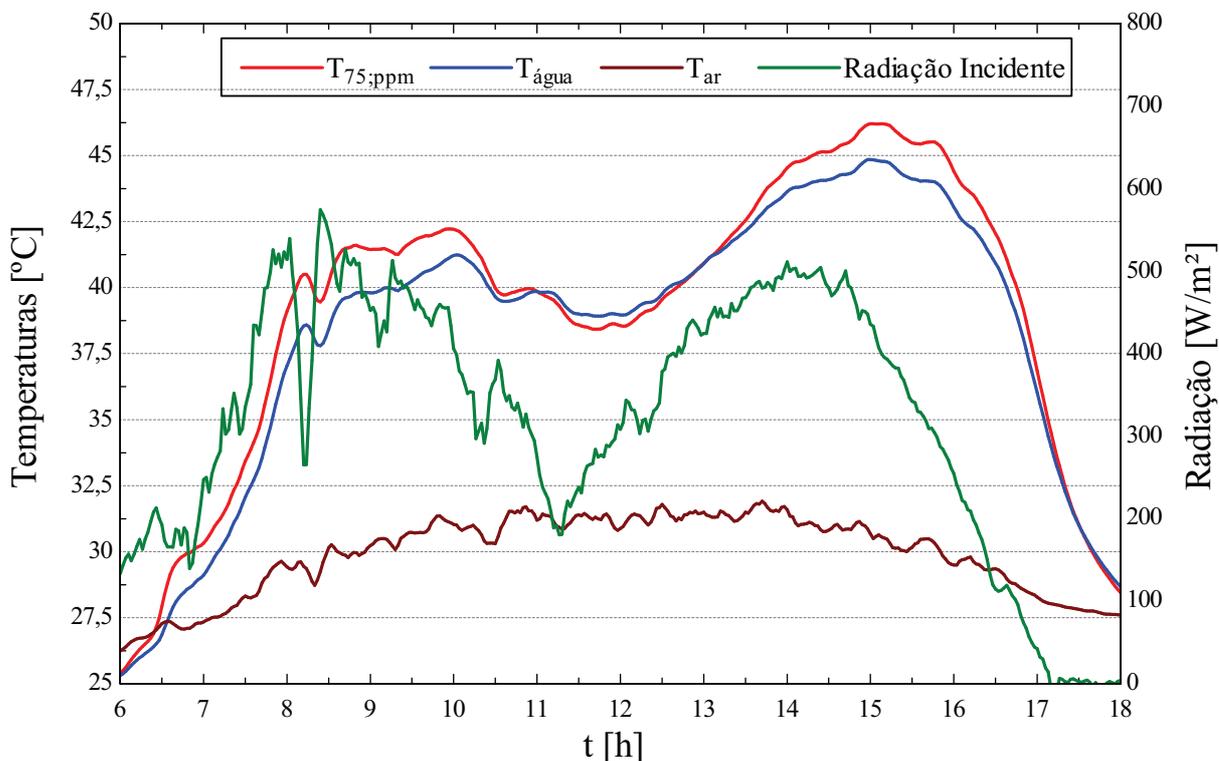
O primeiro pico nas temperaturas do nanofluido teve os seguintes valores: 41,1 °C (12,5 ppm), 43,1 °C (25 ppm), 43,7 °C (50 ppm) e 42,2 °C (75 ppm), enquanto que o pico nas temperaturas da água deionizada foram 39,6 (12,5 ppm), 42,15 (25 ppm), 42,07 (50 ppm) e 41,2 °C (75 ppm). Esse primeiro pico é explicado pela situação inicial de quase equilíbrio entre as temperaturas do nanofluido, água e ar externo, pois nessa situação as perdas térmicas para o ambiente são pequenas, então, apesar dos baixos valores da radiação incidente, a capacidade de absorver energia pelo sistema é ampliada.



O vale, que é percebido logo após o primeiro pico nas temperaturas, acontece principalmente por duas razões: a primeira diz respeito à posição do sol em relação à parede solar. Por se tratar de um aparato fixo e sendo dias de céu claro, ou seja, onde há uma predominância da radiação direta, conforme a posição do sol se aproxima do zênite da parede solar, a incidência desta radiação sobre as células de teste diminui, conseqüentemente as temperaturas tendem a cair. A segunda razão para a queda na temperatura é que, nesse momento do dia, há um alto gradiente entre as temperaturas do nanofluido e da água com o ar, variando em torno de 12 °C.

Portanto, essa situação acaba resultando em maiores perdas de calor para o ambiente, como pode ser visto no tópico 5.3 que possui uma abordagem dos fenômenos de transferência de calor e das perdas térmicas na parede solar.

Gráfico 4 – Temperatura e radiação – 75 ppm-água deionizada – 04-11-2018



Fonte: Elaborado pelo autor

No entanto, com o decorrer do tempo e a mudança na posição do sol em relação a parede solar, agora favorecendo a entrada de energia no sistema, as temperaturas do nanofluido e da água voltam a subir e ocorre um novo pico nas curvas de temperatura.

A segunda observação que pode ser feita é que, durante o decorrer do tempo de experimento, os valores entre as temperaturas do nanofluido e da água são bem próximos, independentemente da concentração de nanopartículas, não diferindo mais do que em 2,5 °C. Comportamento bem diferente, principalmente no perfil de temperatura da água deionizada, se comparado a trabalhos experimentais similares, como por exemplo, o de Bandarra Filho *et al.* (2014). Todavia, há algumas razões que explicam essas diferenças.

Primeiramente, a natureza das nanopartículas deste trabalho, por se tratar de um óxido, possuem uma condutividade térmica bem menor se comparadas, por exemplo, às nanopartículas de metais como a prata ou o ouro.

Outra questão que explica esse comportamento é a baixa absorção de radiação pelas nanopartículas de dióxido de titânio no espectro de comprimento de onda compreendido entre o ultravioleta e o infravermelho, como visto em Ahmad *et al* (2017) e Said *et al.* (2014). Em metais, como a prata e ouro, por exemplo, essa faixa de comprimento de onda é a que proporciona a maior absorção, como explicado por Liz-Marzán (2006).

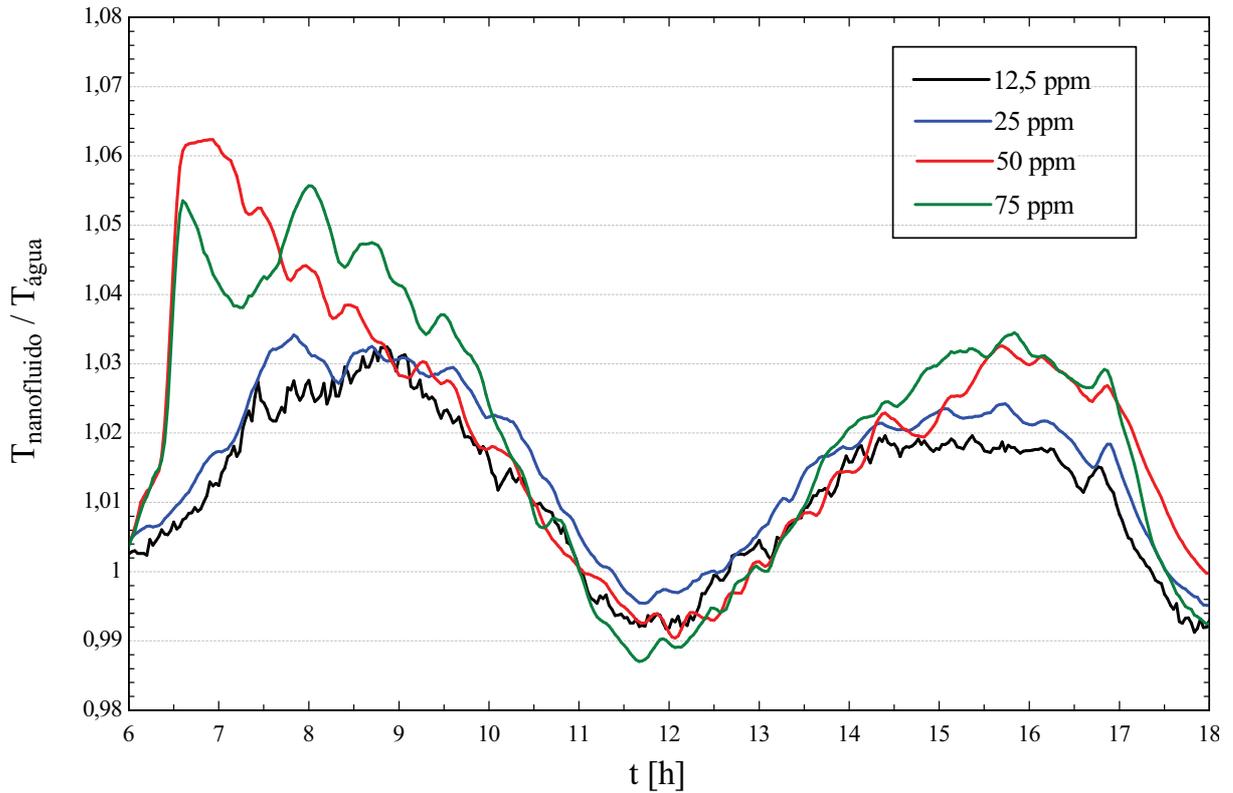
Outro ponto que serve para explicar as diferenças no gradiente das temperaturas do nanofluido e da água deionizada, está no material utilizado para armazenamento dos fluidos, bem como nas suas dimensões. O vidro, material utilizado aqui, possui coeficientes de condutividade térmica e difusividade térmica da ordem de quatro vezes maior que as do acrílico, material utilizado no trabalho em comparação, ou seja, a inércia térmica do vidro em relação ao acrílico é menor, conseqüentemente a taxa de transferência de calor entre o vidro e os fluidos armazenados é maior. Além disso, a espessura de 8 milímetros das placas de vidro utilizadas neste trabalho é praticamente metade da espessura das placas de acrílico (15 mm), o que também contribui para acelerar o aquecimento da água.

A terceira observação a ser feita é a de que a concentração de 50 ppm foi a que alcançou a maior temperatura, com um valor de aproximadamente 47,2 °C, como é possível observar no gráfico 3. Contudo, é possível notar que a temperatura da água deionizada alcançou um valor de 45,1 °C, que é maior, por exemplo que as temperaturas alcançadas pelas concentrações de nanofluidos de 12,5 ppm (gráfico 1) e 25 ppm (gráfico 2), portanto, não é possível avaliar qual a concentração de nanopartículas apresenta melhor rendimento, somente por essa análise.

Pelo Gráfico 5, que compara percentualmente a variação na temperatura do nanofluido sobre a da água deionizada, nos respectivos dias de testes, torna-se mais perceptível observar a melhora da concentração de 50 ppm em relação às demais na primeira hora, chegando a um valor de 6,2% em relação ao aumento na temperatura da água, enquanto que a partir do tempo de 3 horas de experimento, as curvas tendem a localizar-se na mesma faixa percentual, com uma diferença menor do que 1% entre as concentrações.

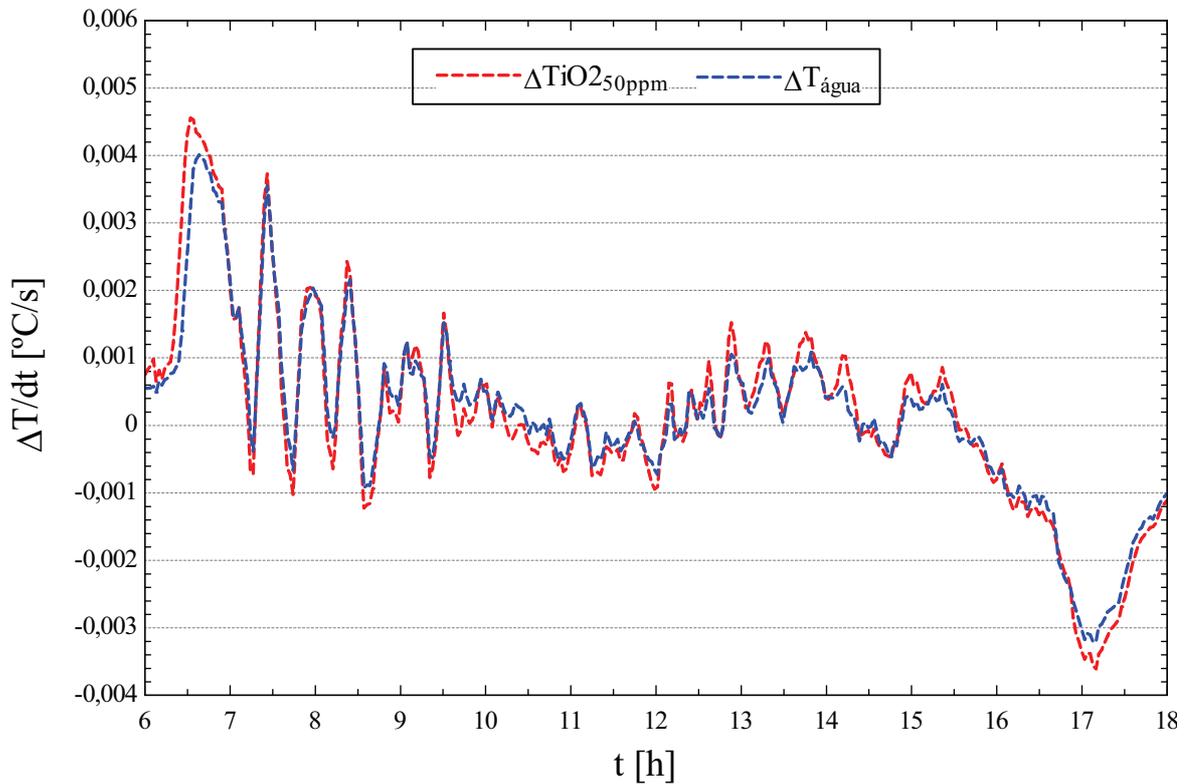
A quarta observação que pode ser feita a partir do Gráfico 5 é que conforme aumentou-se a concentração de nanopartículas no fluido base de 12,5 ppm para 25 ppm e de 25 ppm para 50 ppm, o rendimento em relação água melhora na primeira hora, mas o mesmo não ocorre quando elevou-se de 75 ppm para 50 ppm. Possivelmente isso ocorre pelo fato da coloração esbranquiçada do nanofluido, que se torna mais opaco e, devido à uma tonalidade mais forte, esteja refletindo uma maior parcela da radiação solar ao invés de absorvê-la.

Gráfico 5 – Rendimento do nanofluido em relação à água deionizada – céu claro.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 6 – Variação transiente das temperaturas – céu claro – 26-10-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

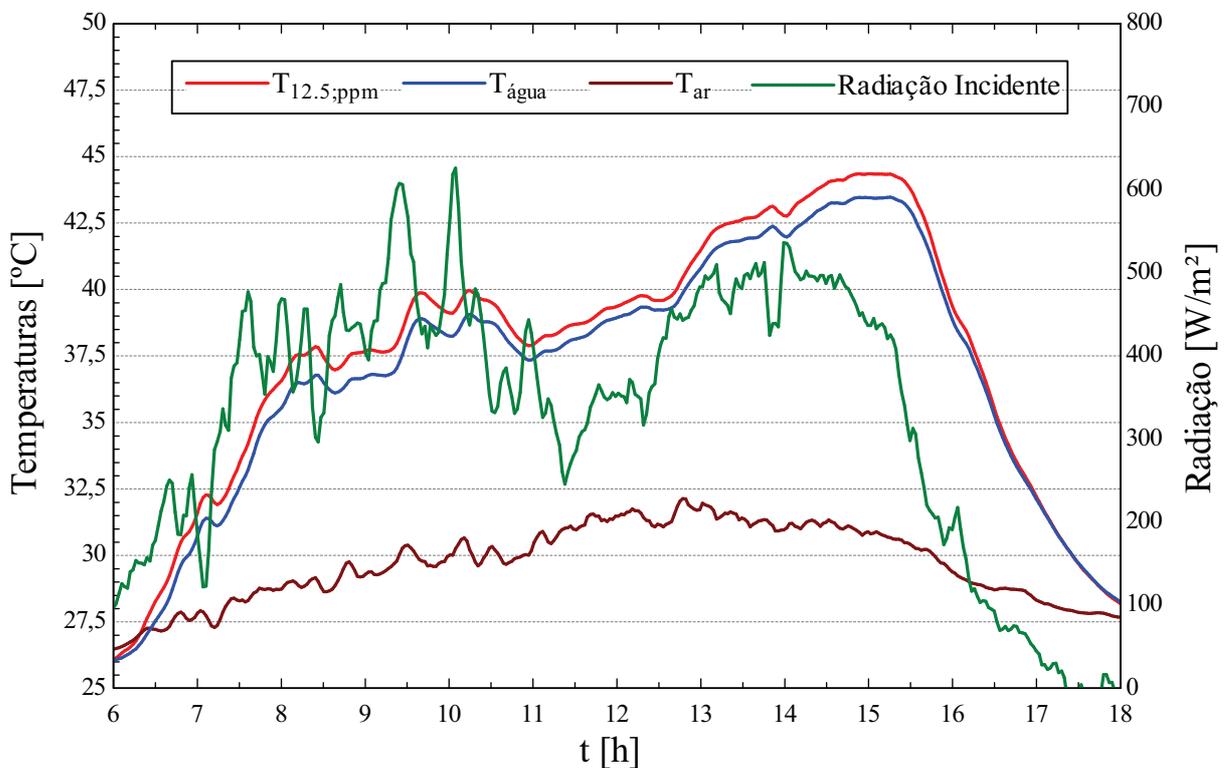
Com o gráfico 6 que traz as variações transientes das temperaturas, no dia 26 de outubro de 2018, em função do tempo, fica mais nítido o comportamento inicial do maior ganho de energia nas células de teste do nanofluido em relação à água, evidenciando o pico nas temperaturas.

Pode-se observar ainda as curvas das concentrações dos nanofluidos acima das da água na primeira hora e, depois deste período, as curvas se confundem na maior parte do tempo, crescendo e decrescendo, o que evidencia o aumento nas perdas de energia para o ambiente pelo maior gradiente entre as temperaturas dos fluidos e do ar ambiente. Além disso, é possível perceber o comportamento mais irregular das curvas nas primeiras 3 horas (10800 segundos), deixando claro que a maior variação nas temperaturas dos fluidos ocorre nesse período inicial.

5.2 Testes em dias de céu nublado

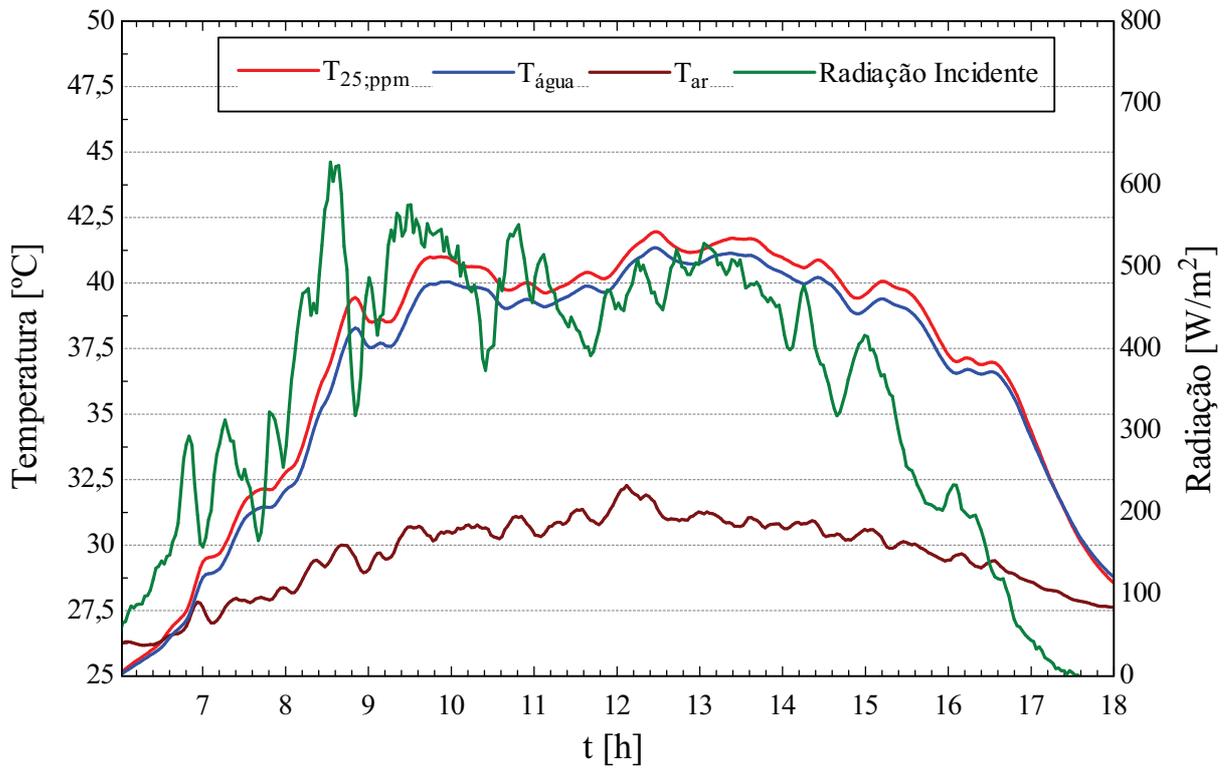
Para a condição de céu nublado foi feita a análise dos seguintes dias com as respectivas concentrações volumétricas: 21 de outubro de 2018 (50 ppm), 31 de outubro de 2018 (75 ppm), 12 de novembro de 2018 (25 ppm) e 04 de dezembro de 2018 (12,5 ppm).

Gráfico 7 – Temperatura e radiação – 12,5 ppm-água deionizada – 04-12-2018.



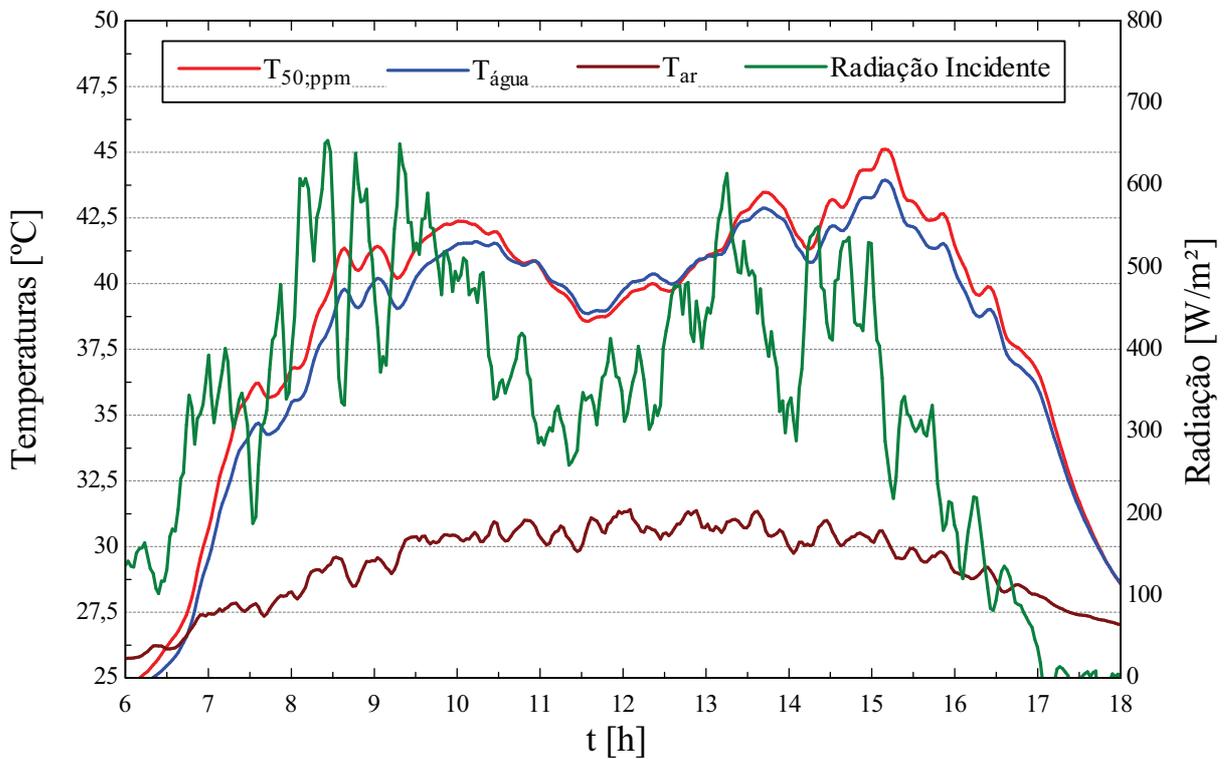
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 8 – Temperatura e radiação – 25 ppm-água deionizada – 12-11-2018.



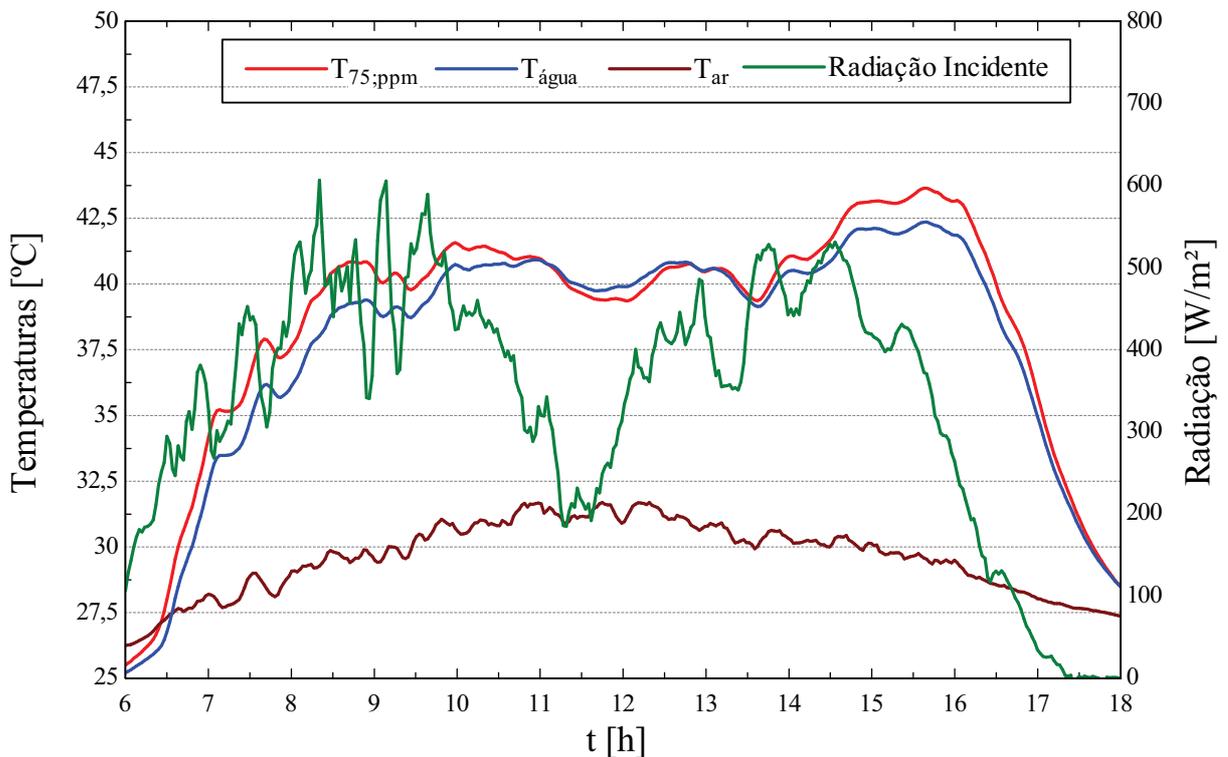
Fonte: Elaborado pelo autor

Gráfico 9 – Temperatura e radiação – 50 ppm-água deionizada – 21-10-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Gráfico 10 – Temperatura e radiação – 75 ppm-água deionizada – 31-10-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

Analisando o comportamento dos perfis de temperatura nos Gráficos 7, 8, 9 e 10, é possível inferir que, diferentemente dos dias de céu claro, agora os perfis não apresentam os picos e o vale entre eles, mantendo um comportamento com menos oscilações após as primeiras horas de teste.

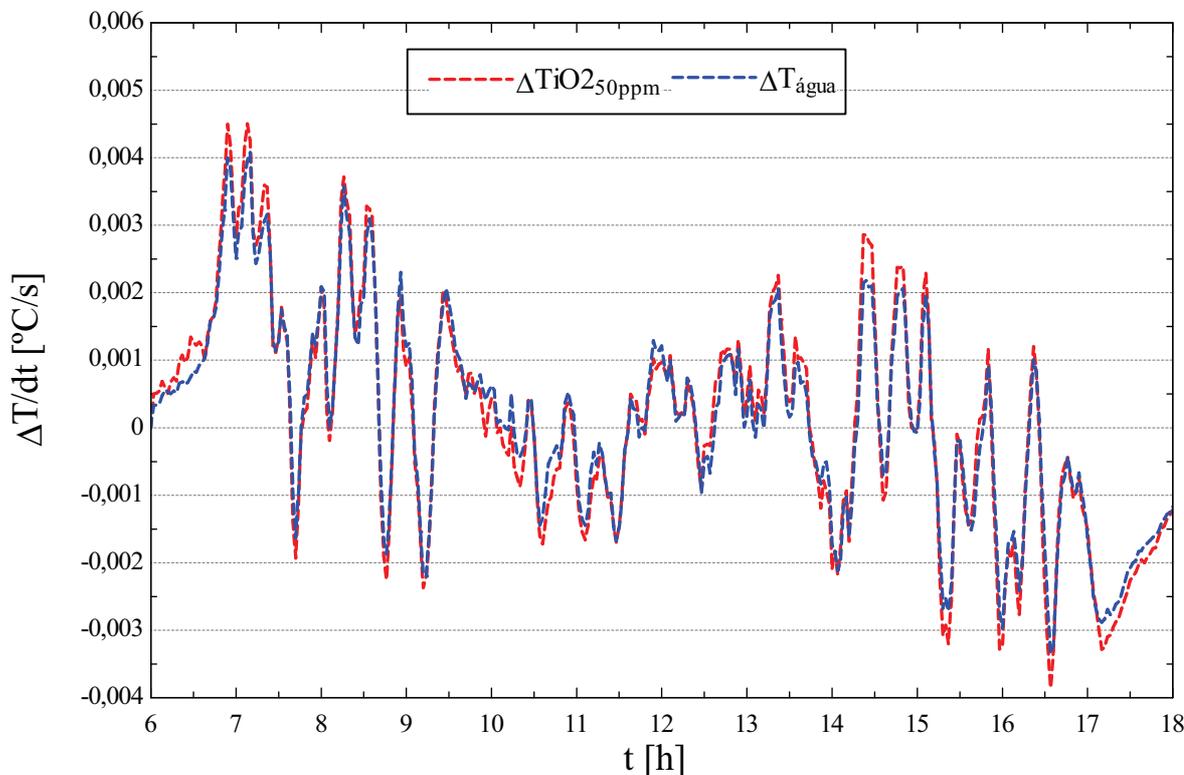
Uma das explicações para esse comportamento é que há predominância de radiação difusa e esta, por sua vez, não é direcionada pelo ângulo de incidência solar (θ), portanto, como os valores da parcela de radiação predominante mantendo-se constantes, as curvas nas temperaturas do nanofluido e da água deionizada acompanham esse mesmo comportamento.

Outra afirmação que pode ser feita, após análise dos dias de céu claro e de céu nublado, é que as temperaturas do nanofluido e da água deionizada se elevam de forma semelhante nas primeiras horas, independentemente das condições de céu e mesmo com baixos valores de radiação. Além disso, pode-se reafirmar que as maiores variações de temperatura ocorrem no período inicial e no período final de testes.

As justificativas para esse comportamento são aquelas já discutidas anteriormente, como o baixo índice inicial e final de perdas térmicas, pela situação de quase equilíbrio térmico com o ar ambiente no período inicial de testes, as altas condutividade e difusividade térmica da cobertura de vidro e a queda brusca na radiação, que é a fonte de entrada de energia no sistema,

ao final do dia. O Gráfico 11 que traz a variação transiente das temperaturas para a concentração de 50 ppm no dia 21 de outubro de 2018, exemplifica e corrobora com as afirmações anteriores.

Gráfico 11 – Variação transiente das temperaturas – céu nublado – 21-10-2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

5.3 Perda Térmica

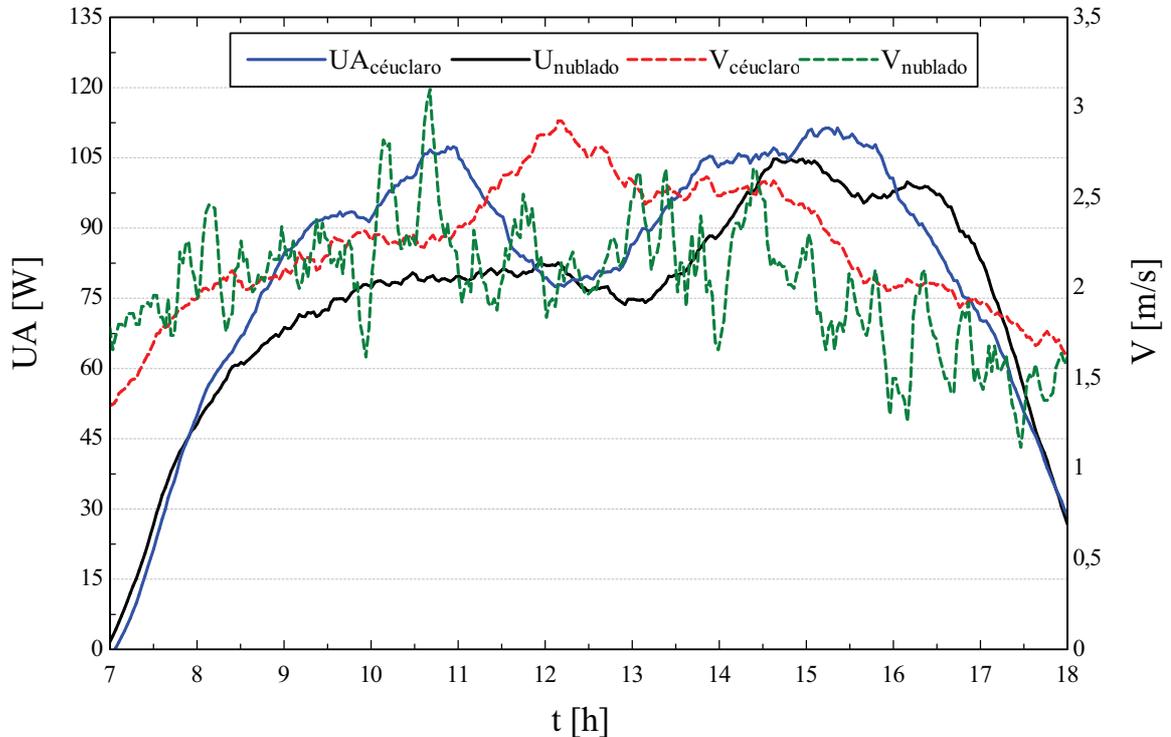
A partir do balanço de energia é possível inferir algumas observações no que diz respeito aos processos de transferência de calor que governam o sistema. O Gráfico 12 mostra a perda de energia térmica (UA) e a velocidade do vento (V) na célula da água nos dias 21 e 26 de outubro de 2018, isto é, dia de céu nublado e céu claro, respectivamente.

Pode-se perceber que, com exceção do período próximo e adjacente a meio-dia, o comportamento das curvas que descrevem as perdas é bem similar. Como era de se esperar, as perdas aumentam conforme a diferença entre a temperatura da água com o ar externo se distancia, decrescendo ao final do dia com a queda da radiação incidente e, conseqüentemente, a queda nas temperaturas da água.

Como visto nas Figura 32 e 33, o circuito de resistências térmicas é simétrico, isto é, a consideração feita é a de que os dois lados da célula de testes possuem as mesmas resistências térmicas, da superfície externa da cobertura de vidro até o centro da coluna de fluido

(água, neste caso). Até por isso, para ilustrar os fenômenos de convecção, condução e radiação, foi escolhido apenas um lado das resistências térmicas, haja visto que o outro é idêntico.

Gráfico 12 – Perda térmica para água em céu claro e céu nublado



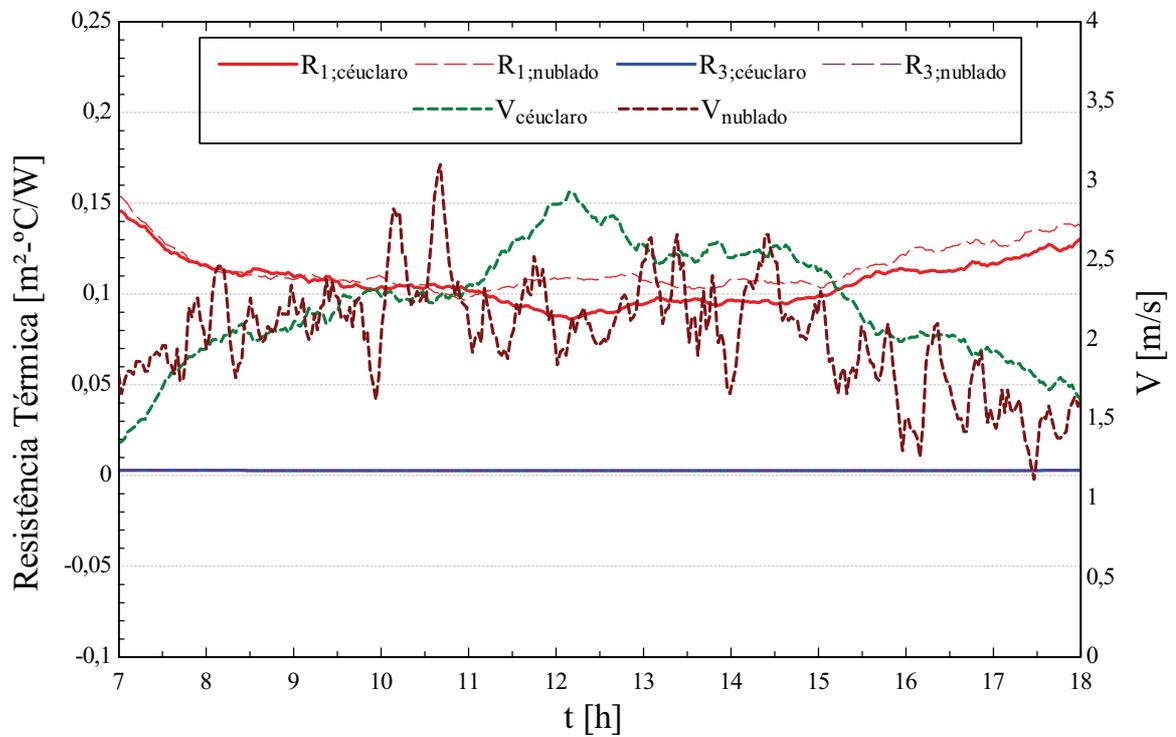
Fonte: Elaborado pelo autor.

O Gráfico 13 mostra as resistências térmicas para os dias de céu nublado e céu claro de 21 e 26 de outubro de 2018 da célula de teste contendo água deionizada. Fica perceptível que a primeira resistência térmica R_1 é a responsável por governar o processo de perda de energia no sistema, em ambas as condições de céu. Como visto no balanço de energia em 4.5, esta resistência contempla as perdas por convecção e radiação entre a superfície da cobertura de vidro e o ar externo. Como o coeficiente de transferência de calor por convecção é bem maior que o de radiação na R_1 (Gráfico 15), pode-se dizer que a transferência de calor por convecção é a dominante e, assim sendo, acrescentar que as variações na velocidade do vento são diretamente responsáveis por este fenômeno.

A baixa resistência térmica R_3 , que contempla as perdas por condução e radiação entre a cobertura de vidro e o fluido armazenado, dá-se pelas pequenas espessuras em contraste com as altas condutividades térmicas da camada de fluido e do vidro, acarretando num alto coeficiente de transferência de calor por condução que resulta numa baixa resistência térmica,

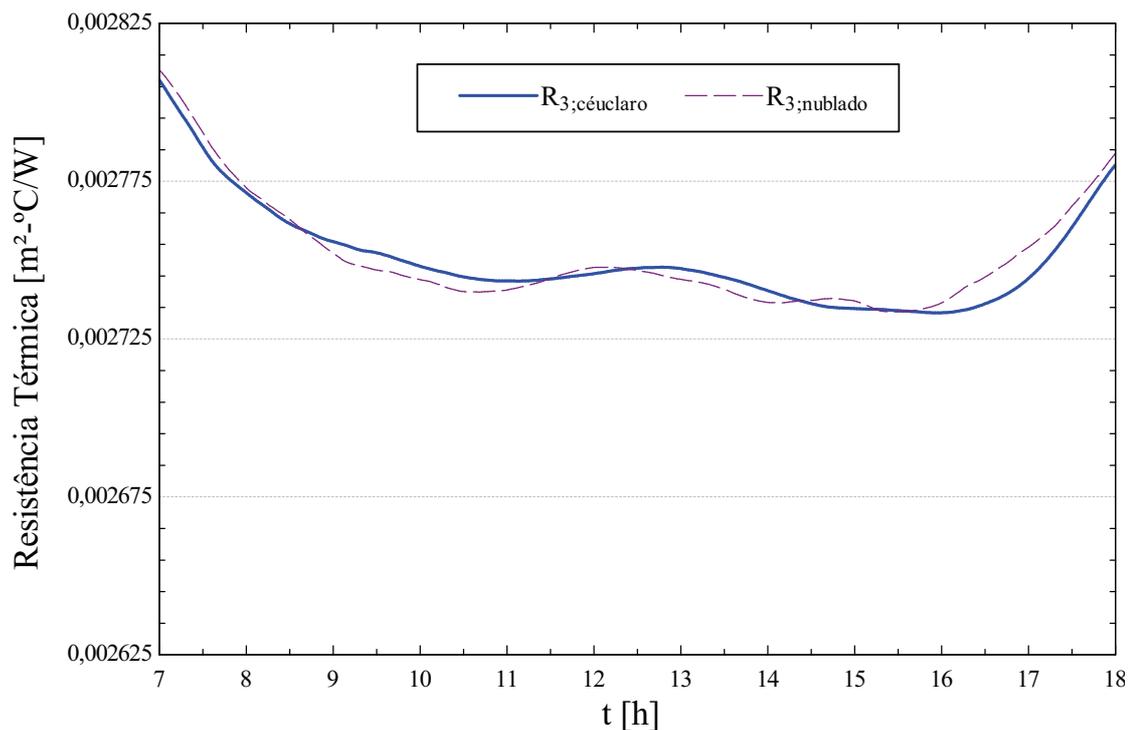
haja visto que o inverso de um número grande é um número muito pequeno. No gráfico 14 fica mais nítida a sua pequena variação durante o período observado.

Gráfico 13 – Resistências Térmicas na célula inferior



Fonte: Elaborado pelo autor

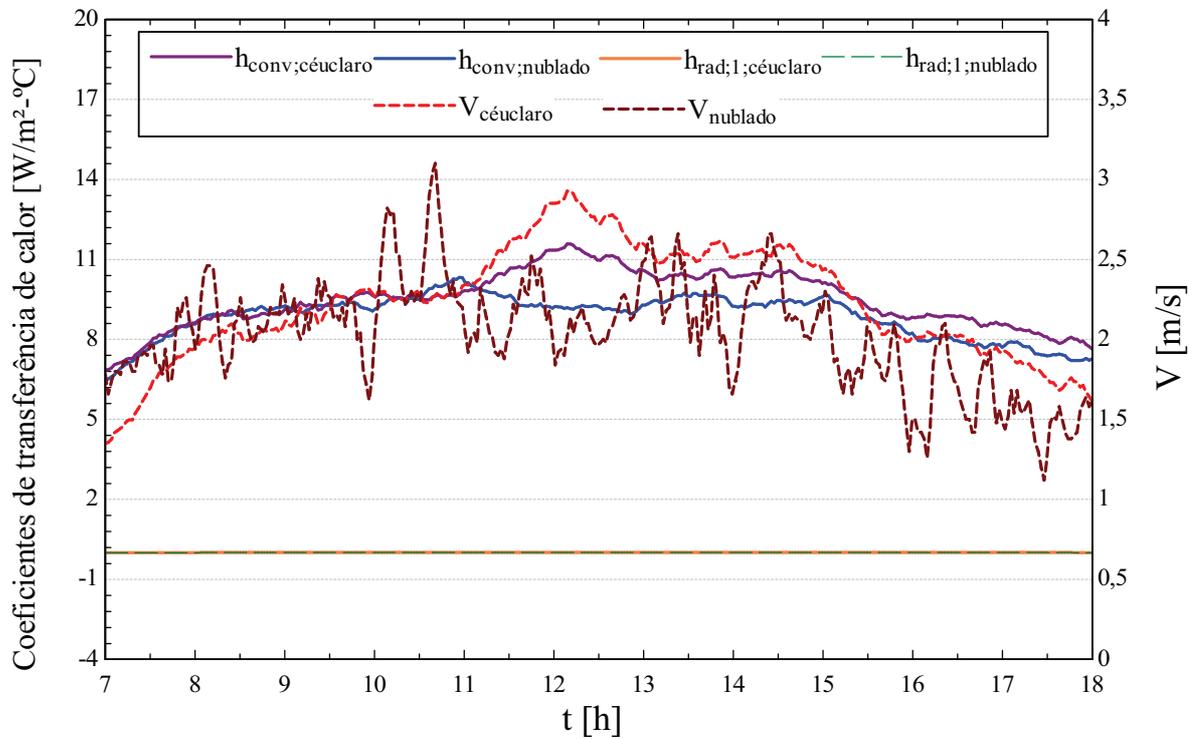
Gráfico 14 – Resistência Térmica 3



Fonte: Elaborado pelo autor

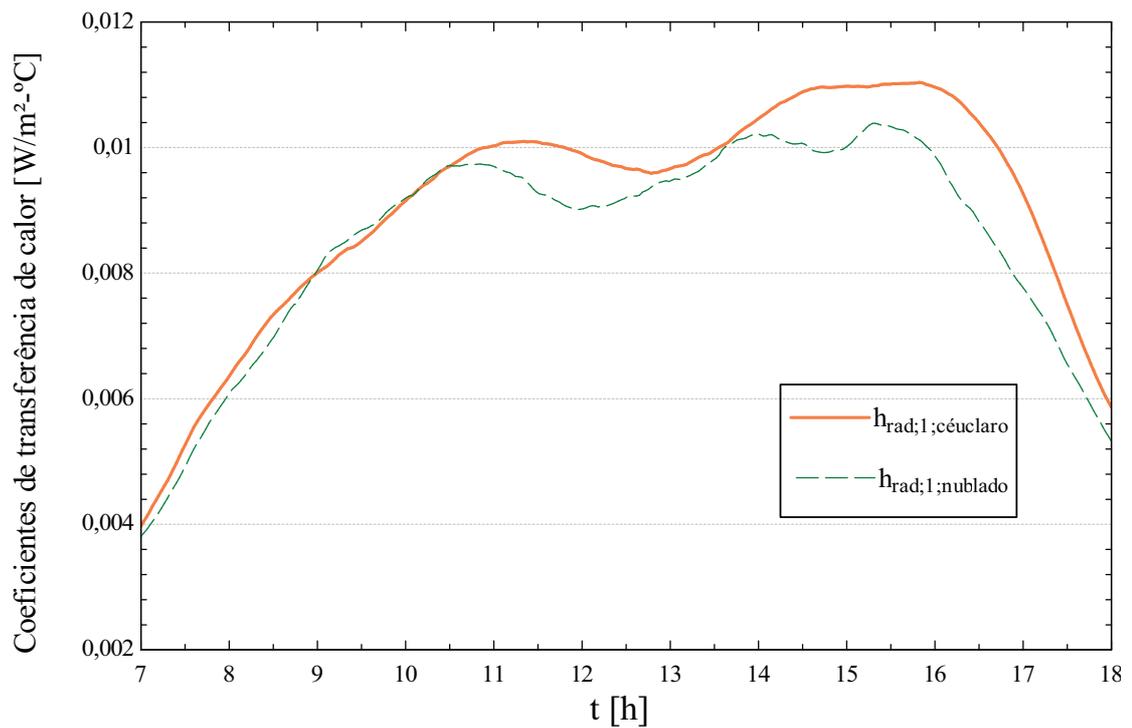
O gráfico 15 que mostra os coeficientes de transferência de calor da primeira resistência térmica R_1 .

Gráfico 15 – Coeficientes de transferência de calor de R_1



Fonte: Elaborado pelo autor

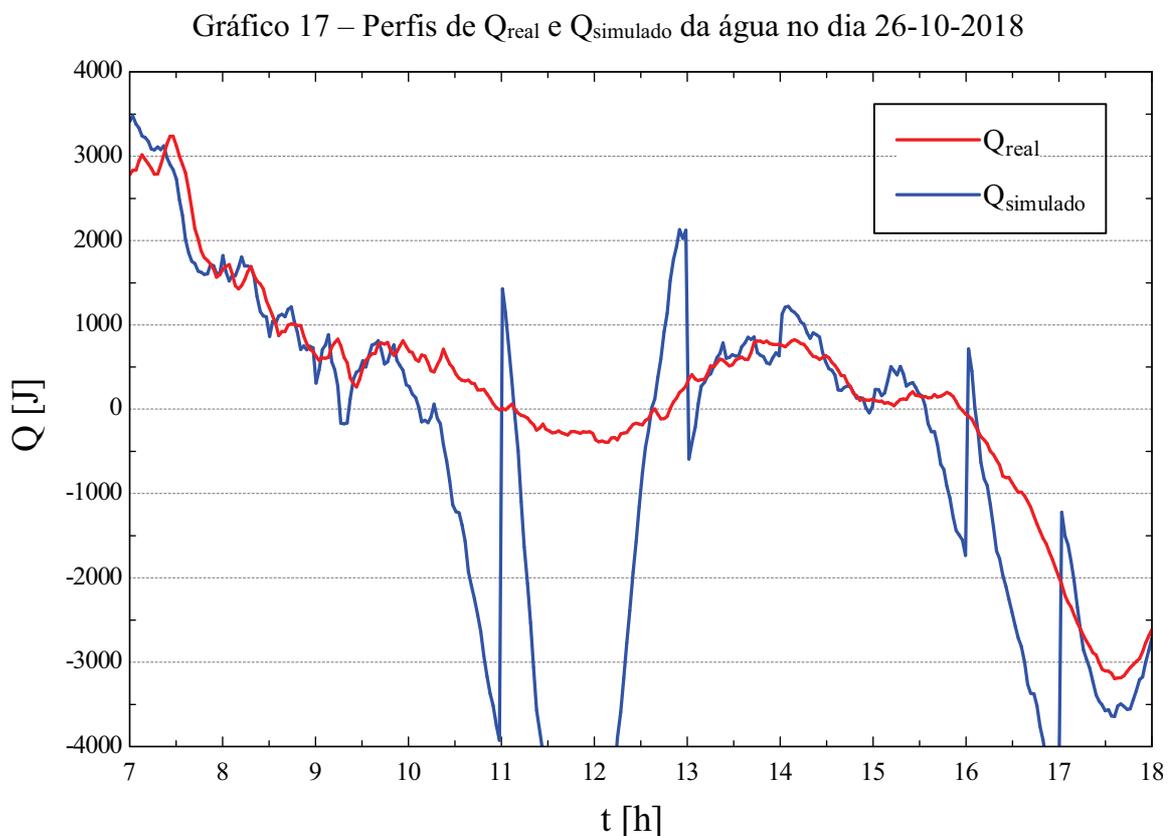
Gráfico 16 – Coeficientes de transferência de calor por radiação em R_1



Fonte: Elaborado pelo autor

5.4 Propriedades ópticas obtidas a partir da Busca Harmônica

O gráfico 17 traz os perfis de energia na parede solar em forma de calor, obtidos pela variação de entalpia do sistema (Equação 15) e pelo calor simulado com a obtenção dos valores de absorvidade (α) nas três parcelas de radiação e albedo do solo (ρ_{solo}) pelo método meta-heurístico da Busca Harmônica, utilizando as equações desenvolvidas no balanço de energia da seção 4.5. Os valores mostrados no gráfico 17 são para a célula de teste inferior, contendo apenas água, no dia 26 de outubro de 2018.



Fonte: Elaborado pelo autor.

É possível perceber visualmente que há um comportamento similar entre as curvas na maior parte do tempo, tendo, contudo, uma grande defasagem entre o valor medido pela variação de entalpia (Q_{real}) e o simulado (Q_{simulado}), quando os valores do Q_{real} se encontram em um intervalo próximo de zero. Esse comportamento coincide com valores de baixa radiação incidente na célula de testes e de alta perda térmica, como já observado nos Gráficos 3 e 12, respectivamente, evidenciando que o método computacional utilizado não replica o comportamento real da variação de entalpia sob as condições especificamente citadas.

A Tabela 4 traz os valores da Correlação de Pearson entre o Q_{real} e o Q_{simulado} , intervalados de hora em hora, e o valor da correlação geral, isto é, levando em conta os valores do início ao final da observação experimental. Por conta da média móvel de 01 hora nos valores radiação no balanço de energia, essa análise inicia-se a partir das 07 horas da manhã.

Tabela 4 – R de Pearson entre Q_{real} e Q_{simulado} da água em 26-10-2018

Período (h)	R de Pearson	R de Pearson Geral
07-08	0,83	
08-09	0,86	
09-10	0,15	
10-11	0,95	
11-12	0,97	
12-13	0,93	0,73
13-14	0,66	
14-15	0,94	
15-16	0,87	
16-17	0,98	
17-18	0,98	

Fonte: Elaborado pelo autor.

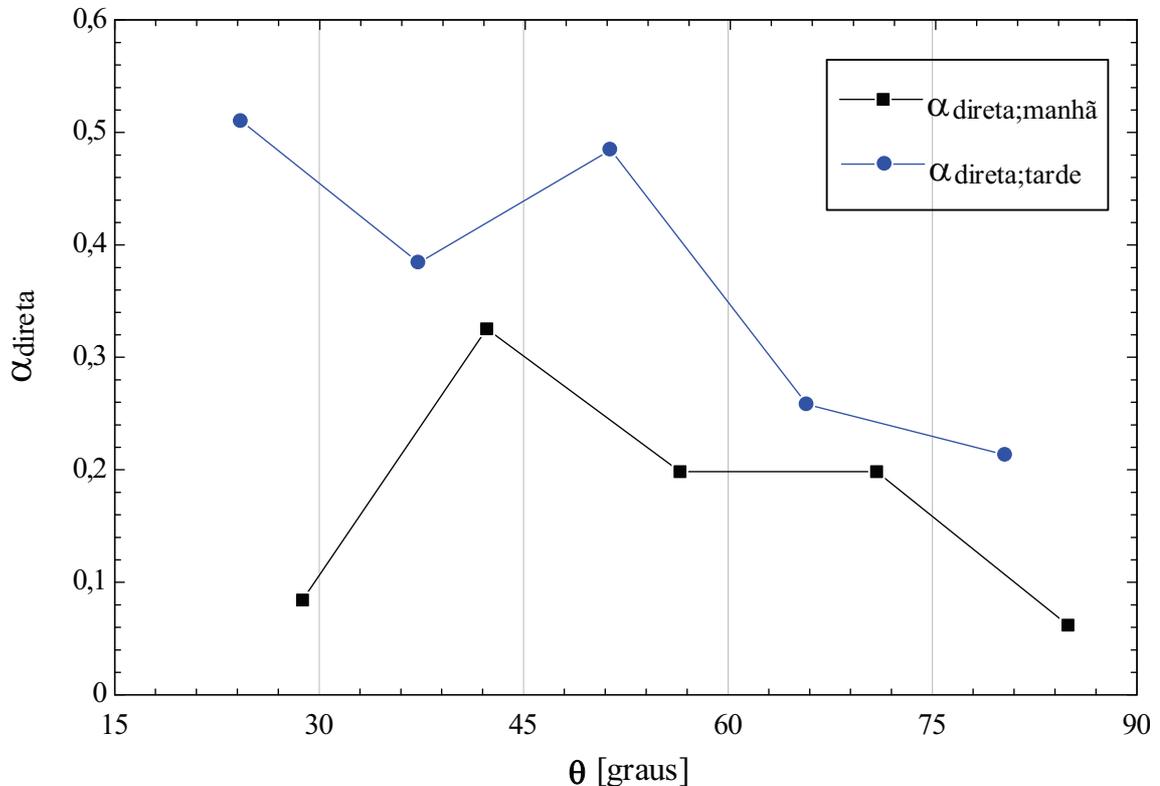
Tomando como ponto de discussão a interpretação estatística do coeficiente de correlação de Pearson, pode-se dizer que os valores de Q_{real} e Q_{simulado} possuem uma forte correlação positiva na maior parte do tempo experimental observado, podendo ser corroborado pelo valor de 0,73 na correlação geral entre eles.

Como dito anteriormente, a parcela de radiação direta que recai sobre a parede solar é direcionada pelo ângulo de incidência solar (θ). Devido à posição vertical da parede solar, o valor de (θ) no período experimental observado varia de 15 até aproximadamente 90 graus, quando atinge o meio-dia solar, e depois decresce seu valor na mesma ordem, entre 90 e 15 graus até às 18:00 horas, aproximadamente.

Com o intuito de analisar algum grau de dependência entre a posição do (θ) e a absorvidade relacionada à parcela de radiação direta (α_{direta}), o Gráfico 18 foi gerado com essas

duas variáveis, dividindo a absorvidade em dois períodos: $\alpha_{\text{direta;manhã}}$ entre o início do teste até atingir o meio-dia solar, e $\alpha_{\text{direta;tarde}}$ do meio-dia solar até o encerramento às 18:00 horas.

Gráfico 18 – α_{direta} em função de θ para água em 26-10-2018



Fonte: Elaborado pelo autor.

Observando o comportamento da absorvidade da água nos dois períodos estabelecidos, percebe-se que ele é semelhante para altos valores do ângulo de incidência solar, na faixa compreendida entre 45° e 75° , que também coincidem com altos valores de radiação incidente.

Por outro lado, quando o θ encontra-se abaixo dos 45° e na proximidade com o ângulo de 90° , o comportamento e o valor da absorvidade foram discrepantes entre o período da manhã (0,084) e da tarde (0,51). Isso é mais um indicativo de que o balanço de energia com o método heurístico empregado não calibram de maneira satisfatória os valores sob condições de baixa radiação.

Outra observação é a de que os valores da α_{direta} estiveram na maior parte do período observado abaixo de 0,5. Esse valor está em concordância com o que pode ser percebido visualmente na parede solar, tendo em vista que a água é um meio transparente sob as condições analisadas, portanto esses baixos valores estão em acordo com a quantidade de radiação solar que foi absorvida.

Uma consideração importante a ser feita é que estudos como os de Klein (1979) mostram que o ângulo de incidência solar é afetado por vários fatores como: a latitude local, meses do ano, azimute da superfície, inclinação do objeto exposto à radiação, portanto, vale destacar que esses valores relacionados no Gráfico 18 são para uma situação e condições específicas.

A Tabela 5 mostra os valores das propriedades ópticas de absortividade para as três parcelas de radiação e do albedo do solo, obtidos através da implementação do método meta-heurístico da Busca Harmônica.

Tabela 5 – Valores simulados das absortividades e albedo do solo

Período (h)	α_{direta}	α_{difusa}	$\alpha_{\text{refletida}}$	ρ_{solo}
07-08	0,084	0,53	0,56	0,045
08-09	0,325	0,28	0,17	0,043
09-10	0,198	0,064	0,519	0,26
10-11	0,198	0,064	0,519	0,26
11-12	0,062	0,862	0,511	0,284
12-13	0,213	0,902	0,457	0,187
13-14	0,258	0,504	0,39	0,177
14-15	0,484	0,278	0,174	0,038
15-16	0,384	0,897	0,177	0,027
16-17	0,51	0,884	0,157	0,195
17-18	0,926	0,997	0,840	0,327

Fonte: Elaborado pelo autor.

Como os ângulos de incidência de radiação difusa e refletida na parede solar são fixos, as variações que ocorrem nos valores de α_{difusa} e $\alpha_{\text{refletida}}$ derivam, possivelmente, das condições momentâneas do céu, como a interferência por passagem de nuvens, ou algum outro ente que pode ter modificado as condições climáticas locais em determinados momentos.

Quanto ao ρ_{solo} , a discrepância entre alguns valores pode estar relacionada com a formação do solo que circunda a parede solar. Ela encontra-se fixa sob cimento, sujeito às intempéries há bastante tempo. Além disso, está rodeada de vegetação que é uma composição distinta do cimento.

6. CONCLUSÃO

Este trabalho estudou o funcionamento de um aparato experimental, nomeado de parede solar, contendo duas células de testes. Ele serviu como reservatório para análise e comparação no que diz respeito ao perfil de temperatura entre a água e quatro concentrações distintas de nanopartículas de dióxido de titânio dispersas em água em dias de céu claro e nublado. Concomitantemente, os processos de transferência de calor atuantes na parede solar foram analisados com o método meta-heurístico da Busca Harmônica, sendo implementado para simular as propriedades ópticas de absorvidade e albedo do solo, envolvidas no processo de variação de energia térmica. Com isso, as seguintes conclusões e sugestões podem ser pontuadas:

A água e o nanofluido possuem um perfil de temperatura similar e as temperaturas entre eles mantiveram-se próximas durante todo o período observado, com a maior diferença observada não sendo de 2,5 °C. Isso ocorreu devido ao baixo índice de absorção de radiação no espectro visível pelas nanopartículas de dióxido de titânio, além da alta difusividade térmica do vidro. Para trabalhos futuros, uma sugestão seria fazer o teste com nanofluidos de partículas metálicas com alta absorção de radiação no espectro visível, como a prata e o cobre.

A maior diferença percentual entre as temperaturas dos nanofluidos e da água ocorre nas primeiras horas de teste, com a concentração de 50 ppm atingindo o maior valor, de aproximadamente 6%, dentre as quatro concentrações analisadas. A maior temperatura obtida foi de 47,2 °C, também com o nanofluido na concentração de 50 ppm.

Em dias de céu claro os perfis de temperatura possuem nitidamente dois picos e um vale, este último ocorre no período próximo ao meio-dia, devido a posição do sol, acarretando em uma menor incidência de radiação direta, justamente no período onde a radiação global encontra-se com os maiores valores. Em dias de céu nublado esse valor não foi observado, devido a predominância de radiação difusa.

No que diz respeito as perdas térmicas, o balanço de energia mostrou que o processo de transferência de calor governante é a convecção entre o ar externo e a superfície das coberturas de vidro. A inserção de uma segunda cobertura de vidro na parede solar pode ser uma forma de minimizar esses efeitos em pesquisas futuras.

Um índice de correlação de Pearson de 0,73 foi encontrado entre os valores medidos para a variação de energia interna e os simulados pelo método meta-heurístico da Busca Harmônica. Contudo, sob condições de baixa radiação incidente e altas perdas térmicas o método não apresenta valores de energia térmica condizentes com a realidade.

A absorptividade da água pela parcela de radiação direta, obtida pela Busca Harmônica, mostra uma tendência de comportamento semelhante, para a manhã e à tarde, quando o ângulo de incidência solar se encontra na faixa de 45° a 75° . O comportamento das outras variáveis encontradas na simulação pode ser explicado pelas condições momentâneas do céu, como passagem de nuvens para o caso das absorptividades, e pela topografia sujeita às intempéries para o caso do albedo do solo. A implementação de outros modelos heurísticos e uma análise mais profunda sobre o balanço de energia pode ser uma estratégia para buscar soluções mais verossímeis.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, R.; VERMA, K.; AGRAWAL, N. K.; DUCHANIYA, R. K., SINGH, R. Synthesis, characterization, thermal conductivity and sensitivity of CuO nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, v. 102, p. 1024-1036, 2016.
- AHMAD, S. H. A.; SAIDUR, R.; MAHBUBUL, I. M.; AL-SULAIMAN, F. A. Optical properties of various nanofluids used in solar collector: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 73, p. 1014-1030, 2017.
- AKOH, H.; TSUKASAKI, Y.; YATSUYA, S.; TASAKI, A. Magnetic properties of ferromagnetic ultrafine particles prepared by vacuum evaporation on running oil substrate. **Journal of Crystal Growth**, v. 45, n. 9-13, p. 495-500, 1978.
- AMJAD, M.; JIN, H.; DU, X.; WEN, D. Experimental Photothermal performance of nanofluids under concentrated solar flux. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 182, p. 255-262, 2018.
- ANGAYARKANNI, A.; PHILIP, J. Effect of Nanoparticles Aggregation on Thermal and Electric Conductivities of Nanofluids. **Journal of Nanofluids**, v. 03, p. 17-25, 2014.
- ASKARZADEH, A.; ZEBARJADI, M. Wind power modeling using harmony search with a novel parameter setting approach. **Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics**, v. 135, p. 70–75, 2014.
- BANDARRA FILHO, E. P.; WEN, D. S. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. **Energy Conversion and Management**, v. 84, n. 1, p. 261-267, 2014.
- BARBES, B.; PÁRAMO, R.; BLANCO, E.; CASANOVA, C. Thermal conductivity and specific heat capacity measurements of CuO nanofluids. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, v. 115, p. 1883-1891, 2014
- BATCHELOR, G. K. The effect of Brownian motion on the bulk stress in a suspension of spherical particles. **J. Fluid Mech.**, v. 83, n. 1, p. 97-117, 1977.
- BORZOGAN, N.; SHAFABI, M. Performance evaluation of nanofluids in solar energy: a review of recent literature. **Micro and Nano Systems Letters**, v. 3, n. 5, p. 1-15, 2015.
- BRANDMUEHL, M. J.; BECKMAN, W. A. Transmission of Diffuse Radiation through CPC and Flat-Plate Collector Glazing's. **Solar Energy**, 24, 511, 1980.
- BRINKMAN, H. C. The Viscosity of Concentrated Suspensions and Solutions. **Journal of Chemical Physics**, v. 20, n. 04, p. 571, Abril 1952.
- BUONOMO, B.; MANCA, O.; MARINELLI, L.; NARDINI, S. Effect of temperature and sonication time on nanofluid thermal conductivity measurements by nano-flash method. **Applied Thermal Engineering**, v. 91, p. 181-190, 2015.

- CAMPOS, E.R.V. **Modelagem do uso de nanofluidos no sistema de arrefecimento dos motores de combustão interna**. 2009. 97f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), PUC-RJ, Rio de Janeiro.
- CHOI, S. U. S.; EASTMAN, J. A. **Enhanced heat transfer using nanofluids**. U.S. n. 6221275, 2001.
- COHEN, Jacob. **Statistical power analysis for the behavioral sciences**. Hillsdale, NJ, Erlbaum, 1988.
- DANCEY, C.; REIDY, J. **Estatística Sem Matemática para Psicologia: Usando SPSS para Windows**. Porto Alegre, Artmed, 2006.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. 4. ed., John Wiley & Sons, 2013.
- ELSHEIKH, A. H.; SHARSHIR, S. W.; MOSTAFA, M. E.; ESSA, F. A.; ALI, M. K. A. Applications of nanofluids in solar energy: A review of recent advances. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 82, n. 3, p. 3483-3502, Fevereiro 2018.
- FAN, J.; WANG, L. Review of Heat Conduction in Nanofluids. **Journal of Heat Transfer**. v. 133, 040801/1-040801/14, 2011.
- FARIQ, A.; KHAN, T.; YASMIN, A. Microbial synthesis of nanoparticles and their potential applications in biomedicine. **Journal of Applied Biomedicine**, v. 15, n. 04, p. 241-248, 2017.
- GEEM, Z. W.; KIM, J. H.; LOGANATHAN, G. A. New heuristic optimization algorithm: Harmony search. **Simulation**, v. 76, n. 2, p. 60-68, 2001.
- GOSWANI, D. G. **Principles of Solar Engineering**. 3. ed., Taylor & Francis Group, 2015.
- HAMILTON, R. L.; CROSSER, O. K. Thermal conductivity of heterogeneous two-component systems. **Ind. Eng. Chem. Fundam.**, v. 01, n. 3, p. 187-191, Agosto 1962.
- INCROPERA, F.P.; DEWITT, D.P.; BERGMAN, T.L.; LAVINE, A.S. **Fundamentos da Transferência de Calor e Massa**. 6. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2011.
- JIN, H.; LIN, G.; BAI, L.; AMJAD, M.; BANDARRA FILHO, E. P.; WEN, D. Photothermal conversion efficiency of nanofluids: An experimental and numerical study. **Solar Energy**. v. 139, p. 278-289, 2016.
- KHEDKAR, R. S.; SONAWANE, S. S.; WASEWAR, K. L. Influence of CuO Nanoparticles in enhancing the thermal conductivity of water and monoethylene glycol based nanofluids. **Interational Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, p. 665-669, 2012.
- KHEDKAR, R. S.; SHRIVASTAVA, N.; SONAWANE, S. S.; WASEWAR, K. L. Experimental investigation and theoretical determination of thermal conductivity and viscosity of TiO₂-ethylene glycol nanofluid. **Interational Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 73, p. 54-61, 2016.

KIM, J. K.; JUNG, J. Y.; KANG, Y. T. Absorption performance enhancement by nanoparticles and chemical surfactants in binary nanofluids. **International Journal of Refrigeration**, v. 30, p. 50-57, 2007.

KLEIN, S. A. Calculation of the Monthly-Average Transmittance-Absorptance Product. **Solar Energy**, v. 23, p. 547-551, 1979.

LEE, S. W.; PARK, S. D.; KANG, S.; BANG, I. C.; KIM, J. H. Investigation of viscosity and thermal conductivity of SiC nanofluids for heat transfer applications. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, v. 54, p. 433-438, 2011.

LI, Y.; ZHOU, J.; TUNG, S.; SCHNEIDER, E.; XI, S. A review on development of nanofluid preparation and characterization. **Powder Technology**, v. 196, n. 02, p. 89-101, 2009.

LIZ-MARZÁN, L. M. Tailoring Surface Plasmons through the Morphology and Assembly of Metal Nanoparticles. **Invited Featured Article**, v. 22, p. 32-41, 2006.

MACÊDO, M. V. S. **Aplicações de algoritmos de otimização heurística à energia eólica: determinação dos parâmetros das curvas de Weibull para duas regiões brasileiras**. 2018, 86 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

MEZIANE, R.; BOUZIDI, Y.; HAMZI, A.; CHÂTELET, E.; BOUFALA, S.; AMARA, M. Wind farm reliability optimization harmony search under performance and budget constraints. **International Renewable and Sustainable Energy Conference**, 978-1-4799-7336 1/14/\$31.00 2014 IEEE

NOGHREHABADI, A. R.; HAJIDAVALOO, E.; MORAVEJ, M. An experimental investigation on the performance of a symmetric conical solar collector using SiO₂/water nanofluid. **Transp. Phenom. Nano Micro Scales**, v. 05, n. 1, p. 23-29, 2016.

OZERINÇ, S.; KAKAÇ, S.; YAZICIOGLU, A. G. Enhanced thermal conductivity of nanofluids: A state-of-the-art review. **Microfluid and Nanofluid**, v. 08, n. 2, p. 145–170, 2010.

PAL, S. L.; JANA, U.; MANNA, P. K.; MOHANTA, G. P.; MANAVALAN, R. Nanoparticle: An overview of preparation and characterization. **Journal of Applied Pharmaceutical Science**, v. 01, n. 6, p. 228-234, 2011.

PALM, S.; ROY, G.; NGUYEN, C. T. Heat transfer enhancement with the use of nanofluids in radial flow cooling systems considering temperature-dependent properties. **Applied Thermal Engineering**, v. 26, n.17-18, p. 2209–2218, Dezembro 2006.

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

PINHO, D. C. **Avaliação de dessalinizador solar com recuperação de calor com novo arranjo do circuito de aquecimento para operação com óleo térmico**. 2017, 80 f.

Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

RAHMAN, M. M.; MOJUMDER, S.; SAHA, S.; MEKHILEF, S.; SAIDUR, R. Augmentation of natural convection heat transfer in triangular shape solar collector by utilizing water based nanofluids having a corrugated bottom wall. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 50, p. 117-127, Janeiro 2014.

RATIVA, D.; GOMEZ-MALAGÓN, L. A. Solar radiation absorption of nanofluids containing metallic nanoellipsoids. **Solar Energy**, v. 118, p. 419-425, 2015.

SAEEDINIA, M.; AKHAVAN-BEHABADI, M., A.; RAZI, P. Thermal and rheological characteristics of CuO–Base oil nanofluid flow inside a circular tube. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 39, p.152-159, 2012.

SAID, Z.; SAIDUR, R.; RAHIM, N. A.; ALIM, M. A. Analyses of exergy efficiency and pumping power for a conventional flat plate solar collector using SWCNTs based nanofluid. **Energy and Buildings**, v. 78, p. 1-9, 2014.

SAID, Z.; SAIDUR, R.; RAHIM, N, A. Optical properties of metal oxides based nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, v. 59, p. 46-54, 2014.

SAIDUR, R.; MENG, T. C.; SAID, Z.; HASSANUZZAMAN, M.; KAMYAR, A. Evaluation of the effect of nanofluid-based absorbers on direct solar collector. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, V. 55, p. 5899-5907, 2012.

SAIDUR, R.; LEONG, K. Y.; MOHAMMAD, H. A. A review on applications and challenges of nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 15, p. 1646-1668, 2015.

SANTOS, L. F. **Parametrização e aplicação de métodos heurísticos no ajuste da curva de distribuição de Weibull em energia eólica**. 2018, 68 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza.

SHIMA, P.; PHILIP, J.; RAJ, B. Synthesis of aqueous and nonaqueous iron oxide nanofluids and study of temperature dependence on thermal conductivity and viscosity. **Journal of Physical Chemistry**, v. 114, n. 44, p. 18825–18833, 2010.

SILVA, A. C. M. **Transferência de calor em nanofluidos - Potencialidades e desafios**. 2010, 85 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Química), Departamento de Química, Universidade de Aveiro, Aveiro, Portugal.

SUI, D.; LANGÅKER, V. H.; YU, Z. Investigation of thermophysical properties of Nanofluids for application in geothermal energy. **Energy Procedia**, v. 105, n. 1, p. 5055-5060, 2017.

SUMAN, S.; KHAN, K., M.; PATHAK, M. Performance enhancement of solar collectors – A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 49, p. 192-210, 2015.

SURESH, S.; VENKITARAJ K., P.; SELVAKUMAR, P.; CHANDRASEKAR, M. Synthesis of Al₂O₃–Cu/water hybrid nanofluids using two-step method and its thermo physical properties. **Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 388, n.

1-3, p. 41-48, 2011.

WANG, H.; YANG, W.; CHENG, L.; GUAN, C.; YAN, H. Chinese Ink: High performance nanofluids for solar energy. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 176, p. 374-380, 2018.

WATMUFF, J. H.; CHARTERS, W. W. S., PROCTOR, D. Solar and Wind Induced External Coefficients Solar Collectors. **Complex**, n. 02, p. 56, 1977.

XIE, H.; WANG, J.; XI, T.; LIU, Y.; AI, F. Thermal conductivity enhancement of suspensions containing nanosized alumine particles. **Journal of Applied Physics**, v. 91, p. 4567-4572, 2002.

XUAN, Y., LI, Q. Heat transfer enhancement of nanofluids. **International Journal of Heat and Fluid Flow**, v. 21, n. 1, p. 58-64, 2000.

YU, W., XIE, H. A Review on Nanofluids: Preparation, Stability Mechanisms, and Applications. **Journal of Nanomaterials**, v. 2012, Artigo ID 435873, 17 p., 2012.

YU, F.; CHEN, Y.; LIANG, X.; XU, J.; LEE, C.; LIANG, Q.; TAO, P.; DENG, T. Dispersion stability of thermal nanofluids. **Progress in Natural Science: Materials International**, v. 27, p. 531-542, 2017.

ZHOU, S. Q.; NI, R. Measurement of the specific heat capacity of water-based Al₂O₃ nanofluid. **Applied Physics Letters**, v. 92, n. 9, pp. 093123, Março 2008.

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