

**CAROLINA LAU LINS BEICKER**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO USO DE  
NANOFLUIDOS EM COLETORES SOLARES DE  
PLACA PLANA MODIFICADOS PARA ABSORÇÃO  
DIRETA**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA  
FACULDADE DE ENGENHARIA MECÂNICA**

**2023**

**CAROLINA LAU LINS BEICKER**

**AVALIAÇÃO EXPERIMENTAL DO USO DE  
NANOFLUIDOS EM COLETORES SOLARES DE  
PLACA PLANA MODIFICADOS PARA ABSORÇÃO  
DIRETA**

**Tese** apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de **DOUTORA EM ENGENHARIA MECÂNICA.**

Área de Concentração: Geração e Conservação de Energia.

Orientador: Prof. Dr. Enio Pedone Bandarra Filho

**UBERLÂNDIA – MG**

**2023**

Ficha Catalográfica Online do Sistema de Bibliotecas da UFU  
com dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).

B422  
2023

Beicker, Carolina Lau Lins, 1992-  
Avaliação experimental do uso de nanofluidos em  
coletores solares de placa plana modificados para  
absorção direta [recurso eletrônico] / Carolina Lau Lins  
Beicker. - 2023.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.  
Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Uberlândia,  
Pós-graduação em Engenharia Mecânica.  
Modo de acesso: Internet.  
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.te.2024.5>  
Inclui bibliografia.  
Inclui ilustrações.

1. Engenharia mecânica. I. Bandarra Filho, Enio Pedone  
,1970-, (Orient.). II. Universidade Federal de  
Uberlândia. Pós-graduação em Engenharia Mecânica. III.  
Título.

CDU: 621

Bibliotecários responsáveis pela estrutura de acordo com o AACR2:

Gizele Cristine Nunes do Couto - CRB6/2091  
Nelson Marcos Ferreira - CRB6/3074



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE UBERLÂNDIA**  
 Coordenação do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica  
 Av. João Naves de Ávila, nº 2121, Bloco 1M, Sala 212 - Bairro Santa Mônica, Uberlândia-MG, CEP 38400-902  
 Telefone: (34) 3239-4282 - www.posmecanicaufu.com.br - secposmec@mecanica.ufu.br



### ATA DE DEFESA - PÓS-GRADUAÇÃO

Programa de Pós-Graduação em:	Engenharia Mecânica				
Defesa de:	Tese de Doutorado Acadêmico, nº 371, PPGEM				
Data:	19/12/2023	Hora de início:	08:30h	Hora de encerramento:	11:10h
Matrícula do Discente:	12213EMC002				
Nome do Discente:	Carolina Lau Lins Beicker				
Título do Trabalho:	Avaliação experimental do uso de nanofluidos em coletores solares de placa plana modificados para absorção direta				
Área de concentração:	Transferência de Calor e Mecânica dos Fluidos				
Linha de pesquisa:	Geração e Conservação de Energia				
Projeto de Pesquisa de vinculação:					

Reuniu-se por meio de videoconferência a Banca Examinadora, designada pelo Colegiado do Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica, assim composta: Professores Doutores: Gilmar Guimarães - FEMEC/UFU; João Marcelo Vedovotto - FEMEC/UFU; Júlio César Passos - UFSC; José Roberto Simões Moreira - USP; e Enio Pedone Bandarra Filho, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos, o presidente da mesa, Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, apresentou a Comissão Examinadora e o candidato, agradeceu a presença do público, e concedeu à Discente a palavra para a exposição do seu trabalho. A duração da apresentação da Discente e o tempo de arguição e resposta foram conforme as normas do Programa.

A seguir o senhor(a) presidente concedeu a palavra, pela ordem sucessivamente, aos(às) examinadores(as), que passaram a arguir o(a) candidato(a). Ultimada a arguição, que se desenvolveu dentro dos termos regimentais, a Banca, em sessão secreta, atribuiu o resultado final, considerando o(a) candidato(a):

Aprovada.

Esta defesa faz parte dos requisitos necessários à obtenção do título de Doutora.

O competente diploma será expedido após cumprimento dos demais requisitos, conforme as normas do Programa, a legislação pertinente e a regulamentação interna da UFU.

Nada mais havendo a tratar foram encerrados os trabalhos. Foi lavrada a presente ata que após lida e achada conforme foi assinada pela Banca Examinadora.



Documento assinado eletronicamente por **Enio Pedone Bandarra Filho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 11:12, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **João Marcelo Vedovotto, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 11:13, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Gilmar Guimarães, Professor(a) do Magistério Superior**, em 19/12/2023, às 11:14, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **José Roberto Simões Moreira, Usuário Externo**, em 20/12/2023, às 15:01, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



Documento assinado eletronicamente por **Júlio César Passos, Usuário Externo**, em 05/02/2024, às 12:16, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site [https://www.sei.ufu.br/sei/controlador\\_externo.php?acao=documento\\_conferir&id\\_orgao\\_acesso\\_externo=0](https://www.sei.ufu.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0), informando o código verificador **5033583** e o código CRC **DA2012AB**.

**Aos meus filhos**

os que tenho nos braços, Murilo e Rebeca  
e os que reencontrarei na eternidade.

**A Jesus, meu salvador.**

*“Porque dele e por ele, e para ele, são todas as coisas;  
glória, pois, a ele eternamente. Amém.”*

*Romanos 11:36*

## AGRADECIMENTOS

À Deus, que me manteve caminhando quando os obstáculos pareciam intransponíveis.

Ao meu marido, Guilherme, por ter ido além de um incentivador, por vezes fazendo papel de mentor e revisor, e se doado por incontáveis horas para que eu pudesse finalizar esse trabalho.

Aos meus pais, Jusely e Adilson, pela prontidão em me ajudar e pelo cuidado com os netos nos momentos de minha ausência para execução deste trabalho.

Aos meus colegas do LEST, por sempre me auxiliarem quando necessitei; em especial, às grandes amigadas que formei, à Letícia que, mesmo quando distante, seguiu se fazendo presente sendo um suporte emocional e intelectual nessa trajetória, e à Gabriela, que chegou “por último” para somar à pesquisa e à minha vida.

À University of Leeds, na pessoa do Prof. Dongsheng Wen, pela doação de amostras de nanofluido de ouro para a presente pesquisa.

Ao Instituto de Física da UFU, em específico, aos professores Noelio Oliveira Dantas e Anielle Christine Almeida Silva do Laboratório de Novos Materiais Isolantes e Semicondutores, pela doação de nanopartículas híbridas de ZnO-Ag para a presente pesquisa.

Ao meu orientador, Prof. Enio Pedone Bandarra Filho, por todo direcionamento e auxílio durante meus longos anos neste projeto, sempre buscando os melhores resultados.

À Universidade Federal de Uberlândia e à Faculdade de Engenharia Mecânica pela oportunidade de realizar este curso.

Ao CNPq, CAPES e FAPEMIG pelo apoio financeiro.

## RESUMO

Este trabalho foi desenvolvido com o intuito de contribuir com o conhecimento acerca do uso de nanofluidos em coletores solares. Foi realizada a produção de nanofluidos, a avaliação da estabilidade das amostras produzidas e testes em duas bancadas experimentais. A primeira teve por objetivo expor os nanofluidos à radiação solar e investigar parâmetros de absorção e conservação de energia do processo, resultando na seleção de um material e concentração volumétrica ideal de nanopartículas para aplicação em coletor solar. A segunda bancada foi construída visando a utilização dos nanofluidos selecionados na primeira etapa como meio de conversão fototérmica em um coletor solar de placa plana para aquecimento de água em escala reduzida devidamente modificado para tal aplicação. Foram testados na primeira bancada nanofluidos de grafeno, ZnO-Ag, ouro e MWCNT em água, em baixas concentrações volumétricas (entre 0,0001 e 0,0300%). Apenas as amostras de ouro e MWCNT se mantiveram estáveis após a exposição à radiação solar, apresentando um padrão de estabilização da taxa de absorção específica e da razão de energia armazenada com o aumento da concentração, indicando a existência de uma concentração limite para aplicações, determinada nesse trabalho como sendo 0,0020%(Ouro-água) e 0,010%(MWCNT-água). Dentre as amostras testadas, as de MWCNT em água apresentaram maior estabilidade, melhores resultados e menores custos, tendo sido selecionados para testes na segunda bancada nas concentrações de 0,0005%, 0,0008% e 0,0010%. Três coletores foram testados simultaneamente, um tradicional de placa plana, um cuja placa de aquecimento foi removida e adicionado nanofluido ao redor da serpentina de aquecimento, e o terceiro, mantida a placa absorvedora e adicionado nanofluido. Os coletores com nanofluidos tiveram melhor desempenho na concentração de 0,0010%, apresentando médias de variação de temperatura (7,19°C e 7,21°C) superiores às do coletor tradicional (6,49°C) e eficiências médias equiparáveis (0,43, 0,45 e 0,47). Por outro lado, os piores desempenhos foram observados nos testes na concentração intermediária ( $\phi_v=0,0008\%$ ), com eficiências médias até 33% inferiores a do coletor tradicional. O coletor modificado que usava como meio de conversão fototérmica nanofluidos em conjunto com a placa absorvedora apresentou as maiores médias de variação de temperatura, no entanto, foi observado em todas as concentrações, a degradação das amostras de nanofluido presente em seu interior. O coletor tradicional e o modificado que operava apenas com nanofluidos (sem placa absorvedora, apenas serpentina) apresentaram, respectivamente, as melhores e piores eficiências médias. Por fim, concluiu-se que o preenchimento dos coletores solares com nanofluidos implica em uma maior área de absorção da radiação, no entanto, resultou em menores eficiências médias e em ganhos totais de energia que, no máximo, se equipararam aos do modelo tradicional.

**Palavras-chave:** Nanofluidos; Conversão Fototérmica; Coletores Solares; Eficiência.

## ABSTRACT

The present work was developed to contribute to the knowledge about the use of nanofluids in solar collectors. The production of nanofluids, the evaluation of the stability of the samples produced and tests on two experimental benches were carried out. The first one was designed to expose nanofluids to solar radiation and investigate parameters of energy absorption and conservation, resulting in the selection of an ideal material and nanoparticles volumetric concentration to use in a solar collector. The second bench was built aiming the use of the previously selected nanofluids as photothermal conversion medium in a reduced scale modified flat plate solar collector for water heating. Nanofluids of graphene, ZnO-Ag, gold and MWCNT in water were tested in the first bench at low volumetric concentrations (between 0.0001 and 0.0300%). Only the gold and MWCNT nanofluids samples remained stable after exposure to solar radiation, presenting a stabilization trend of the specific absorption rate and the stored energy ratio with the concentration increase, indicating the existence of a limit concentration for applications, determined in this work as being 0.0020%(Gold-water) and 0.010%(MWCNT-water). Among the samples tested, MWCNT in water showed greater stability, better results, and lower costs, motivating its selection for tests on the second experimental bench at concentrations of 0.0005%, 0.0008% and 0.0010%. Three collectors were tested simultaneously, the first with a traditional flat absorber plate, the second without the flat plate and with nanofluid added around the heating coil, and the third compound by the flat plate and the nanofluid added around the heating coil. The collectors operating with nanofluids had better performance in the concentration of 0.0010%, presenting average temperature variation (7.19°C and 7.21°C) higher than the traditional model (6.49°C) and similar average efficiencies (0.43, 0.45 e 0.47). On the other hand, the worst performances were observed in tests at intermediate concentration ( $\phi_v=0.0008\%$ ), presenting average efficiencies up to 33% lower than the traditional collector. The modified collector that used an absorber surface combined with nanofluids as photothermal conversion medium showed the highest temperature variation averages, however, it was observed in the tests, with all three concentrations, the degradation of the nanofluid samples present in its interior. The traditional collector and the modified one operating only with nanofluids (without flat absorber plate) presented, respectively, the best and worst average efficiencies. Finally, it was concluded that filling the solar collectors with nanofluids implies in greater radiation absorption area, however, it also resulted in lower average efficiencies and in total energy gains that, at most, were equal to those of the traditional model.

**Keywords:** Nanofluids; Photothermal Conversion; Solar Collectors; Efficiency.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Número de publicações na plataforma ScienceDirect com os termos “nanofluids+solar” desde 2003 .....	2
Figura 2 – Desenho esquemático de coletor solar de placa plana .....	6
Figura 3 - Desenho esquemático de coletor solar de tubo evacuado (fluido de trabalho sem contato com fluido aquecido).....	7
Figura 4 – (a) Desenho esquemático de coletor solar de tubo evacuado (fluido de trabalho sendo o próprio fluido a ser aquecido) e (b) imagem real do equipamento...8	8
Figura 5 - Desenho esquemático de coletor solar de calha parabólica.....	9
Figura 6 - Desenho esquemático de coletor solar com concentrador parabólico composto .....	10
Figura 7 – Desenho esquemático do coletor solar do tipo Tubo em “U”. (a) Vista geral do coletor e (b) detalhe do corte transversal do tubo em “U” .....	11
Figura 8 - Desenho esquemático do coletor solar de absorção direta .....	12
Figura 9 – Bancada experimental utilizada nos trabalhos de Yousefi et al.(2012a, 2012b, 2012c). (a) Desenho esquemático e (b) foto do coletor de placa plana utilizado. ....	14
Figura 10 – Desenho esquemático da bancada experimental utilizada por He et al. (2014) .....	15
Figura 11 – Desenho esquemático do aparato experimental utilizado por Salavati Meibodi et al. (2015) .....	16
Figura 12 – Foto da bancada experimental utilizada por Verma et al.(2016). ....	17
Figura 13 - Evolução temporal da temperatura de nanofluidos de CNT em Água em diferentes concentrações mássicas. ....	19
Figura 14 – Coletor solar de tubo evacuado utilizado por Sabiha et al. (2015).....	20
Figura 15 – Diagrama esquemático de fluxo de líquido nos coletores de (a) placa plana e (b) tubo evacuado utilizados por Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021). ....	22
Figura 16 – Energia ganha ao longo de um dia para nanofluidos testados em diferentes concentrações no trabalho de Tong et al. (2023).....	23
Figura 17 – (a) Temperatura média de saída e (b) Eficiência óptica e térmica em função da concentração volumétrica .....	24
Figura 18 – Desenho esquemático da bancada experimental utilizada por Liu et al. (2013). ....	25

Figura 19 – Esquema do absorvedor utilizado por Dehaj et al. (2021) (a) com tubo em “U” e (b) sem tubo em “U” .....	26
Figura 20 – Esquema da bancada experimental construída por Tong et al. (2015) ..	28
Figura 21 – Desenho esquemático do aparato experimental usado por Natividade et al. (2019).....	29
Figura 22 – Desempenho dos nanofluidos de TiO <sub>2</sub> /água segundo a concentração e formato de nanopartículas utilizadas no trabalho de Kaya, Alkasem e Arslan (2020). .....	30
Figura 23 - Resultados experimentais da eficiência em regime permanente dos testes no microcoletor térmico solar. ....	31
Figura 24 – Variação temporal da temperatura ao longo do tempo para nanofluidos de Cu/H <sub>2</sub> O (diâmetro de 50nm) em diferentes concentrações mássicas. ....	32
Figura 25 – Fração de energia armazenada de nanofluidos de MWCNT em água para diferentes concentrações: a(água destilada), b(5,6 mg/L), c(11,0 mg/L), d(17,0 mg/L), e(27,0 mg/L), f(53,0 mg/L) no trabalho de Hordy et al. (2014). ....	33
Figura 26 – Bancada experimental utilizada no trabalho de Gupta et al. (2015).....	35
Figura 27 – Aparato experimental utilizado por Karami et al. (2015) em sua pesquisa. ....	36
Figura 28 – Esquema dos coletores solares de absorção direta testados por Chen et al.(2016).....	37
Figura 29 - Esquema do aparato experimental utilizado por Chen et al. (2017). ....	38
Figura 30 - (a) Esquema do aparato experimental utilizado por Wang et al. (2018) e (b) os resultados obtidos com sua utilização sob radiação solar simulada. ....	39
Figura 31 - Resultado obtido por Duan et al. (2018) para a eficiência de conversão fototérmica de acordo com a concentração dos nanofluidos estudados.....	40
Figura 32 – (a) Bancada experimental utilizada por Amjad et al. (2018) e (b)perfis de temperatura obtidos para as diferentes nanopartículas estudadas.....	41
Figura 33 - Resultado obtido por Liu et al. (2018) para a taxa de evaporação de água (m) e produção de vapor específica (PVE) para diferentes concentrações de nanofluidos de óxido de grafeno reduzido em água. ....	42
Figura 34 – Esquema de análise de espectro de absorção de uma amostra de concentração “c” e espessura “d” .....	53
Figura 35 - Espectro de absorção de solução de hólmio em função do comprimento de onda.....	54

Figura 36 – Cubetas de diferentes caminhos ópticos. ....	55
Figura 37 – Sonicador Q500, da Qsonica Sonicators: (a) painel de configuração e (b) sonda do sonicador.....	57
Figura 38 – Imagens das amostras mais concentradas de (a) grafeno, (b) MWCNT e (c) ouro .....	58
Figura 39 – Variação de cor discreta observada em duas amostras de ouro em água de mesma concentração $\phi_v = 0,0003\%$ (não utilizada e após exposição solar) .....	61
Figura 40 – Variação de cor em dispersões de nanopartículas de ouro de diferentes tamanhos em água .....	61
Figura 41 – Espectrofotômetro UV-1900 .....	62
Figura 42 – Absorbância medida para os nanofluidos de ouro-água recém produzidos (novos).....	63
Figura 43 – Relação da absorbância com a concentração para os nanofluidos de ouro-água.....	64
Figura 44 - Absorbância medida para os nanofluidos de MWCNT-água recém produzidos (novos).....	65
Figura 45 - Relação da absorbância com a concentração para os nanofluidos de MWCNT-água .....	66
Figura 46 – Bancada de testes 1: (a) representação esquemática e (b) vista superior da bancada real .....	67
Figura 47 – Desenho esquemático das células de teste: (a)vistas cotadas e (b)vista tridimensional.....	67
Figura 48 - Esquema da (a) orientação e (b) inclinação da bancada de testes. ....	68
Figura 49 – Termopar do tipo T utilizado na bancada 2 .....	69
Figura 50 - Sistema de aquisição de dados; (a) Chassi NI cDAQ-9178, (b) módulo de aquisição NI 9213. ....	69
Figura 51 – Medidor de radiação MES-200, da Instrutherm .....	70
Figura 52 – Interface do software “Solar meter V8.01” .....	70
Figura 53 – Interface criada em ambiente Labview® para aquisição de dados de temperatura.....	71
Figura 54 – Desenho esquemático do SAS em escala reduzida projetado .....	74
Figura 55 – Fotos dos coletores com (a) placa e serpentina e (b) apenas serpentina .....	75
Figura 56 – Imagem (a) esquemática e (b)real da bancada de testes 2.....	75

Figura 57 – Detalhes do coletor solar em escala reduzida projetado .....	77
Figura 58 – Reservatório de água (“boiler”).....	78
Figura 59 – (a) Orientação e (b) inclinação da bancada de testes 2.....	79
Figura 60 – Desenho esquemático do sistema de aquecimento solar .....	82
Figura 61 - Perfil de radiação solar incidente no dia 08/10/2018. ....	88
Figura 62 - Perfis de temperatura dos nanofluidos de grafeno em água (a) (0,0001% $\leq\phi_v\leq$ 0,002%) e (b) (0,002% $\leq\phi_v\leq$ 0,03%) e do fluido base testados no dia 08/10/2018.....	88
Figura 63 – Foto da bancada de testes com nanofluidos de grafeno após 10 horas de exposição à radiação solar.....	90
Figura 64 – Fotos da degradação apresentada pelas amostras de nanofluidos de grafeno em água. (a)Antes e depois da exposição à radiação solar. (b)Detalhe da amostra $\phi_v=0,003\%$ .....	90
Figura 65 - Perfis do dia 14/6/19 de (a) radiação solar incidente, (b)temperatura das amostras com menor teor de prata e (c) temperatura das amostras com maior teor de prata .....	91
Figura 66 – Foto da bancada de testes com ZNO-Ag-Água no (a)primeiro (14/6/19) e (b) último (19/6/19) dias de testes.....	93
Figura 67 – Detalhes da degradação das amostras. (a) Mudança de cor da amostra (tom amarelado) (b) Aglomeração e adesão de nanopartículas de prata na célula de teste.....	93
Figura 68 - Foto da bancada de testes com Ouro-água no dia 11/6/20 .....	94
Figura 69 - Perfis do dia 11/6/20 de (a) radiação solar incidente e (b)temperatura das amostras de nanofluidos de ouro-água .....	95
Figura 70 – Pequenas aglomerações observadas no fundo das células de teste de nanofluidos de ouro-água .....	96
Figura 71 – Amostras de nanofluido de ouro-água de diferentes concentrações antes(esq.) e depois(dir.) de cinco dias de exposição à radiação solar .....	97
Figura 72 – Parâmetros de conversão fototérmica dos nanofluidos de ouro-água, testados dia 11/6/20 (a) “SER” médio e (b)”SAR” máximo .....	99
Figura 73 – Esquemas (a) da área superficial de nanopartículas individuais <i>versus</i> aglomerados de nanopartículas e (b)da absorção de radiação por nanofluidos de diferentes concentrações. ....	101

Figura 74 - Perfis do dia 15/10/19 de (a) radiação solar incidente, (b) temperatura dos nanofluidos de MWCNT-água de (a) menor concentração ( $0,0001\% \leq \phi_v \leq 0,002\%$ ) e (b) maior concentração ( $0,002\% \leq \phi_v \leq 0,03\%$ ).....	102
Figura 75 - Foto da bancada de testes com MWCNT-água no último dia de testes (20/10/19). .....	104
Figura 76 – Detalhe da célula de teste com nanofluido $\Phi_v=0,0008\%$ após cinco dias de exposição solar. ....	104
Figura 77 – Parâmetros de conversão fototérmica dos nanofluidos de MWCNT-água, testados dia 15/10/19 (a) “SER” médio e (b) “SAR” máximo .....	106
Figura 78 – Parâmetros de conversão fototérmica (a) “SER” médio e (b) “SAR” máximo para os nanofluidos de ouro e MWCNT em água.....	108
Figura 79 – Perfis de (a) radiação e (b) temperatura para o dia 22/7/22, Etapa 1 – Validação da bancada de testes com ar.....	110
Figura 80 – Perfis de (a) radiação e (b) temperatura para o dia 27/7/22, Etapa 2 – Validação da bancada de testes com água preenchendo os coletores 1 e 2.....	111
Figura 81 – Perfis de (a) radiação e (b) temperatura para o dia 29/7/22, Etapa 2 – Validação da bancada de testes com água preenchendo os coletores 2 e 3.....	112
Figura 82 – Foto das amostras de volume reduzido utilizadas para avaliação diária da estabilidade das amostras.....	114
Figura 83 – Detalhe do posicionamento da cubeta junto ao coletor 1 .....	115
Figura 84 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 5/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0010\%$ .....	117
Figura 85 – Eficiência de cada coletor para o dia 5/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0010\%$ .....	118
Figura 86 – Fotos comparativas da bancada 2 no início e final do dia 5/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0010\%$ .....	119
Figura 87 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 7/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0010\%$ .....	120
Figura 88 – Eficiência de cada coletor para o dia 7/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0010\%$ .....	121

Figura 89 – Perfis de (a)radiação, (b)temperaturas de entrada e saída e (c)variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 9/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0010\%$ .....	122
Figura 90 – Comparativo entre a variação de temperatura e a eficiência médias de cada coletor nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) .....	125
Figura 91 – Fotos comparativas ao final dos dias 1, 3 e 5 de testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) no (a) Coletor 2 (serpentina+nanofluido) e (b) Coletor 3(placa+nanofluido) .....	126
Figura 92 – Detalhes das deposições de nanopartículas na superfície da placa absorvedora do Coletor 3 nos testes com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) .....	127
Figura 93 – Detalhes das aglomerações de nanopartículas observadas no Coletor 3 nos testes com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ).....	128
Figura 94 – Variação de absorbância das amostras de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) testados na bancada 2 .....	129
Figura 95 – Perfis de (a)radiação, (b)temperaturas de entrada e saída e (c)variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 11/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0008\%$ .....	131
Figura 96 – Eficiência de cada coletor para o dia 11/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0008\%$ .....	132
Figura 97 – Foto do Coletor 3 (placa+nanofluido) no segundo dia de testes com nanofluidos MWCNT-Água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ).....	133
Figura 98 – Perfis de (a)radiação, (b)temperaturas de entrada e saída e (c)variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 15/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0008\%$ .....	134
Figura 99 – Eficiência de cada coletor para o dia 15/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0008\%$ .....	135
Figura 100 - Comparativo entre a variação de temperatura e a eficiência médias de cada coletor nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) .....	137
Figura 101 - Fotos comparativas ao final dos dias 1, 2 e 4 de testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) no Coletor 3 (placa+nanofluido) .....	138
Figura 102 – Detalhes das aglomerações e deposição de nanopartículas no Coletor 3 ao fim do segundo dia de testes (12/8/22) com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ).....	139

Figura 103 – Variação de absorbância das amostras de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) testados na bancada 2 .....	140
Figura 104 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 16/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0005\%$ .....	141
Figura 105 – Eficiência de cada coletor para o dia 16/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0005\%$ .....	143
Figura 106 – Fotos comparativas ao longo do primeiro dia de testes (16/8/22) com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) no Coletor 3 (placa+nanofluido).....	143
Figura 107 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 20/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0005\%$ .....	144
Figura 108 – Eficiência de cada coletor para o dia 20/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água, $\Phi_v=0,0005\%$ .....	145
Figura 109 - Comparativo entre a variação de temperatura e a eficiência médias de cada coletor nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) .....	147
Figura 110 - Fotos comparativas ao longo de três dias de testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) no Coletor 3 (placa+nanofluido) .....	148
Figura 111 - Detalhes das aglomerações e deposição de nanopartículas no Coletor 3 ao final do (a) primeiro (16/8/22) e (b) último (20/8/22) dia de testes com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) .....	149
Figura 112 – Variação de absorbância das amostras de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) testados na bancada 2 .....	150
Figura 113 - Comparativo das variações de temperatura, eficiências médias, radiação incidente e temperatura ambiente médias para as diferentes concentrações de nanofluidos de MWCNT-água testados na bancada 2.....	152
Figura 114 – Energia total específica em dias de testes com nanofluidos MWCNT-água $\Phi_v=0,0010\%$ (a) 5/8/22 e (b) 7/8/22 .....	155
Figura 115 – Energia total específica em dias de testes com nanofluidos MWCNT-água $\Phi_v=0,0008\%$ (a) 11/8/22 e (b) 15/8/22 .....	156
Figura 116 – Energia total específica em dias de testes com nanofluidos MWCNT-água $\Phi_v=0,0005\%$ (a) 16/8/22 e (b) 20/8/22 .....	157
Figura 117 – Diferenças construtivas entre coletores modificados: comparativo da vista em corte transversal do Coletor 2 e Coletor 3 .....	160

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Resumo das informações referentes às amostras de grafeno produzidas .....	58
Tabela 2 - Resumo das informações referentes às amostras de MWCNT produzidas .....	59
Tabela 3 - Resumo das informações referentes às amostras de ouro produzidas ....	59
Tabela 4 – Resumo das informações referentes às amostras de ZnO-Ag produzidas .....	60
Tabela 5 – Absorbância das amostras de nanofluidos de ouro-água em $\lambda=520$ nm .	64
Tabela 6 - Absorbância das amostras de nanofluidos de MWCNT-água em $\lambda=745$ nm .....	65
Tabela 7 – Cronograma de testes bancada 1 .....	68
Tabela 8 – Sequência e posicionamento dos coletores na bancada de testes .....	79
Tabela 9 – Cronograma de testes bancada 2 .....	80
Tabela 10 - Configuração da bancada de testes 2 nas duas etapas de validação ....	81
Tabela 11 - Incerteza de medição associada a cada termopar utilizado na bancada 1 .....	85
Tabela 12 - Incerteza de medição associada a cada termopar utilizado na bancada 2 .....	86
Tabela 13 – Concentração estimada para os nanofluidos novos e usados de ouro-água ao longo do tempo .....	98
Tabela 14 - Concentração estimada para os nanofluidos novos e usados de MWCNT-água ao longo do tempo .....	105
Tabela 15 – Resumo dos principais parâmetros analisados nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ).....	124
Tabela 16 - Concentração estimada para os nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) testados na bancada 2 .....	129
Tabela 17 - Resumo dos principais parâmetros analisados nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ).....	136
Tabela 18 - Concentração estimada para os nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) testados na bancada 2 .....	140
Tabela 19 - Resumo dos principais parâmetros analisados nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ).....	146

Tabela 20 - Concentração estimada para os nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) testados na bancada 2 .....	150
Tabela 21 - Variações de temperatura e eficiências médias de cada etapa de testes na bancada 2 ( $\Phi_v=0,0010\%$ , $\Phi_v=0,0008\%$ e $\Phi_v=0,0005\%$ ) .....	151
Tabela 22 – Variação percentual da concentração volumétrica estimada pela absorvância em cada etapa de testes ( $\Phi_v=0,0010\%$ , $\Phi_v=0,0008\%$ e $\Phi_v=0,0005\%$ ) .....	159

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIações

### Arábicos

ABNT: Associação Brasileira de Normas Técnicas

ABS: absorvância

Ag: prata

Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>: alumina

Au: ouro

B<sub>total</sub>: erro sistemático total

c: calor específico [J/g°C]

C-dot: ponto quântico de carbono

CNT: *Carbon Nanotube* (nanotubo de carbono)

col: coletor

CPC: concentrador parabólico composto

CRO: Ciclo Rankine Orgânico

CSAD: coletor solar de absorção direta

CTAB: brometo de cetiltrimetilamônio

Cu: cobre

D: diâmetro da tubulação do coletor [m]

dT: diferencial de temperatura [°C]

dt: diferencial do tempo [s]

EG: etilenoglicol

f-GNPs: nanopartículas funcionalizadas de grafeno

g: gravidade [m/s<sup>2</sup>]

G: radiação solar incidente q[W/m<sup>2</sup>]

GO: óxido de grafeno

GRAF: grafeno

H: altura representativa [m]

INMET: Instituto Nacional de Meteorologia

k: número de rodadas

L: comprimento da tubulação do coletor [m]

m: massa [g]

méd: média

MWCNT: *Multi-Walled Carbon Nanotube* (nanotubos de carbono de paredes múltiplas)

N: número de medições por rodada

PMMA: polimetilmetacrilato

Q: energia armazenada [J]

SAR: *Specific Absorption Rate* (Taxa de absorção específica) [kW/g]

SAS: sistema de aquecimento solar

$S_{cal}$ : erro de calibração

SER: *Storage Energy Ratio* (Razão de energia armazenada)

$S_{rnd;meas}$  : erro aleatório de uma medição

$S_{total}$ : erro total

SWCNT: *Single-Walled Carbon Nanotube* (nanotubos de carbono de parede simples)

T: temperatura (°C)

t: tempo (s)

$t_{95}$ : valor da distribuição t de student com 95% de confiança

TC: *thermocouple* (termopar)

TP: termopar

UFU: Universidade Federal de Uberlândia

$U_{total}$  : incerteza total

UV: ultravioleta

V: volume [ml]

Vis: visível

## Gregos

$\Delta p$ : diferença de pressão [Pa]

$\Delta T$ : variação na temperatura [°C]

$\Delta t$ : variação no tempo [s]

$\varepsilon$ : coeficiente de extinção [mL/(cm<sup>2</sup>\*g)]

$\lambda$ : comprimento de onda [nm]

$\rho$ : densidade [g/cm<sup>3</sup>]

$\sigma$  : desvio padrão

T: transmitância

$\phi$ : concentração [%]

$\mu$ : viscosidade [Ns/m<sup>2</sup>]

**SUBSCRITOS**

a: água

ent: entrada

f: fluido

fb: fluido base

i: instantânea

in: *inlet* (entrada)

m: mássica

máx: máxima

méd: média

mín: mínima

nf: nanofluido

np: nanopartícula

out: *outlet* (saída)

r: reservatório

sai: saída

v: volumétrica

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	1
1.1	OBJETIVOS GERAIS.....	3
1.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	3
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1	NANOFLUIDOS: CONCEITO E APLICAÇÕES.....	4
2.2	TIPOS DE COLETORES SOLARES .....	5
2.2.1	PLACA PLANA.....	5
2.2.2	TUBO EVACUADO .....	6
2.2.3	PARABÓLICOS .....	8
2.2.4	TUBO EM “U” .....	10
2.2.5	ABSORÇÃO DIRETA.....	12
2.3	APLICAÇÃO DE NANOFLUIDOS EM COLETORES SOLARES.....	12
2.3.1	COLETORES SOLARES DE PLACA PLANA .....	13
2.3.2	COLETORES SOLARES DE TUBO EVACUADO .....	19
2.3.3	COLETORES SOLARES PARABÓLICOS .....	24
2.3.4	COLETORES SOLARES TUBO EM “U” .....	27
2.3.5	COLETORES SOLARES DE ABSORÇÃO DIRETA .....	30
2.3.6	RESUMO DE REFERÊNCIAS SOBRE COLETORES SOLARES .....	43
2.4	ESPECTROFOTOMETRIA.....	53
3	METODOLOGIA .....	56
3.1	PRODUÇÃO DE NANOFLUIDOS .....	56
3.2	ANÁLISE DA ESTABILIDADE DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS.....	60
3.2.1	Análise qualitativa da estabilidade: inspeção visual .....	60
3.2.2	Análise quantitativa da estabilidade: medição da absorbância .....	62
3.3	BANCADA 1 – EXPOSIÇÃO DE NANOFLUIDOS À RADIAÇÃO SOLAR .....	66
3.3.1	Características gerais da bancada de testes 1 .....	66

3.3.2	Posicionamento da bancada de testes 1 .....	68
3.3.3	Cronograma e condições de testes – bancada 1 .....	68
3.4	<b>INSTRUMENTAÇÃO DAS BANCADAS EXPERIMENTAIS .....</b>	<b>69</b>
3.5	<b>EQUAÇÕES DE ANÁLISE DA BANCADA DE TESTES 1 .....</b>	<b>71</b>
3.5.1	Razão de energia armazenada (“SER”).....	71
3.5.2	Taxa de absorção específica (“SAR”) .....	72
3.6	<b>BANCADA 2 – COLETORES SOLARES UTILIZANDO NANOFLUIDOS ..</b>	<b>73</b>
3.6.1	Características gerais da bancada de testes 2.....	76
3.6.2	Características construtivas dos coletores solares.....	76
3.6.3	Características construtivas dos Reservatórios térmicos (“boiler”) 77	
3.6.4	Características construtivas das conexões coletor-boiler .....	78
3.6.5	Posicionamento da bancada de testes 2 .....	78
3.6.6	Cronograma e condições de testes – bancada 2 .....	80
3.7	<b>VALIDAÇÃO DA BANCADA DE TESTES 2.....</b>	<b>80</b>
3.8	<b>EQUAÇÕES DE ANÁLISE DA BANCADA DE TESTES 2 .....</b>	<b>81</b>
3.8.1	Estimativa teórica da vazão mássica – Efeito termossifão .....	81
3.8.2	Variação de temperatura no coletor .....	83
3.8.3	Eficiência do coletor solar .....	84
3.8.4	Temperatura da água do reservatório térmico (“Boiler”) .....	84
3.9	<b>ANÁLISE DE INCERTEZA: DADOS DE TEMPERATURA E RADIAÇÃO ..</b>	<b>85</b>
4	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES.....</b>	<b>87</b>
4.1	<b>RESULTADOS BANCADA DE TESTES 1.....</b>	<b>87</b>
4.1.1	Nanofluidos de Grafeno em água.....	87
4.1.2	Nanofluidos de ZnO-Ag em água .....	91
4.1.3	Nanofluidos de Ouro em água.....	94
4.1.4	Nanofluidos de MWCNT em água.....	102

4.1.5	Comparativo Nanofluidos de ouro-água e MWCNT-água .....	107
4.2	<b>RESULTADOS BANCADA DE TESTES 2</b> .....	109
4.2.1	Validação da bancada de testes 2: Resultados .....	109
4.2.2	Coletores solares utilizando nanofluidos .....	113
4.2.3	Nanofluido de MWCNT-Água, $\Phi_v=0,0010\%$ .....	116
4.2.4	Nanofluido de MWCNT-Água, $\Phi_v=0,0008\%$ .....	130
4.2.5	Nanofluido de MWCNT-Água, $\Phi_v=0,0005\%$ .....	141
4.2.6	Comparativo entre diferentes nanofluidos MWCNT-Água ( $\Phi_v=0,0010\%$ , $\Phi_v=0,0008\%$ e $\Phi_v=0,0005\%$ ).....	151
5	CONCLUSÕES.....	162
5.1	<b>TRABALHOS FUTUROS</b> .....	166
6	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	167
	Apêndice A – Curvas de calibração dos termopares da bancada 1 .....	176
	Apêndice B – Curvas de calibração dos termopares da bancada 2.....	181
	Apêndice C – Cálculo das incertezas de medição dos termopares .....	184
	Apêndice D – Dados relativos aos últimos dias de testes na Bancada 1 .....	186

# CAPÍTULO I

## 1 INTRODUÇÃO

Fluidos como água, etilenoglicol e alguns óleos são, há séculos, amplamente utilizados em processos de transferência de calor, no entanto, nas últimas décadas, a condutividade térmica relativamente baixa desse tipo de fluido passou a ser vista como um desafio na busca por processos mais eficientes. Nesse contexto, a adição de partículas sólidas de alta condutividade aos fluidos tradicionalmente usados surgiu com a perspectiva de melhoria da eficiência na transferência de calor. No entanto, as dispersões inicialmente criadas utilizavam partículas de tamanho na ordem de, no mínimo,  $1\mu\text{m}$ , apresentando como principal desvantagem e contraponto à sua aplicação a baixa estabilidade.

O avanço da tecnologia e das técnicas de produção possibilitou a substancial redução no tamanho das partículas, sendo estas posteriormente produzidas em escala nanométrica (entre 1 e 100 nm). Esse tipo de dispersão, nomeada “nanofluidos”, foi elencada por Choi (1995) como a maneira de suplantiar os desafios relativos às dispersões em escala micrométrica e obter-se fluidos estáveis, com características térmicas superiores e propriedades ajustáveis com a variação da concentração de nanopartículas utilizada.

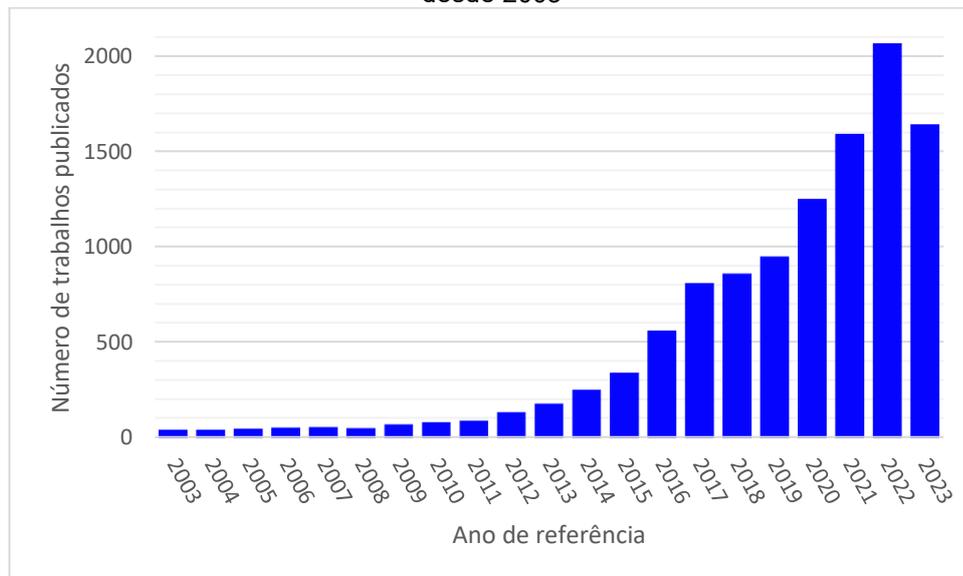
Considerando as características únicas e desejáveis dessa classe de fluido, ampliou-se nas últimas décadas o interesse no estudo dos nanofluidos, seus métodos de produção, suas aplicações e os desafios intrínsecos ao seu uso (Pereira, 2009; Fan e Wang, 2011; Devendiran e Amirtham, 2016; Koca, 2018; Khanafer e Vafai, 2018; Cacia et al., 2019; Li et al., 2021; Rios et al., 2021; Sun et al., 2022; Said et al., 2023).

Paralelamente aos estudos das características térmicas superiores dos nanofluidos, notou-se também a modificação das propriedades ópticas e de conversão fototérmica proporcionada pela adição de nanopartículas a um fluido base: os nanofluidos possuem alta absorvidade de radiação na região da luz visível (400-700

nm) e baixa emissividade na região do infravermelho (>700 nm), além de proporcionarem temperaturas mais uniformes que as superfícies tradicionalmente utilizadas em processos de conversão fototérmica (Taylor et al., 2010). Além disso, a adição de nanopartículas a um fluido causa um aumento do trajeto dos fótons incidentes, permitindo uma maior absorção e armazenamento da energia e uma melhoria da eficiência do processo de conversão fototérmica.

A utilização de superfícies seletivas em coletores solares para a captação da radiação incidente apresenta como principal desvantagem a diminuição da eficiência do processo de conversão fototérmica em razão do aumento da temperatura em determinadas regiões das superfícies absorvedoras e, conseqüentemente, das maiores perdas radiativas para o ambiente; nesse contexto, o uso de coletores cujo meio de conversão fototérmica seja um fluido (com temperaturas mais uniformes) e não uma superfície, se torna atrativo e, o uso de nanofluidos, uma possibilidade. Dessa maneira, destaca-se o desenvolvimento de pesquisas e aumento das publicações envolvendo nanofluidos nas áreas de radiação solar e novas tecnologias de coletores, como ilustra a Figura 1.

Figura 1 – Número de publicações na plataforma ScienceDirect com os termos “nanofluids+solar” desde 2003



Fonte: ScienceDirect. Acesso em: 16/07/2023

Portanto, tendo em vista o atual cenário e com o objetivo de estudar e avaliar o desempenho de conversão fototérmica de nanofluidos quando utilizados em coletores solares residenciais para aquecimento de água, foram construídos no presente trabalho dois aparatos experimentais, o primeiro deles visando a exposição dos

nanofluidos e seus respectivos fluidos base à radiação solar e determinação de uma concentração volumétrica “ótima” baseada na capacidade de absorção e conservação de energia de cada um, e o segundo para comparação do desempenho de um coletor solar de placa plana tradicional e um modificado que utilize os nanofluidos previamente selecionados (na concentração volumétrica “ótima”) como meio de conversão fototérmica. Assim, a seguir, foram elencados os objetivos gerais e específicos desta pesquisa.

### **1.1 OBJETIVOS GERAIS**

Avaliar o desempenho de coletores solares para aquecimento de água que utilizem nanofluidos como meio de conversão fototérmica comparativamente a um coletor solar de placa plana tradicional. Analisar a influência do tipo e concentração de nanopartículas utilizada no processo de conversão fototérmica.

### **1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Produção de nanofluidos em variadas concentrações a partir de diferentes tipos de nanopartícula através do método de sonicação.
- Avaliação qualitativa e quantitativa da estabilidade das amostras de nanofluidos produzidos.
- Construção de uma bancada experimental que permita a exposição solar dos fluidos estudados e a coleta de dados de temperatura ao longo do período de testes.
- Determinação da capacidade de absorção e conservação de energia de diferentes naturezas de nanofluidos em diferentes concentrações.
- Determinação de uma faixa de concentração volumétrica ótima para a utilização dos nanofluidos estudados como meio de conversão fototérmica em coletores solares.
- Construção de uma bancada que reproduza os efeitos de um coletor solar de absorção direta para comparação entre a operação convencional (coletor solar de placa plana) e a operação utilizando nanofluidos como meio de conversão fototérmica.
- Avaliação do desempenho do coletor solar adaptado (para uso com nanofluidos) em relação a um coletor solar de placa plana tradicional.

## CAPÍTULO II

### 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão apresentados conceitos base ao desenvolvimento desta pesquisa, bem como elencados trabalhos publicados por diversos autores nos últimos anos referentes ao uso de nanofluidos em coletores solares.

#### 2.1 NANOFUIDOS: CONCEITO E APLICAÇÕES

Nanofluidos foi o termo inicialmente utilizado por Choi em 1995 para denominar a dispersão de partículas sólidas em escala nanométrica de variadas naturezas como metais (Au, Ag, Cu), óxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ , ZnO,  $\text{TiO}_2$ , etc) ou formas alotrópicas do carbono (grafite, grafeno, diamante, nanotubos de carbono) em um meio líquido (água, óleos, etilenoglicol, etc), destacando que a adição de partículas de elevada condutividade térmica em fluidos de baixa condutividade proporcionaria uma melhoria das características térmicas da dispersão criada.

Choi destacou algumas características e vantagens desse tipo de dispersão:

- Propriedades variáveis com a escolha da natureza da nanopartícula e da concentração utilizada;
- Grande área superficial das nanopartículas, aumentando a área de troca térmica entre as partículas e o fluido base;
- Predominância do movimento browniano das partículas, favorecendo a estabilidade das amostras;
- Melhor estabilidade da dispersão pela redução das aglomerações formadas;
- Menor potência de bombeamento necessária para atingir transferência de calor equivalente à proporcionada por dispersões de partículas de maior tamanho.

Desde então, a busca por aplicações envolvendo nanofluidos foi ampliada, englobando estudos em: trocadores de calor diversos (casco-tubo, duplo tubo, de

placas, etc.), sistemas de refrigeração, resfriamento de componentes eletrônicos, sistemas de termossifão bifásico, tubos de calor, radiadores automotivos, coletores solares, destiladores de água, microcanais, entre outros (Raja et al., 2016; Mehta et al, 2022).

## **2.2 TIPOS DE COLETORES SOLARES**

Atualmente existem diferentes tipos de coletores solares disponíveis comercialmente, sendo que cada modelo possui características específicas, como a geometria construtiva e materiais utilizados, o uso ou não de concentradores da radiação solar, o tipo de isolamento térmico utilizado, o aproveitamento de radiação difusa e o princípio de funcionamento do coletor.

Nesse tópico serão, então, elencadas algumas das características de cinco tipos de coletores solares, sendo eles: placa plana, tubo evacuado, parabólico, tubo em “U” e coletor de absorção direta.

### **2.2.1 PLACA PLANA**

Coletores solares de placa plana tem como princípio de funcionamento a absorção de radiação solar por placas planas absorvedoras, constituídas por superfícies seletivas<sup>1</sup> de formato plano usualmente feitas de cobre ou alumínio e pintadas com tintas especiais (que conferem a característica seletiva da superfície) que são acopladas a serpentinas de aquecimento de fluido (usualmente água), conforme ilustra a Figura 2.

---

<sup>1</sup> Superfícies seletivas são superfícies revestidas ou fabricadas em material com alta absorvidade na região dos comprimentos de onda da luz visível e baixa emissividade na região do infravermelho

Figura 2 – Desenho esquemático de coletor solar de placa plana



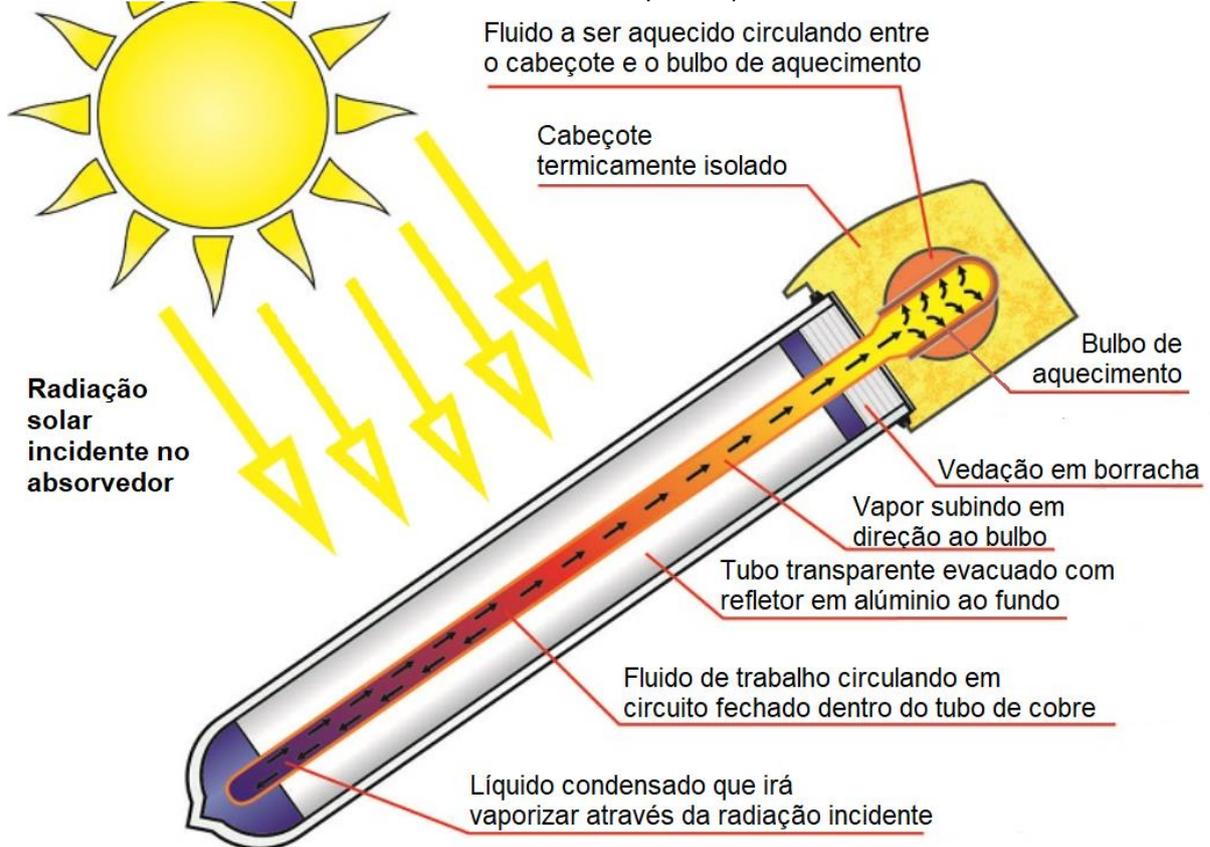
Fonte: Adaptado do Site Decorexpro. Disponível em: < <https://engineerx.decorexpro.com/pt/eco-energy/eko-dom/solnechnoe-otoplenie-chastnogo-doma> > Acesso em: 18/01/2023

Essa configuração de coletor solar possui uma estrutura metálica externa, pontos de entrada de água fria na região inferior e de saída de água quente na região superior da estrutura, revestimento transparente (usualmente de vidro) na face frontal e isolamento térmico na face oposta à de incidência da radiação solar, além disso, a região que circunda a placa absorvedora e a serpentina de aquecimento é preenchida com ar.

### 2.2.2 TUBO EVACUADO

Coletores solares de tubo evacuado, como sugere o nome, são compostos por tubos cujo isolamento térmico em relação à vizinhança é realizado por meio de vácuo.

Figura 3 - Desenho esquemático de coletor solar de tubo evacuado (fluido de trabalho sem contato com fluido aquecido)



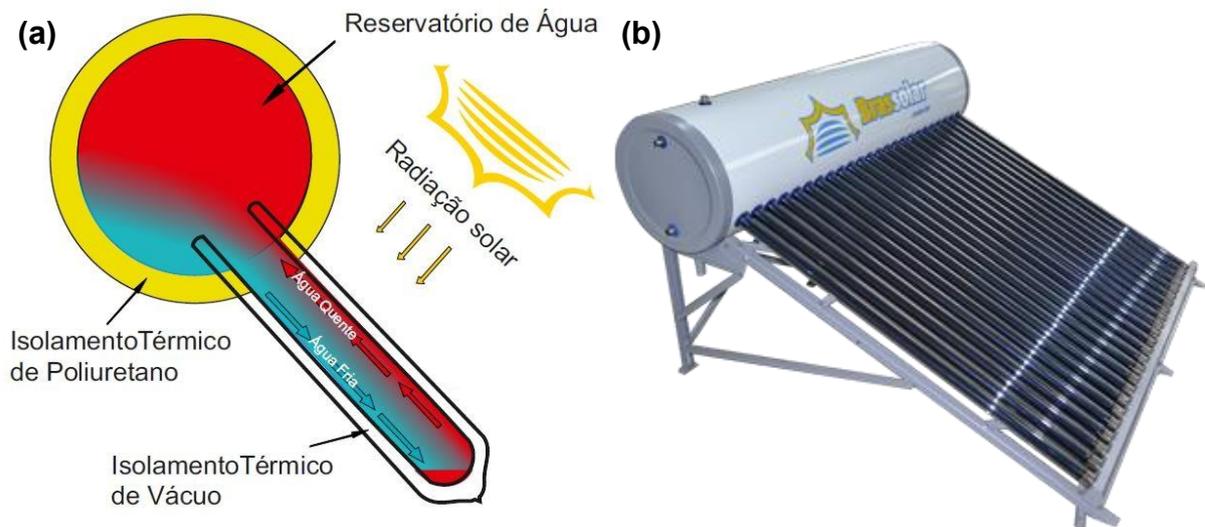
Fonte: Adaptado do Site Decorexpro. Disponível em: < <https://engineerx.decorexpro.com/pt/eco-energy/eko-dom/solnechnoe-otoplenie-chastnogo-doma> > Acesso em: 18/01/2023

Esse tipo de coletor, conforme ilustra a Figura 3, é composto por um tubo de vidro cuja parede oposta à de incidência de radiação solar possui uma camada refletiva em alumínio, em seu interior encontra-se um tubo de calor com bulbo de aquecimento feito de cobre responsável pela conversão fototérmica e, adjacente a essa estrutura, um cabeçote termicamente isolado no qual o fluido a ser aquecido (usualmente água), advindo de um reservatório, troca calor com o bulbo. O fluido de trabalho presente no interior do tubo de calor, nessa configuração, não tem contato com o fluido a ser aquecido (água) e passa por sucessivos ciclos de evaporação-condensação: o fluido de trabalho é aquecido pela incidência da radiação solar, evapora e sobe até o bulbo onde troca calor com o fluido a ser aquecido; conforme esfria, o fluido de trabalho condensa e retorna ao tubo de calor para um novo ciclo.

No Brasil, o coletor de tubo evacuado foi modificado de maneira que o fluido de trabalho e o fluido a ser aquecido são o mesmo, conforme ilustra a Figura 4(a). Nessa configuração, o coletor é utilizado para aquecimento de água e a parcela de fluido aquecido que sobe pelo tubo é armazenado em um reservatório térmico único

devidamente isolado, em que a água fria é reabastecida por uma tubulação em sua parte inferior e a água quente é consumida através de uma tubulação em sua parte superior.

Figura 4 – (a) Desenho esquemático de coletor solar de tubo evacuado (fluido de trabalho sendo o próprio fluido a ser aquecido) e (b) imagem real do equipamento.



Fonte: Adaptado do Blog Brassolar. Disponível em: < <https://blog.brassolar.com.br/aquecedor-solar-a-vacuado-maxima-eficiencia/> > Acesso em: 18/01/2023

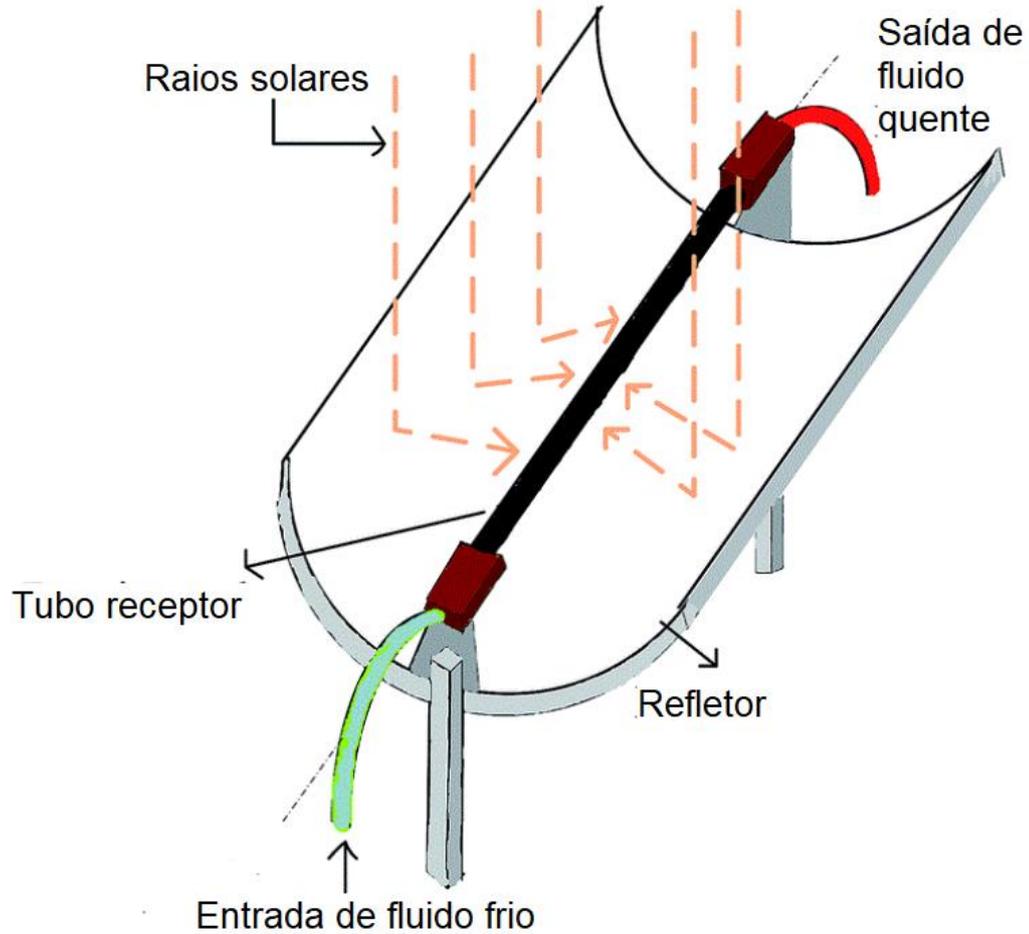
### 2.2.3 PARABÓLICOS

A categoria de coletores solares parabólicos se subdivide em outras duas, a primeira delas, do tipo calha parabólica, e a segunda, do tipo concentrador parabólico composto. Ambas as subcategorias possuem como princípio de funcionamento um conjunto refletor-receptor, sendo o refletor responsável por realizar a concentração da radiação solar incidente, e o tubo receptor, pelo aquecimento de um fluido. Os refletores possuem formato parabólico e os receptores são usualmente construídos de maneira semelhante a um tubo evacuado, ou seja, dois tubos concêntricos, sendo o interior feito de material metálico com revestimento de característica seletiva, o exterior de vidro e, entre ambos, uma região evacuada para diminuição das perdas térmicas.

Considerando-se as diferenças desses dois tipos de coletor tem-se que o coletor de calha parabólica (Figura 5) é constituído de uma única placa refletiva em formato de parábola cujo foco coincide com o tubo receptor, enquanto o coletor solar com concentrador parabólico composto (CPC) (Figura 6) possui duas superfícies refletivas parabólicas, cujos focos são posicionados de maneira que a radiação

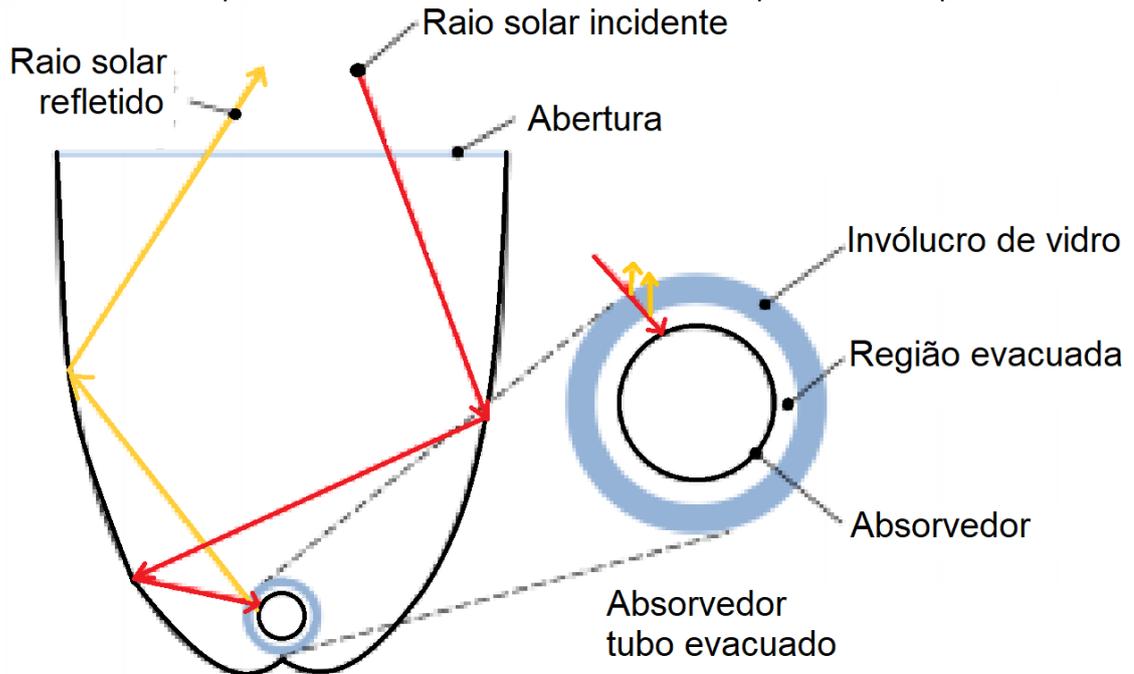
incidente através da abertura em diferentes angulações sofra sucessivas reflexões até que atinja o tubo receptor, permitindo um melhor aproveitamento da radiação difusa incidente.

Figura 5 - Desenho esquemático de coletor solar de calha parabólica



Fonte: Adaptado de Dabiri e Rahimi (2016)

Figura 6 - Desenho esquemático de coletor solar com concentrador parabólico composto



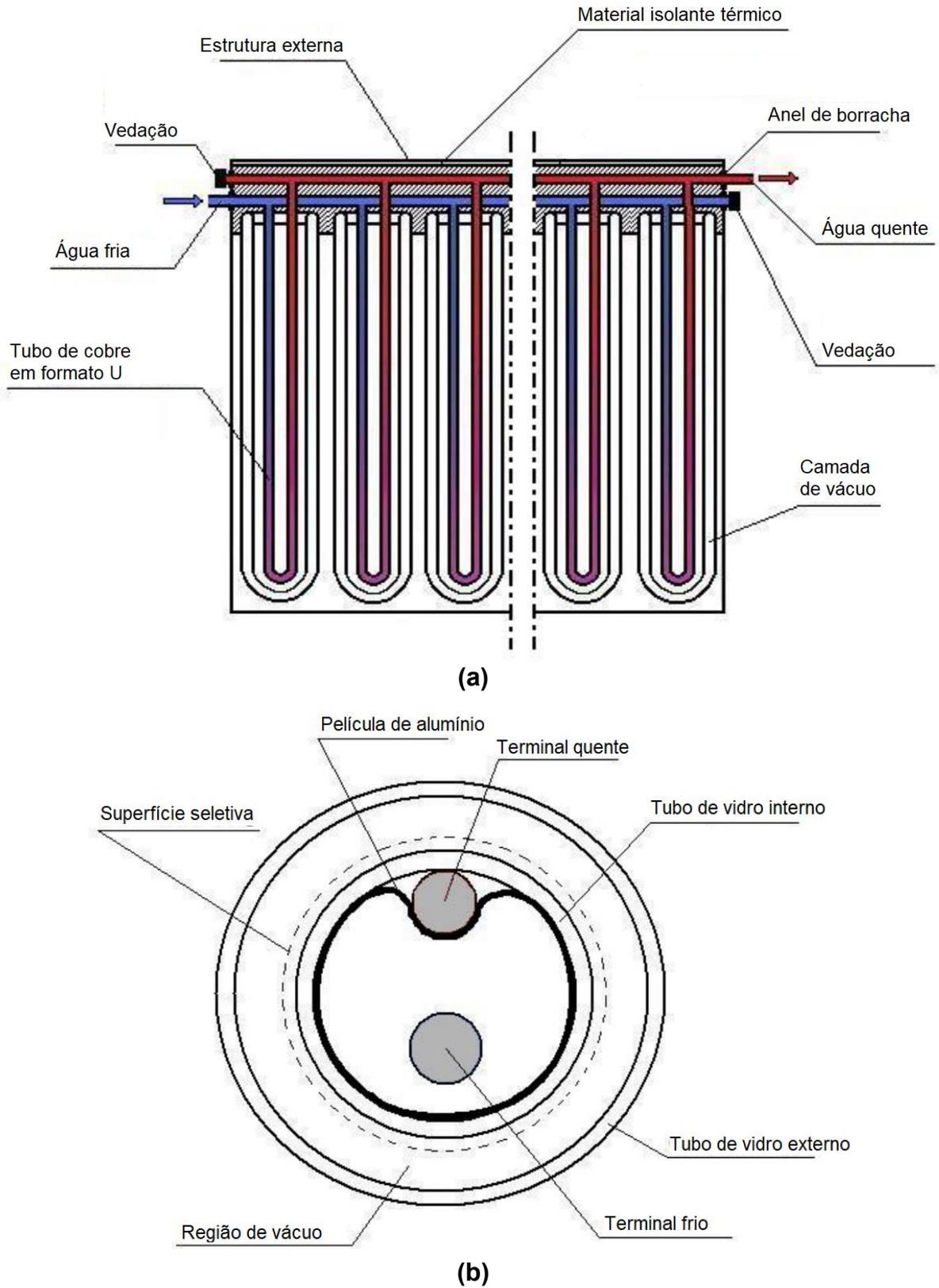
Fonte: Adaptado de Dabiri e Rahimi (2016)

#### 2.2.4 TUBO EM “U”

Os coletores solares do tipo tubo em “U”, semelhantemente aos dois tipos anteriormente citados, também possuem dois tubos concêntricos com uma região evacuada entre ambos (Figura 7 (b)) para diminuição das perdas térmicas, se diferenciando dos demais pela presença, no interior do tubo de menor diâmetro, de uma sequência de tubulações em formato de U (Figura 7 (a)) que permitem que água fria advinda de um reservatório desça por gravidade na tubulação posterior do coletor até a base do “U”, sofra aquecimento na tubulação frontal pela incidência da radiação solar e retorne ao reservatório ou ponto de uso por efeito termossifão.

Usualmente nesse tipo de coletor, como pode ser visto em detalhes na Figura 7 (b), apenas a tubulação frontal do “U” (terminal quente) recebe radiação solar em razão da presença de uma película refletiva em alumínio que isola a região na qual se encontra a tubulação posterior do “U” (terminal frio).

Figura 7 – Desenho esquemático do coletor solar do tipo Tubo em “U”. (a) Vista geral do coletor e (b) detalhe do corte transversal do tubo em “U”

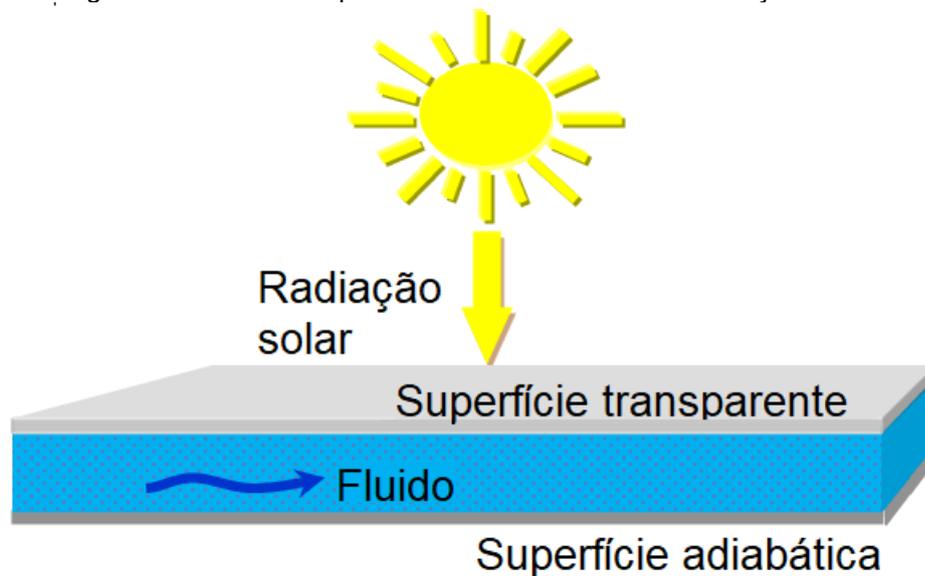


Fonte: Adaptado de Fang (2018)

### 2.2.5 ABSORÇÃO DIRETA

Diferentemente das demais configurações de coletores anteriormente expostos, os coletores solares de absorção direta não possuem superfícies seletivas, sendo seu princípio de funcionamento baseado na utilização de um fluido como meio de conversão fototérmica. O fluido de trabalho dos coletores solares de absorção direta (CSAD) é exposto à radiação solar através de uma superfície transparente, tendo a face oposta à da incidência de radiação isolada termicamente, conforme ilustra a Figura 8.

Figura 8 - Desenho esquemático do coletor solar de absorção direta



Fonte: Adaptado de Karami, Raisee e Delfani (2014)

Esse tipo de coletor, segundo Taylor et al. (2010), tem como características principais o fato de que, por se tratar de um processo de absorção direta, há uma diminuição das resistências térmicas do processo; além disso, essa configuração permite temperaturas mais homogêneas no coletor, o que implicaria em menores restrições construtivas de projeto; por último, é possível selecionar um fluido de trabalho que possua características ópticas semelhantes às superfícies seletivas para uma melhor eficiência do processo.

## 2.3 APLICAÇÃO DE NANOFLUIDOS EM COLETORES SOLARES

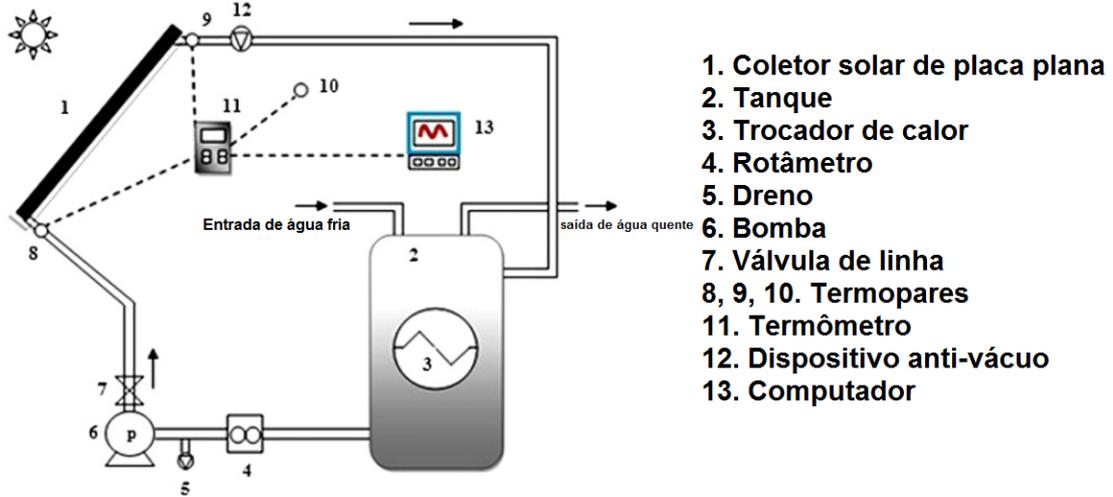
A aplicação de nanofluidos em coletores solares de diferentes tipos tem sido amplamente estudada, dessa maneira, neste tópico serão descritos alguns trabalhos de pesquisa realizados na área ao longo da última década, sendo separados segundo

o tipo de coletor solar estudado: placa plana, tubo evacuado, parabólico, tubo em “U” ou de absorção direta. Ao final, uma tabela-resumo das principais conclusões obtidas por cada autor é apresentada.

### **2.3.1 COLETORES SOLARES DE PLACA PLANA**

Yousefi et al. (2012a, 2012b, 2012c) investigaram experimentalmente o uso de nanofluidos de alumina ( $Al_2O_3$ ) em água (2012b) e nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) em água (2012a e 2012c) em coletores solares de placa plana, como apresentado na Figura 9. No estudo com nanopartículas de alumina(2012b), foram testadas duas concentrações de nanofluidos ( $\Phi_m=0,2$  e  $0,4\%$ ) escoando em três vazões diferentes (1, 2 e 3L/min), concluindo-se que o aumento da vazão gera um efeito positivo na eficiência do coletor e que a menor concentração apresentou o melhor desempenho (aumento de 28,3% na eficiência do coletor), além disso, a adição de surfactante ao nanofluido produzido foi capaz de aumentar em 15,63% a eficiência do coletor. Nos estudos de MWCNT em água, Yousefi e seus colegas avaliaram a influência da vazão, da concentração de nanopartículas e da adição de surfactante(2012c), além da variação do pH (3,5; 6,5 e 9,5) da dispersão(2012a). Nesses estudos observaram que o nanofluido menos concentrado ( $\Phi_m=0,2\%$ ) apresentou uma diminuição na eficiência do coletor quando comparado ao fluido base, enquanto o aumento na concentração de nanopartículas ( $\Phi_m=0,4\%$ ) e na vazão resultaram em um melhor desempenho; semelhantemente ao observado nos nanofluidos  $Al_2O_3$ /água, a adição de surfactante gerou efeito positivo na eficiência do coletor nas baixas diferenças de temperatura (entre o fluido na entrada do coletor e o ambiente); por fim, concluíram que o afastamento do pH da dispersão em relação ao ponto isoelétrico (pH=7,4) gerou um aumento da eficiência do coletor de placa plana testado.

Figura 9 – Bancada experimental utilizada nos trabalhos de Yousefi et al.(2012a, 2012b, 2012c). (a) Desenho esquemático e (b) foto do coletor de placa plana utilizado.



(a)

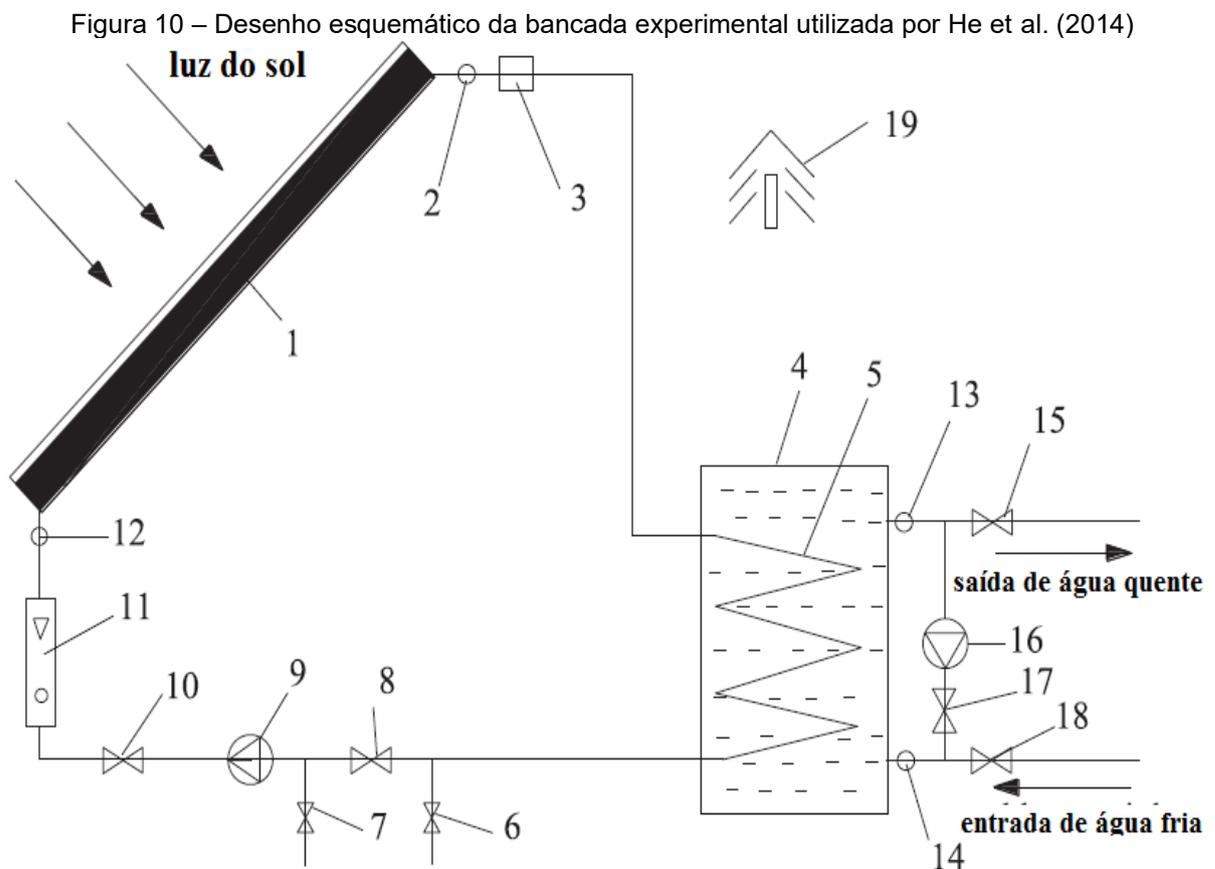


(b)

Fonte: Adaptado de Yousefi et al.(2012b)

Jamal-Abad et al. (2013) estudaram experimentalmente o uso de nanofluidos de cobre (Cu) em água em um coletor solar de placa plana com concentrações mássicas de 0,05 e 0,1%. A avaliação do desempenho do coletor foi realizada em torno do meio-dia solar, notando-se uma relação de aumento da eficiência com o aumento da quantidade de nanopartículas no fluido base, atingindo valores 19% ( $\Phi_m=0,05\%$ ) e 29% ( $\Phi_m=0,1$ ) superiores aos resultados obtidos pelo sistema operando com água destilada.

Semelhantemente ao trabalho de Jamal-Abad et al. (2013), He et al. (2014) também avaliaram experimentalmente o uso de nanofluidos de Cu em água em um coletor solar de placa plana, no entanto, utilizaram duas concentrações mássicas ( $\Phi_m=0,1$  e  $0,2\%$ ) e dois tamanhos de nanopartícula (25 e 50nm), em um aparato conforme Figura 10. Obtiveram no estudo um aumento de 23.83% na eficiência do coletor operando com nanofluido de menor concentração e menor tamanho de nanopartícula, observando que a eficiência diminui com o aumento do tamanho da partícula, e, na análise da máxima temperatura atingida e no ganho de calor da água do tanque foram obtidos aumentos de 12.24% e 24.52%, respectivamente, quando comparados com os resultados do sistema operando com água destilada.



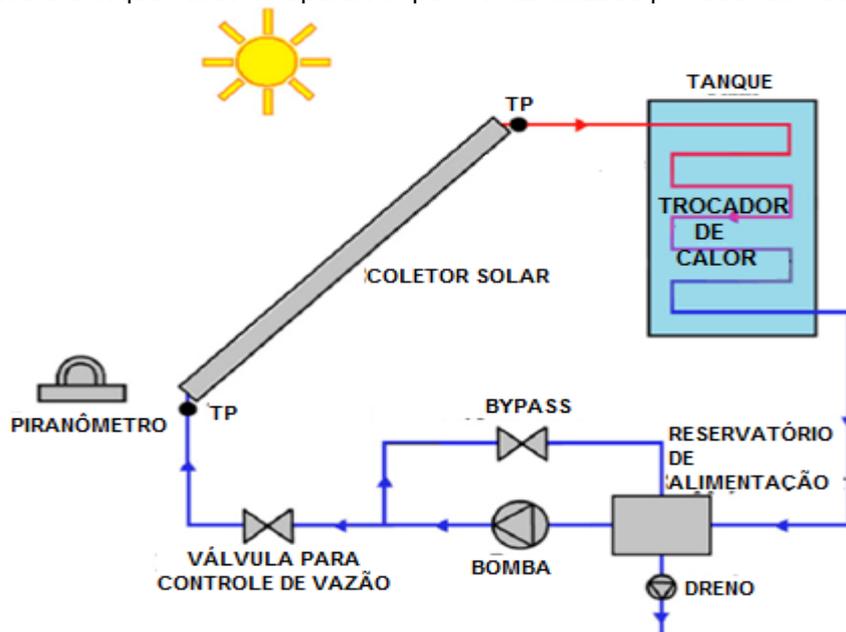
**1-Coletor solar de placa plana; 2/12/13/14-Termopares; 3-Purgador; 4-Reservatório de água  
5-Trocador de calor; 6/7/8/10/15/17/18-Válvulas; 11-Medidor de vazão; 9/16-Bomba d'água  
19-Termômetro de resistência de platina**

Fonte: Adaptado de He et al.(2014).

Salavati Meibodi et al. (2015) avaliaram experimentalmente três concentrações volumétricas (0,5, 0,75 e 1%) de nanofluidos de óxido de silício ( $\text{SiO}_2$ ) dispersos em uma mistura de água e etilenoglicol (50%/50%) em um coletor solar de placa plana. A

eficiência do coletor foi avaliada variando-se a vazão mássica de escoamento entre 0,018 e 0,045 kg/s. Concluíram que o parâmetro de energia removida do coletor diminui com o aumento da vazão mássica e que a adição de nanopartículas ao fluido base possibilita um aumento da eficiência entre 4 e 8%. Adicionalmente, observaram que as eficiências térmicas associadas às duas concentrações volumétricas mais altas são muito próximas, indicando que o melhor custo-benefício seria atingido na utilização do nanofluido com concentração intermediária ( $\Phi_v=0,75\%$ ).

Figura 11 – Desenho esquemático do aparato experimental utilizado por Salavati Meibodi et al. (2015)



Fonte: Adaptado de Salavati Meibodi et al.(2015).

Verma et al. (2016) realizaram um estudo experimental da aplicação de nanofluidos de MgO em água em coletor solar de placa plana exposto à radiação solar artificial variando a concentração volumétrica de nanopartículas entre 0,25 e 1,5% e a vazão entre 0,5 e 2,5L/min. Foi observado um aumento nas eficiências térmica e exergética de 9,34% e 32,23%, respectivamente, para o nanofluido de concentração 0,75% escoando a uma vazão de 1,5L/min, em contrapartida, observou-se um aumento da potência de bombeamento de 6,84%. Concluíram existir uma concentração ótima de aplicação dos nanofluidos estudados baseados na queda da eficiência do coletor nos testes com concentrações acima de 0,75%.

Figura 12 – Foto da bancada experimental utilizada por Verma et al.(2016).



Fonte: Adaptado de Verma et al.(2016).

Vincely e Natarajan (2016) avaliaram experimentalmente o uso de nanofluidos de óxido de grafeno em água ( $\Phi_m=0,005\%$ ,  $0,01\%$  e  $0,02\%$ ) em um coletor solar de placa plana de  $2\text{m}^2$  de área de absorção. Os testes foram conduzidos sob regime laminar de escoamento, com vazões mássicas variando entre  $0,0067$  e  $0,0167$  kg/s, em que os fluidos de trabalho provenientes do coletor eram utilizados para aquecimento de água em um trocador de calor do tipo tubo concêntrico. Observaram aumentos máximos para o coeficiente de transferência de calor de  $8,03\%$ ,  $10,93\%$  e  $11,5\%$  para os nanofluidos da menor à maior concentração, respectivamente. Concluíram que a eficiência do coletor aumenta com a fração mássica e com o aumento da vazão, atingindo o máximo para o nanofluido de concentração  $0,02\%$  na vazão  $0,0167$  Kg/s, sendo esse resultado  $7,3\%$  superior ao do fluido base.

Tong et al. (2019) estudaram experimentalmente o uso de nanofluidos de alumina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) e óxido de cobre ( $\text{CuO}$ ) em água em um coletor solar de placa plana. Foram estudadas amostras em concentrações volumétricas que variaram entre  $0,5$  e  $1,5\%$  para os nanofluidos de alumina com diâmetro de nanopartícula de  $20$  nm e entre  $0,1$  e  $0,7\%$  para os de cobre com diâmetro de  $40\text{nm}$ . Os autores observaram um aumento da eficiência energética e exergética até uma concentração ótima de  $1\%(\text{Al}_2\text{O}_3)$  e  $0,5\%(\text{CuO})$ , havendo diminuição da estabilidade e da eficiência para as amostras em concentrações superiores. Assim, a máxima eficiência obtida pelos fluidos estudados foi  $77,5\%(\text{Al}_2\text{O}_3, \Phi_v=1\%)$ ,  $73,9\%(\text{CuO}, \Phi_v=0,5\%)$  e  $63,6\%$ (água).

Eitaweel e Abdel-Rehim (2019) avaliaram o uso de nanofluidos de MWCNT em água em três diferentes concentrações mássicas ( $0,01\%$ ,  $0,05\%$  e  $0,1\%$ ) e compararam o emprego de circulação forçada e efeito termossifão. Concluíram que

os nanofluidos proporcionam melhora da eficiência do sistema de forma crescente para as três concentrações testadas, sendo inclusive o desempenho dos nanofluidos em escoamento por termossifão superior ao da água em circulação forçada. Destacaram que a máxima eficiência energética (70,67%) e exergética (23,35%) foram obtidas pelo nanofluido de maior concentração testado ( $\Phi_m=0,1\%$ ).

Rajput et al.(2019) estudaram experimentalmente a aplicação de nanofluidos de alumina( $Al_2O_3$ ) em água em concentrações volumétricas variando entre 0,1 e 0,3%(utilizando como surfactante dodecil sulfato de sódio) em um coletor de placa plana variando a vazão entre 1 e 3 L/min. Os autores observaram o aumento da eficiência com a vazão empregada e com a concentração volumétrica de nanofluido, sendo que o nanofluido mais concentrado ( $\Phi_v=0,3\%$ ) obteve uma eficiência máxima 21,32% superior ao da amostra menos concentrada ( $\Phi_v=0,1\%$ ) na vazão de 3L/min.

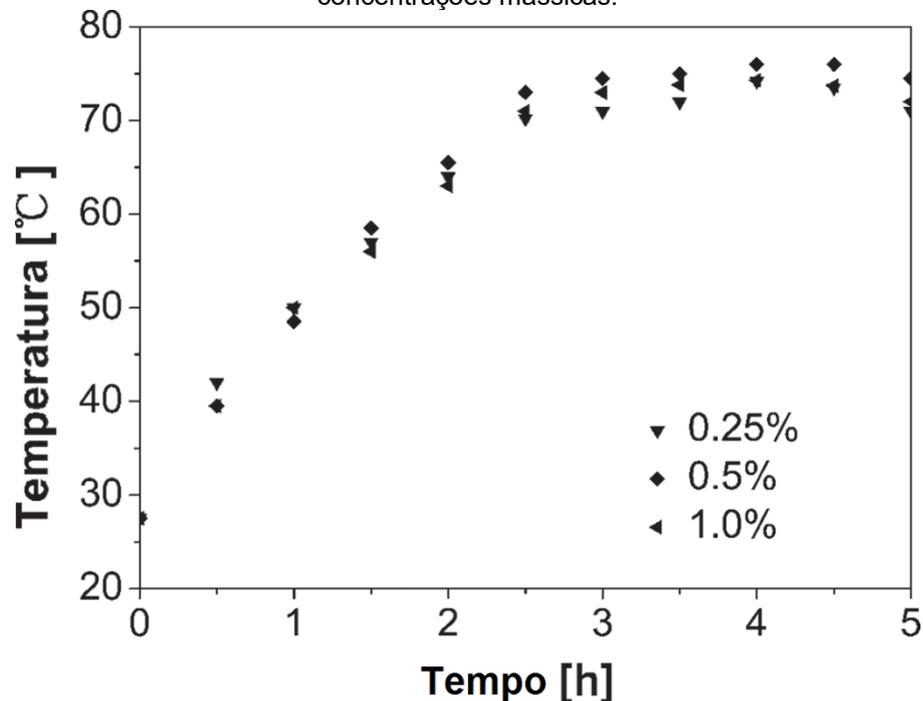
Moravej et al. (2020) avaliaram experimentalmente o uso de nanofluidos de óxido de titânio ( $TiO_2$ ,  $\Phi_m=1, 3$  e  $5\%$ ) em água em um coletor solar de placa plana. A avaliação do desempenho foi realizada considerando a variação da vazão mássica, a radiação incidente, e a variação de concentração de nanopartículas no fluido base. Concluíram que a eficiência aumenta com a adição de nanopartículas à água e que esse efeito se torna mais evidente à medida que se aumenta a radiação incidente ou a vazão mássica, atingindo valores máximos 17,41%, 27,09% e 33,54% superiores ao da água destilada nos testes com amostras de concentração mássica 1%, 3% e 5%, respectivamente.

Akram et al. (2021) realizaram um estudo experimental do uso de nanofluidos de ZnO,  $SiO_2$  e nanopartículas funcionalizadas de grafeno(f-GNPs) em água em concentrações volumétricas variando entre 0,05% e 0,2% para uso em um coletor solar de placa plana. As amostras produzidas tiveram a estabilidade avaliada através de espectrofotometria UV-visível, sendo observado que as amostras produzidas a partir de nanopartículas de grafeno ficaram estáveis por sessenta dias e as de óxidos por trinta dias. Adicionalmente a condutividade térmica dos nanofluidos foi avaliada, apresentando resultados 11,49%( $SiO_2$ ), 15,42%(ZnO) e 25,68%(f-GNPs) superiores ao da água destilada. A avaliação de desempenho no coletor solar foi realizada em diferentes vazões mássicas (0,8, 1,2 e 1,6 kg/min) e evidenciou o aumento da com a vazão, atingindo incrementos máximos relativos ao fluido base de 12,36% ( $SiO_2$ ), 13,05% (ZnO) e 17,45% (f-GNPs).

### 2.3.2 COLETORES SOLARES DE TUBO EVACUADO

He et al. (2011) estudaram experimentalmente o uso de nanofluidos de TiO<sub>2</sub> ( $\Phi_m=4,3\%$ ) e CNT em água ( $\Phi_m=0,25, 0,5$  e  $1\%$ ) em coletores solares de tubo evacuado. Foram avaliadas a influência da concentração mássica e da natureza de nanopartícula utilizada, além das condições de teste (nublada e ensolarada). Concluiu-se que os nanofluidos de nanotubo de carbono possuem características superiores de conversão fototérmica comparado ao de TiO<sub>2</sub>, sendo ambos superiores ao fluido base; além disso, como ilustra a Figura 13, o nanofluido CNT/água de concentração intermediária ( $\Phi_m=0,5\%$ ) apresentou os melhores resultados, indicando a existência de uma quantidade ideal de nanopartículas a ser adicionada ao fluido base para obter-se melhores resultados de conversão fototérmica.

Figura 13 - Evolução temporal da temperatura de nanofluidos de CNT em Água em diferentes concentrações mássicas.



Fonte: Adaptado de He et al.(2011).

Sabiha et al. (2015) investigaram experimentalmente o uso de nanofluidos de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) em água em um coletor solar do tipo tubo evacuado, como apresentado na Figura 14. A vazão mássica foi variada (0,008, 0,017, e 0,025 kg/s), bem como a concentração de nanopartículas utilizada ( $\Phi_v=0,05, 0,1$  e  $0,2\%$ ). A condutividade térmica e o calor específico dos fluidos foram avaliados, assim como a eficiência do coletor testado. Os resultados obtidos indicam

que a condutividade térmica e a eficiência aumentam com a concentração de nanopartículas, ao passo que o calor específico diminui, além disso, todas as amostras produzidas apresentaram desempenho térmico superior ao dos testes com água destilada, sendo a maior eficiência dos testes com nanofluidos (93,43%, obtida pela amostra de concentração 0,2% operando na maior vazão mássica 0,025kg/s), muito superior ao resultado obtido nas mesmas condições pelo fluido base (54,37%).

Figura 14 – Coletor solar de tubo evacuado utilizado por Sabiha et al. (2015)



Fonte: Adaptado de Sabiha et al.(2015).

Ghaderian e Sidik (2017) estudaram a influência do uso de nanopartículas de  $Al_2O_3$  dispersas em água em duas diferentes concentrações volumétricas (0,03 e 0,06%) em um coletor solar do tipo tubo evacuado. A vazão mássica no coletor foi variada (20, 40 e 60 L/h) e seu aumento causou uma melhora na eficiência do coletor para todos os fluidos estudados. A adição de nanopartículas à água também gerou maiores valores de eficiência do coletor, atingindo o máximo de 57,63% para a amostra mais concentrada na maior vazão mássica testada. A máxima temperatura de saída do coletor, assim como a maior variação de temperatura, foi obtida através da utilização do nanofluido mais concentrado (0,06% em volume) associado ao emprego da menor vazão mássica testada (20L/h).

Iranmanesh et al. (2017) investigaram experimentalmente o uso de nanofluidos de grafeno em água em diferentes concentrações mássicas (0,025%, 0,05%, 0,075% e 0,1%) em um coletor solar do tipo tubo evacuado no qual a vazão volumétrica era variada (0,5, 1,0 e 1,5 L/min). Concluíram que o aumento na massa de nanopartículas

dispersas no fluido base aumentava o ganho de energia do sistema e possibilitava temperaturas de saída do fluido superiores, além disso, os resultados indicaram que o coletor solar poderia atingir valores de eficiência térmica de até 90,7% a uma vazão de 1,5 L/min quando o nanofluido mais concentrado foi utilizado como meio de absorção da radiação.

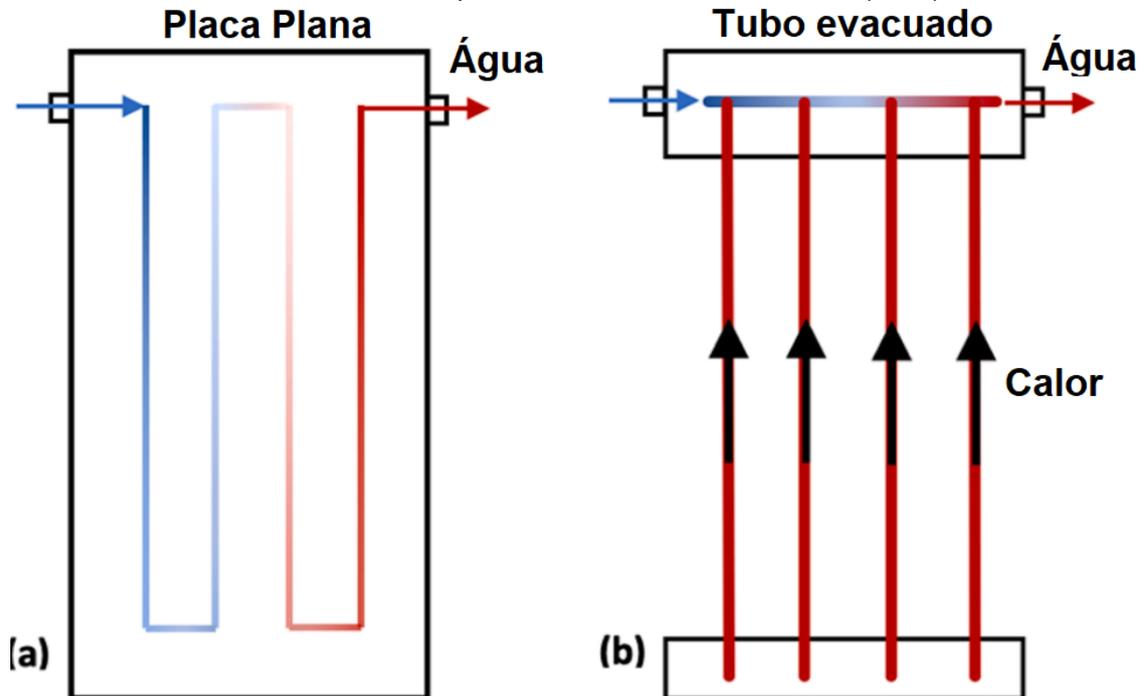
Mahbubul et al. (2018) investigaram a utilização de nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes simples (SWCNT) em água em três concentrações volumétricas (0,05, 0,1 e 0,2%) em coletores solares do tipo tubo evacuado. Foram obtidos resultados de eficiência do coletor até 10% maior (comparado ao uso de água destilada como fluido de trabalho) utilizando o nanofluido com concentração volumétrica de 0,2%. Observaram que a eficiência do coletor aumentou com a concentração de nanopartículas no fluido base e que, experimentalmente, o aumento da vazão mássica, como fator isolado, não apresentou uma tendência clara sobre os resultados. Concluíram também que o aumento na intensidade de radiação incidente impactava positivamente na eficiência do coletor até um determinado ponto, determinado pelos autores como sendo  $900 \text{ W/m}^2$ .

Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2020) realizaram um estudo experimental acerca do uso de nanofluidos de MWCNT em água em três concentrações mássicas (0,005%, 0,01% e 0,05%) em um coletor solar de tubo evacuado variando-se a vazão volumétrica entre 1 e 3,5L/min. Concluíram que a eficiência energética e exergética do coletor aumenta com a concentração de nanopartículas e com a vazão, atingindo os maiores valores médios de 55% (energética) e 10% (exergética) na concentração de 0,05%. Adicionalmente observaram que coeficiente de perda global de calor diminui com a adição de nanopartículas ao fluido base e que a vazão de 2L/min foi considerada crítica para o sistema, em razão do fator de remoção de calor e do coeficiente de perda global de calor se comportarem de forma diferente antes e depois de atingir-se essa vazão.

Seguindo a linha de pesquisa anterior, Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia expandiram o estudo em 2021, avaliando comparativamente o desempenho dos nanofluidos de MWCNT em água tanto no coletor solar de tubo evacuado quanto em um coletor solar de placa plana, ambos de mesma área de absorção nominal, tendo concluído que a eficiência energética e exergética foram maiores no coletor solar de placa plana (59% e 11,5%) do que no coletor solar de tubo evacuado (55% e 10%) usando nanofluido com concentração mássica de 0,05%, resultado atribuído à maior

área útil de troca térmica do coletor solar de placa plana, que opera em formato de serpentina, como ilustra a Figura 15(a). Além disso, observaram que, ao se utilizar nanofluidos de MWCNT/água, seria possível uma redução na área dos coletores de placa plana e tubo evacuado de 26,7% e 29,5%, respectivamente.

Figura 15 – Diagrama esquemático de fluxo de líquido nos coletores de (a) placa plana e (b) tubo evacuado utilizados por Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021).

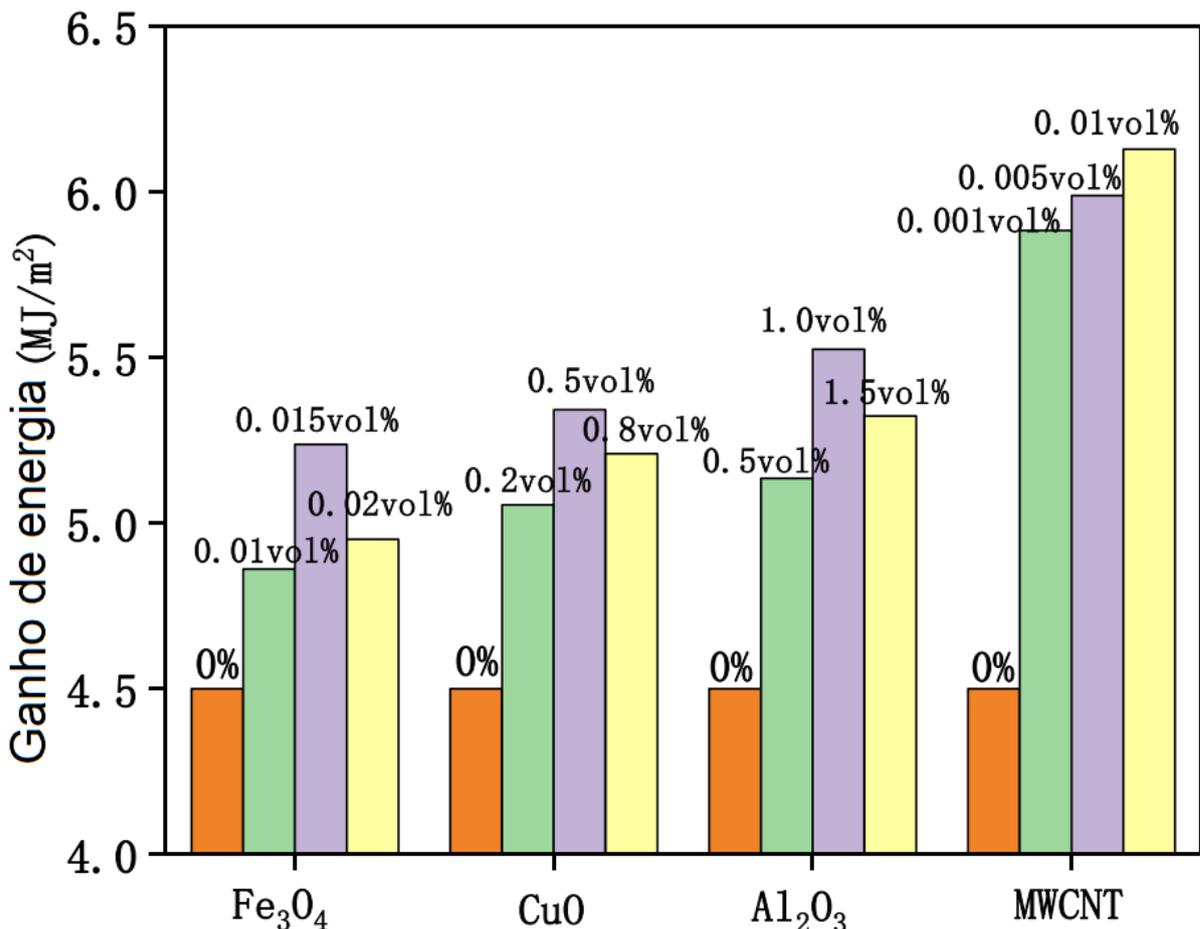


Fonte: Adaptado de Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021).

Henein e Abdel-Rehim (2022) avaliaram o uso de nanofluidos de MWCNT, MgO em água em concentrações mássicas entre 0,005% e 0,02% em um coletor solar de tubo evacuado, além da mistura entre as duas nanopartículas, compondo um nanofluido híbrido de MgO-MWCNT em diferentes proporções (80:20, 70:30, 60:40 e 50:50). A vazão mássica no coletor foi variada entre 1 e 3L/min. Os autores concluíram que a presença de nanopartículas no fluido base melhora a transferência de calor do fluido de trabalho, além disso, o desempenho das nanopartículas de MWCNT se mostrou superior às de MgO, resultando em aumento crescente da eficiência nos nanofluidos híbridos à medida que foi aumentada a proporção de MWCNT da mistura. Observaram, também, o aumento da eficiência com a vazão volumétrica, resultando em um aumento na eficiência energética de 55,83% e exergética de 77,14% na maior vazão testada para o nanofluido MgO-MWCNT/água (50:50).

Tong et al. (2023) estudaram experimentalmente o uso em um coletor solar de tubo evacuado de nanofluidos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  e MWCNT em água em variadas concentrações volumétricas escoando a uma vazão mássica fixa de 0,047 kg/s. A eficiência do coletor e o ganho de energia ao longo de um dia de testes foi avaliado. Observou-se a existência de uma concentração ótima para aplicação das nanopartículas utilizadas, comportamento evidenciado na Figura 16 através do ganho de energia mais alto nas concentrações intermediárias de nanofluidos de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$  e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  testadas. Os autores concluíram também que a máxima eficiência do coletor foi atingida pelo nanofluido de MWCNT/água na radiação incidente de  $750\text{W}/\text{m}^2$ , sendo esse resultado 24,7%, 9,2%, 7,9% e 5,7% superior aos resultados da água e concentrações ótimas de  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  ( $\phi_v=0,015\%$ ),  $\text{CuO}$  ( $\phi_v=0,5\%$ ) e  $\text{Al}_2\text{O}_3$  ( $\phi_v=1,0\%$ ), respectivamente.

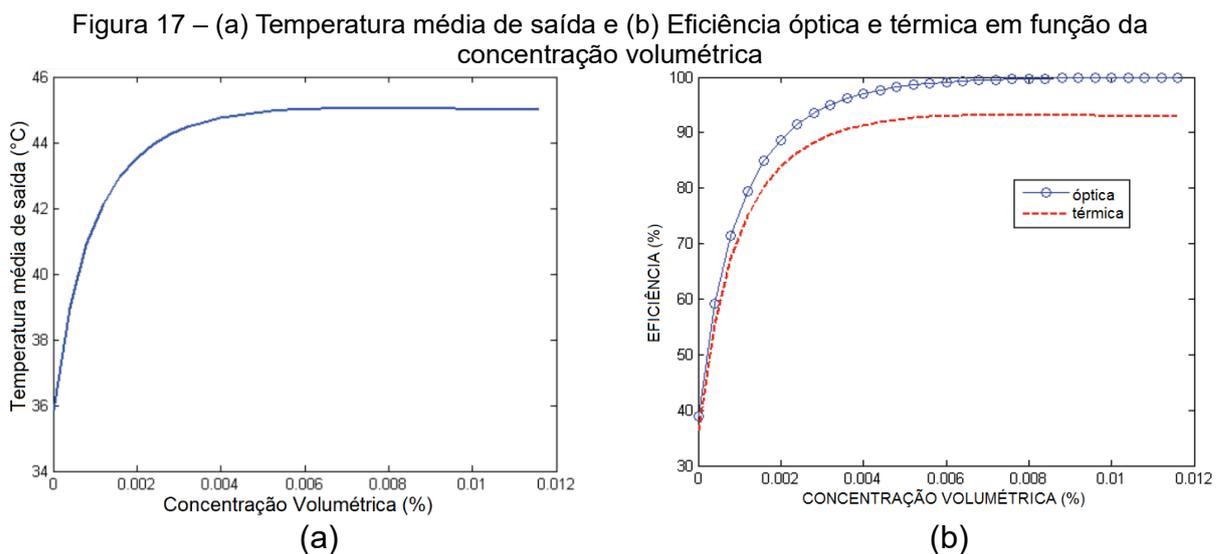
Figura 16 – Energia ganha ao longo de um dia para nanofluidos testados em diferentes concentrações no trabalho de Tong et al. (2023).



Fonte: Adaptado de Tong et al. (2023).

### 2.3.3 COLETORES SOLARES PARABÓLICOS

Khullar e Tyagi (2010) estudaram numericamente o uso de nanofluidos de alumínio em água em diferentes concentrações em coletores solares do tipo calha parabólica. Os aspectos relativos à transferência de calor e escoamento foram analisados considerando-se parâmetros como a razão de concentração solar do coletor, o comprimento do receptor, a velocidade do fluido e a concentração volumétrica de nanopartículas. Na análise dos perfis de temperatura, eficiências ótica e térmica e temperatura média de saída o coletor operando com nanofluidos apresentou resultados superiores ao coletor tradicional. Observou-se, em especial, que as eficiências e temperatura média de saída apresentaram significativos aumentos até a concentração volumétrica de 0,004%, tendendo a um valor constante para concentrações maiores, como ilustra a Figura 17. Além disso, o aumento da velocidade de escoamento e diminuição do comprimento do coletor resultaram em menores temperaturas de saída e maior eficiência do sistema, enquanto a razão de concentração solar apresentou relação linear crescente com a temperatura média de saída.



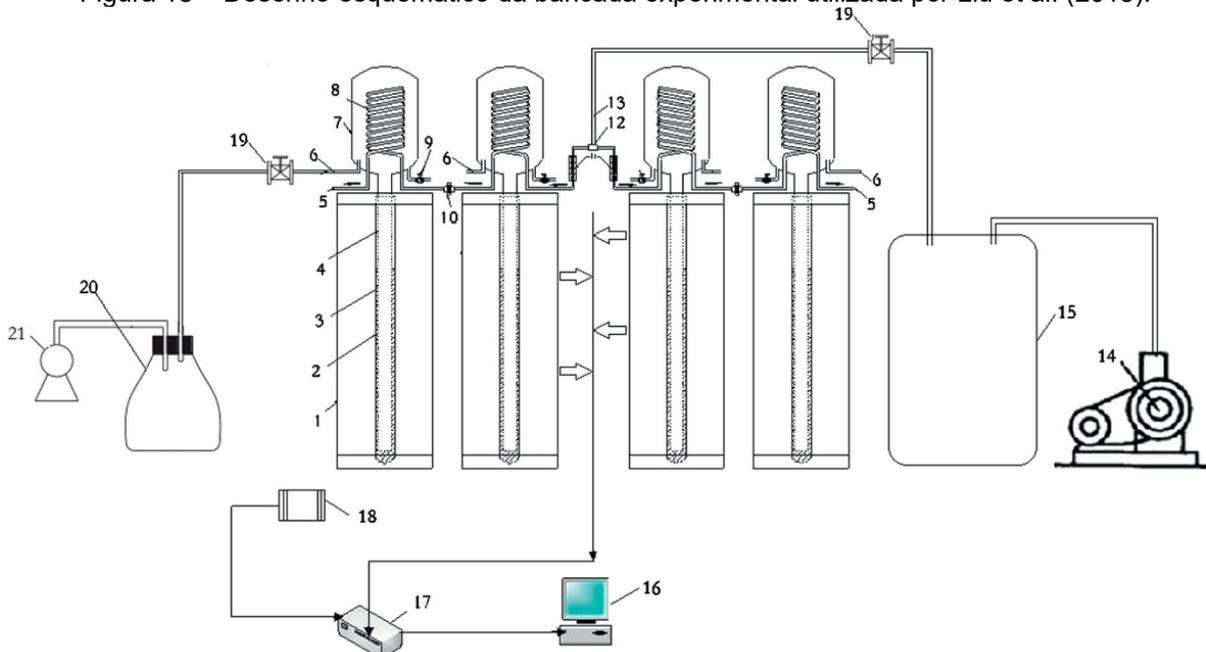
Fonte: Adaptado de Khullar e Tyagi (2010)

Seguindo a mesma linha de pesquisa em 2012, Khullar et al. avaliaram numericamente o uso de nanofluido de alumínio ( $\phi_v=0,05\%$ ) em Therminol-VP1 em coletor solar do tipo calha parabólica de forma comparativa a resultados experimentais de um coletor de calha parabólica tradicional. Parâmetros como a intensidade e o ângulo da radiação solar incidente e o coeficiente de transferência de calor por

convecção foram analisados, levando à conclusão de que o uso de nanofluidos possibilitaria um aumento na eficiência do sistema entre 5 e 10%.

Liu et al. (2013) estudaram experimentalmente o uso de nanofluidos de óxido de cobre (CuO) em água em um coletor solar com concentrador parabólico composto para aquecimento de ar, conforme Figura 18. Foram estudados paralelamente dois sistemas idênticos, um operando com nanofluido como fluido de trabalho e o segundo, com o fluido base, água. Foram testadas quatro concentrações mássicas variando entre 0,8% e 1,5%. Concluíram que o coeficiente de transferência de calor foi maior para todos os nanofluidos testados quando comparados aos resultados da água destilada, apresentando aumento com a concentração até o valor de 1,2%, e uma diminuição para a concentração mais alta testada ( $\phi_m=1,5\%$ ), indicando a existência de uma concentração ótima para essa aplicação que resultaria num aumento da eficiência máxima e média do sistema em 6,6% e 12,4%, respectivamente.

Figura 18 – Desenho esquemático da bancada experimental utilizada por Liu et al. (2013).



**1-CPC simplificado; 2-Tubo de vidro evacuado; 3-Material condutor de calor; 4-Tubo evaporador; 5-saída de ar; 6-Tubo de exaustão; 7-caixa de vapor; 8-Serpentina; 9-Válvula 10-Junção; 11-Medidor de vazão; 12-Válvula de 3 vias; 13-Entrada de ar; 14-Compressor; 15-Tanque pressurizado; 16-Computador; 17-Sistema de aquisição de dados; 18- Medidor de radiação solar; 19-Válvula; 20-Caixa reguladora; 21-Bomba de vácuo**

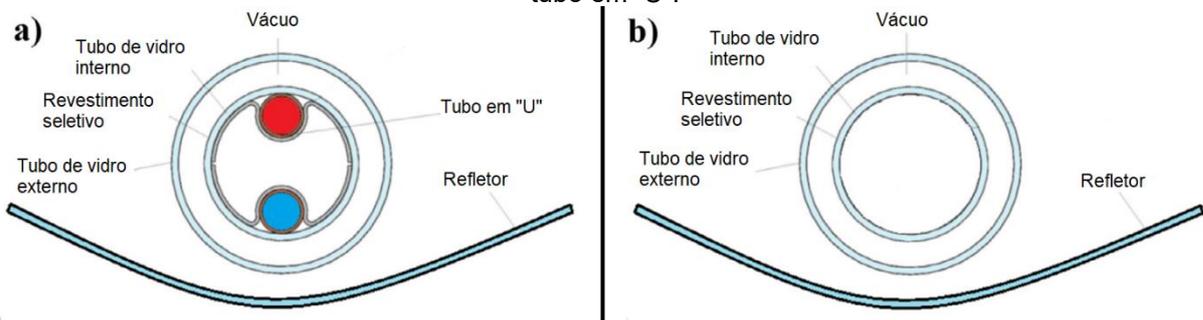
Fonte: Adaptado de Liu et al. (2013)

Hosseini e Dehaj (2021) realizaram um estudo experimental do uso de nanofluidos de óxido de grafeno (GO) e  $Al_2O_3$  ( $\phi_m=0,2\%$ ) em água em um coletor

solar de calha parabólica com absorvedor do tipo tubo em “U”, sendo a vazão volumétrica de escoamento variada (1, 3 e 5 L/min) nos testes. Os autores concluíram que o desempenho dos nanofluidos foi negativamente afetada pelo aumento da vazão, sendo esse efeito mais notável para o nanofluido de óxido de grafeno, que apresentou na vazão mais alta (5L/min) um resultado inferior ao da água destilada, no entanto, na vazão mais baixa (1L/min), a eficiência dos nanofluidos foi 32,1% e 63,2% superior ao do fluido base.

Ampliando o estudo anterior, Dehaj et al. (2021) investigaram nanofluidos de  $\text{NiFe}_2\text{O}_4$  em água, avaliando comparativamente o seu desempenho em um coletor solar de calha parabólica com e sem o uso de um absorvedor do tipo tubo em “U”, conforme ilustra a Figura 19. A vazão volumétrica foi variada (0,5, 1,5 e 3 L/min), assim como a concentração de nanopartículas (0,01 e 0,05% em volume). Diferentemente do observado no trabalho anterior, observaram um aumento da eficiência do coletor com a vazão empregada. Além disso, o desempenho de todos os fluidos foi superior ao se utilizar o absorvedor com tubo em “U”, atingindo com sua utilização eficiências de 34%, 40% e 47% para água e nanofluidos com concentrações 0,01% e 0,05% e 28%, 38% e 40%, respectivamente, no coletor sem tubo em “U”.

Figura 19 – Esquema do absorvedor utilizado por Dehaj et al. (2021) (a) com tubo em “U” e (b) sem tubo em “U”.



Fonte: Adaptado de Dehaj et al. (2021).

Zidan, Maia e Safaei (2022) avaliaram numericamente o desempenho de nanofluidos de variadas nanopartículas de óxidos ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ,  $\text{MnFe}_2\text{O}_4$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$ ) em Therminol VP-1 em um coletor solar do tipo calha parabólica que operava como fonte externa de calor de um Ciclo Rankine Orgânico (CRO). A avaliação foi realizada considerando concentrações volumétricas de nanopartículas variando entre 0,5 e 2,0%. Os autores observaram que as maiores eficiências médias anuais do ciclo foram obtidas com nanofluidos  $\text{TiO}_2$ (28,56%) e

MgO(28,53%). Além disso, o nanofluido de TiO<sub>2</sub> na maior concentração avaliada ( $\phi_v=2,0\%$ ) se mostrou o mais adequado ao uso no coletor, atingindo 33,20 MW e 95,35% de energia útil e eficiência média anual, respectivamente, e resultando para o CRO 9,42 MW de potência líquida e uma eficiência de 28,56%.

Joseph e Thomas (2022) investigaram experimentalmente o uso de nanofluidos de ponto quântico de carbono(C-dot) em água para aplicação em coletor solar de calha parabólica. Foram realizadas análises energéticas e de corrosão variando-se a vazão do escoamento entre 60 e 90L/H, tendo sido concluído que a eficiência do coletor aumenta com a vazão empregada e que, para os fluidos escoando a 90L/h, a máxima e mínima eficiências registradas para o nanofluido (73,41% e 44,67%) foram, respectivamente, 57,62% e 34,85% superiores aos resultados obtidos pelo fluido base. Além disso, a máxima temperatura de saída, 43,49°C, foi obtida pelo nanofluido na menor vazão testada (60 L/h), sendo esse resultado significativamente superior ao da água (33,33°C). Na análise de corrosão, a presença das nanopartículas C-dot resultou em um efeito protetor à superfície avaliada, apresentando uma taxa de corrosão de 0,094 mm/ano, contra 0,372 mm/ano da água destilada.

#### **2.3.4 COLETORES SOLARES TUBO EM “U”**

Tong et al. (2015) avaliaram o desempenho de nanofluidos de MWCNT em água, com concentrações volumétricas variando entre 0,06 e 0,24%, através do aparato experimental composto por dois trocadores de calor e um coletor solar do tipo tubo em “U” evacuado, conforme ilustra esquematicamente a Figura 20. Concluíram que a adição de nanopartículas à água resulta num aumento dos coeficientes de transferência de calor e na melhora do desempenho do sistema testado, tendo o nanofluido de maior concentração ( $\phi_v=0,24\%$ ) obtido um aumento de 8% na transferência de calor.

Figura 20 – Esquema da bancada experimental construída por Tong et al. (2015)



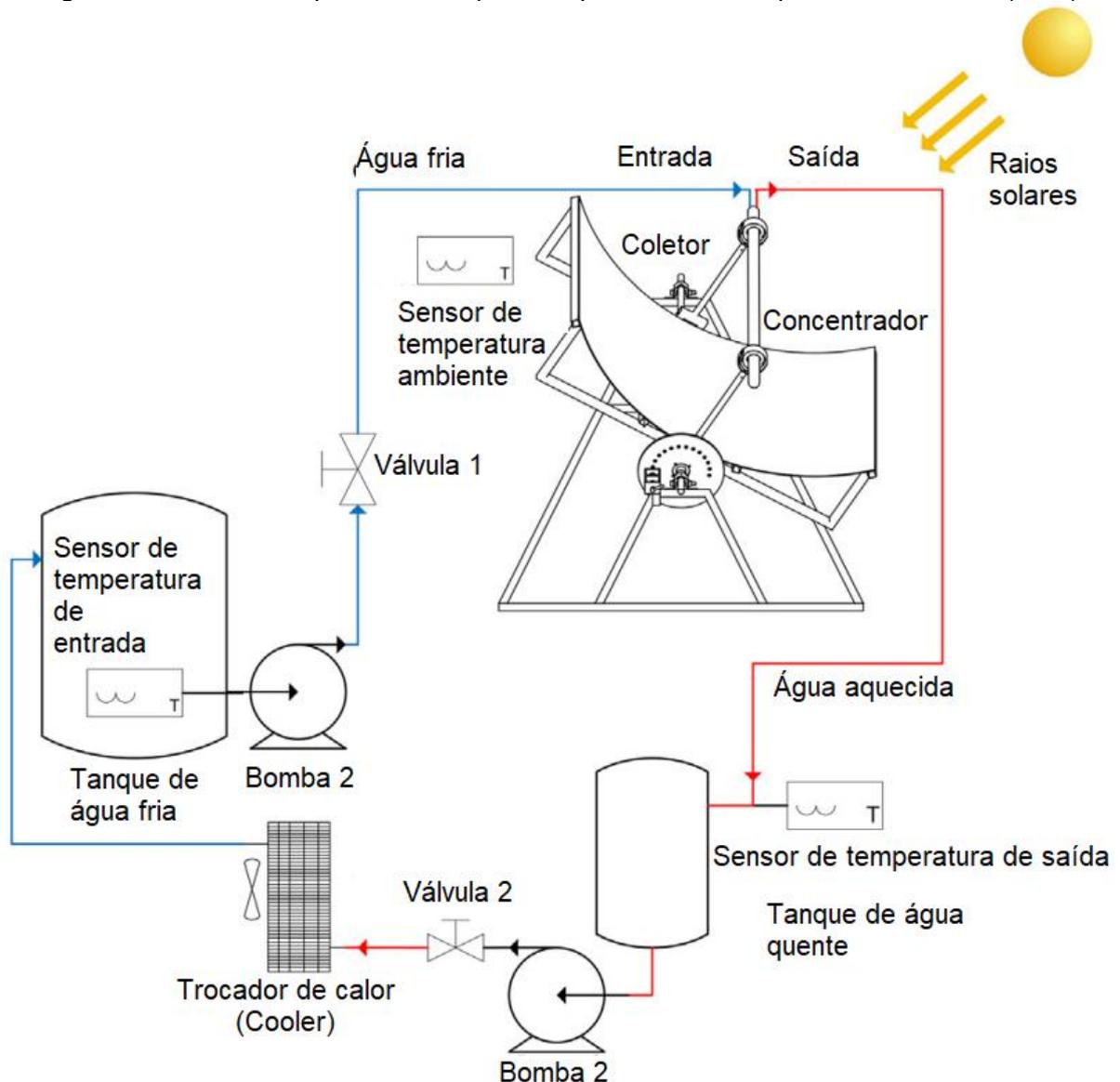
Fonte: Adaptado de Tong et al.(2015).

Kim et al. (2016) realizaram um estudo teórico sobre o uso em coletor solar do tipo tubo em “U” de diversas nanopartículas de óxidos ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CuO}$ ,  $\text{SiO}_2$  e  $\text{TiO}_2$ ) e MWCNT dispersas em uma mistura de água e propilenoglicol (proporção 80%:20%). Concluíram que há um aumento da condutividade térmica dos fluidos com o aumento da concentração volumétrica empregada e que a eficiência do coletor aumenta com o uso de nanofluidos na seguinte ordem, do melhor ao pior desempenho: MWCNT,  $\text{CuO}$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $\text{TiO}_2$  e  $\text{SiO}_2$ . O nanofluido de MWCNT ( $\phi_v=0,2\%$ ) apresentou a melhor eficiência (62,8%), sendo 10,5% superior ao obtido pelo fluido base nas mesmas condições.

Natividade et al. (2019) estudaram experimentalmente o uso de nanofluidos de grafeno multicamada em água em duas concentrações volumétricas diferentes (0,00045 e 0,00068%) em um coletor solar de tubo único em “U” modificado de maneira a possibilitar testes com o uso conjunto de um concentrador de calha parabólica, conforme esquematizado na Figura 21, que se manteve coberto com uma capa preta nos testes sem concentrador. Concluíram que a eficiência aumenta com o uso do concentrador parabólico e com a adição de nanopartículas, sendo as máximas eficiências atingidas pela água com e sem uso de concentrador de 19,1% e 4,8%,

respectivamente, e de 25,0% e 33,6% para os nanofluidos testados com uso de concentrador na menor e maior concentração.

Figura 21 – Desenho esquemático do aparato experimental usado por Natividade et al. (2019)

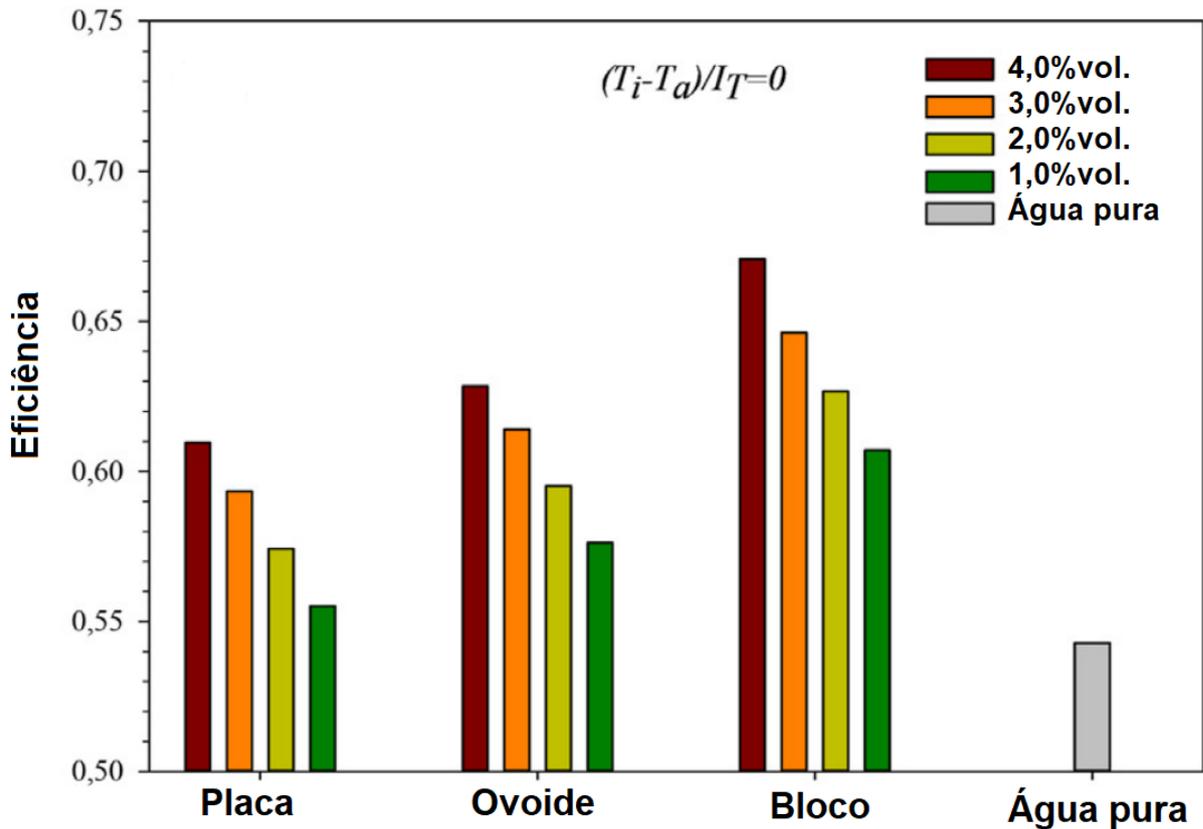


Fonte: Adaptado de Natividade et al.(2019).

Kaya, Alkasem e Arslan (2020) avaliaram numericamente a aplicação de nanofluidos de  $Al_2O_3$  em água em um coletor de tubo em “U”. Foi estudado a influência do formato da nanopartícula (ovoide, bloco e placa), da concentração volumétrica (1, 2, 3 e 4%) e da vazão de fluido (0,01, 0,015 e 0,025 kg/s). Obtiveram que a eficiência do coletor aumenta com a vazão mássica, com a concentração de nanopartículas e que o formato de bloco propicia o melhor desempenho, como ilustra a Figura 22. Concluíram que a máxima eficiência de 67,1%, valor 19,1% superior ao

da água destilada, é atingida usando nanopartículas em formato de blocos, na concentração de 4% e vazão de 0,025 kg/s.

Figura 22 – Desempenho dos nanofluidos de TiO<sub>2</sub>/água segundo a concentração e formato de nanopartículas utilizadas no trabalho de Kaya, Alkasem e Arslan (2020).



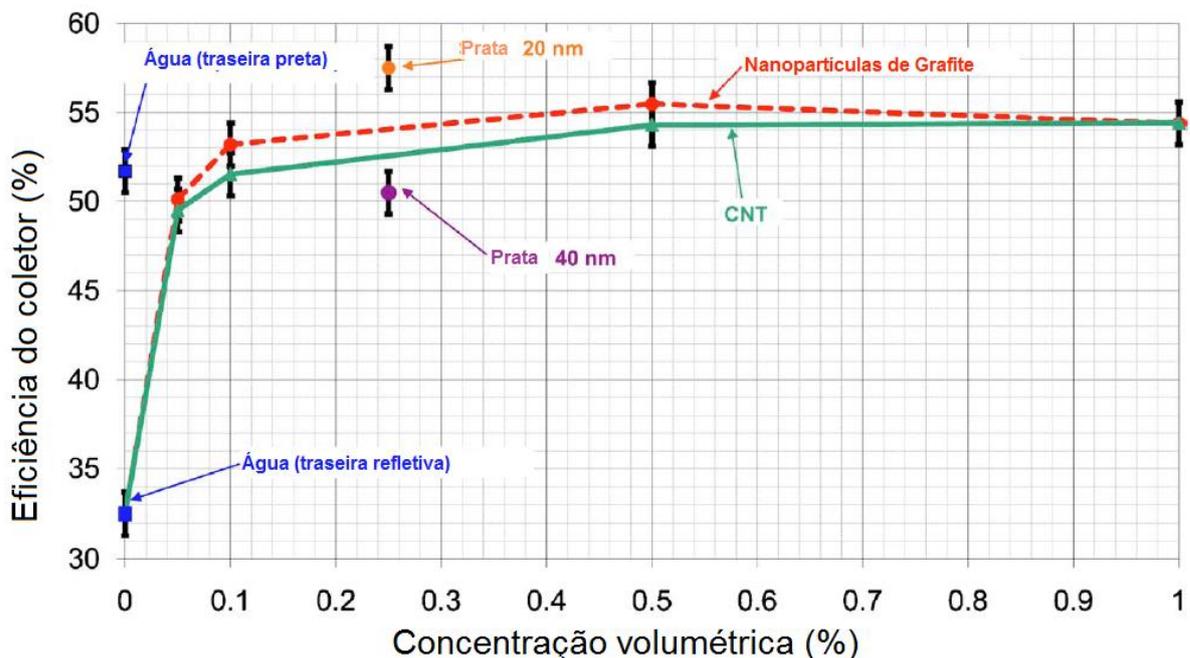
Fonte: Adaptado de Kaya, Alkasem e Arslan (2020).

### 2.3.5 COLETORES SOLARES DE ABSORÇÃO DIRETA

Tyagi et al.(2009) realizaram um estudo teórico acerca da viabilidade do uso de nanofluido de alumínio em água em um coletor solar de absorção direta (CSAD) e comparou os resultados obtidos com o de um coletor solar de placa plana. No estudo foi utilizado um modelo bidimensional de transferência de calor que considerava os efeitos de absorção e espalhamento da radiação solar incidente diretamente sobre um filme de nanofluido em escoamento. Concluíram que a adição de nanopartículas aumentou em mais de nove vezes a absorção da radiação comparado ao fluido base e que, sob condições semelhantes, o coletor solar de absorção direta operando com nanofluidos é capaz de atingir uma eficiência até 10% maior que a do coletor solar de placa plana.

Otanicar et al. (2010) estudaram experimentalmente a utilização de nanofluidos de diferentes nanopartículas (nanotubo de carbono, grafite e prata) em água num coletor solar de absorção direta de dimensões reduzidas (microcoletor térmico solar, tamanho 3x5 cm). Aumentos de até 5% foram demonstrados com a utilização de nanofluidos como meio de absorção da radiação, com destaque para o nanofluido de prata (diâmetro de 20nm), que apresentou uma eficiência de 57,5%. Além disso, os resultados de eficiência foram comparados com um modelo numérico, demonstrando um aumento significativo da eficiência para concentrações volumétricas mais baixas, seguido de um nivelamento da curva com a adição extra de nanopartículas, conforme apresentado na Figura 23.

Figura 23 - Resultados experimentais da eficiência em regime permanente dos testes no microcoletor térmico solar.



Fonte: Adaptado de Otanicar et al.(2010).

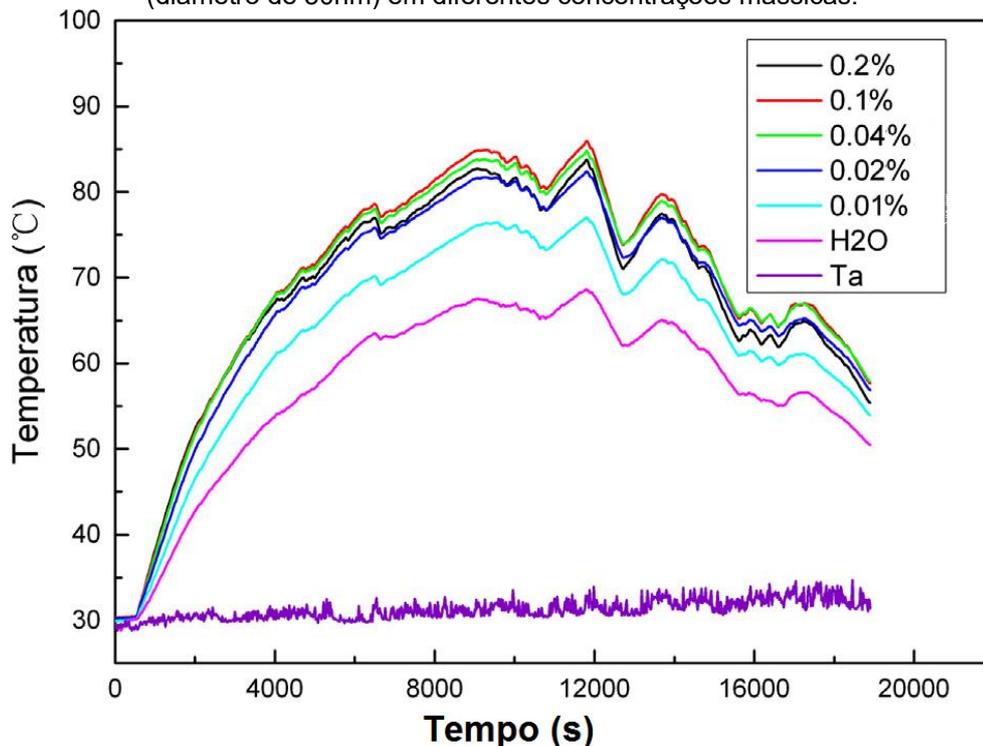
Ladjevardi et al. (2013) estudaram teoricamente o uso de nanofluidos de grafite em água em um coletor solar de absorção direta, tendo avaliado a influência da concentração volumétrica (variada entre 0,00001% e 0,0025%) e do diâmetro (50 a 300nm) das nanopartículas. Observaram ser possível a absorção de cerca de 90% da radiação incidente em uma amostra de concentração 0,0001% e que o aumento do diâmetro da nanopartícula implica em aumento do coeficiente de extinção<sup>2</sup> do fluido

<sup>2</sup> Coeficiente de extinção: medida da atenuação na transmissão da luz incidente em um dado meio

na região da luz visível, além disso, na análise conjunta de fatores como a perda de calor por convecção para o ambiente, a temperatura de saída do coletor e o custo de produção do nanofluido, concluíram existir uma concentração de nanopartículas ( $\phi_v=0,000025\%$ ) que propiciaria um ótimo custo-benefício, com uma absorção de aproximadamente 50% da radiação incidente, perdas de calor semelhantes ao do fluido base e com um custo de 0,0045 dólares/L.

He et al. (2013) estudaram experimentalmente em coletores solares de absorção direta o comportamento da temperatura de nanofluidos de cobre (Cu) em água com variadas concentrações mássicas (entre 0,01 e 0,2%), tamanhos de partícula (25 e 50nm) e pH (pH = 2, 4, 6, 8, 10) da dispersão, observando um aumento da capacidade de conversão fototérmica para concentrações até 0,1%, em que o nanofluido atingiu uma temperatura máxima 25,3% maior que a da água destilada, e uma queda no desempenho para a concentração superior, como evidenciado pela Figura 24. Adicionalmente, concluíram que as os nanofluidos com pH=8 e as nanopartículas de menor diâmetro (25 nm) apresentaram as maiores temperaturas máximas registradas.

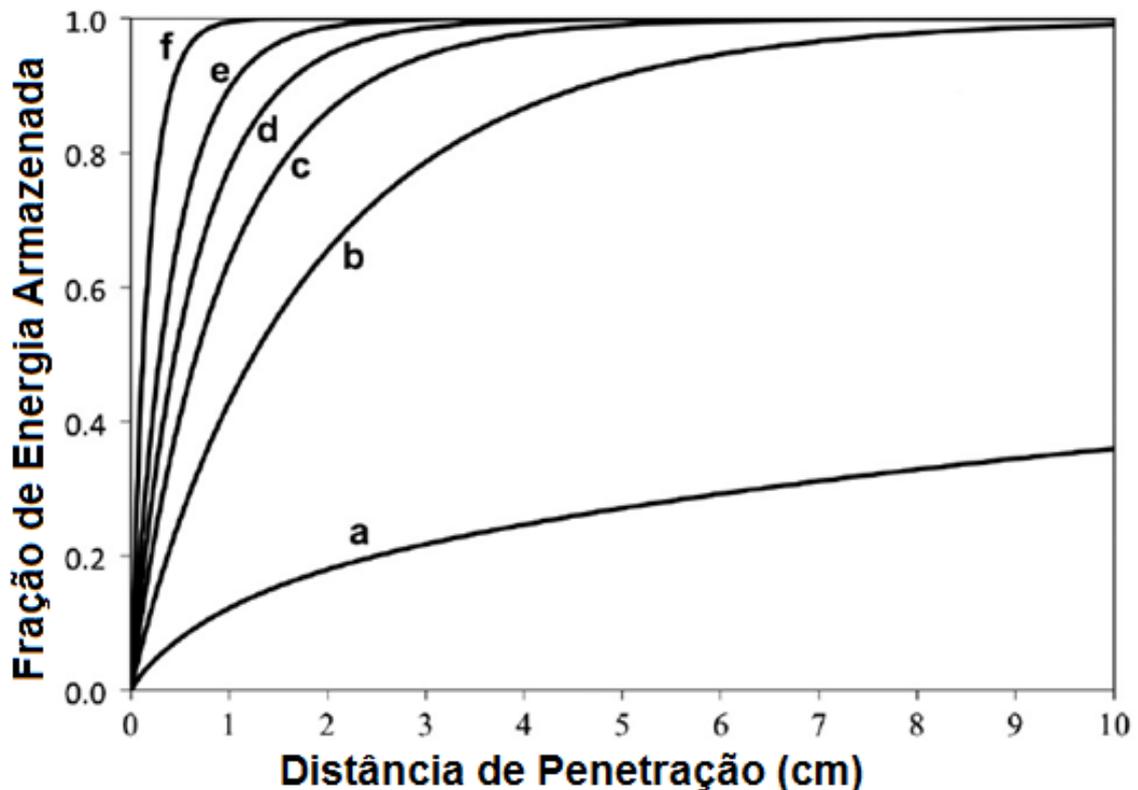
Figura 24 – Variação temporal da temperatura ao longo do tempo para nanofluidos de Cu/H<sub>2</sub>O (diâmetro de 50nm) em diferentes concentrações mássicas.



Fonte: He et al. (2013)

Hordy et al. (2014) avaliaram nanofluidos de nanotubos de carbono de paredes múltiplas (MWCNT) em quatro diferentes fluidos base (água, etilenoglicol, propilenoglicol e Therminol-VP1) em coletores solares de absorção direta. Foram testadas concentrações de nanopartículas, variando entre 5,6 e 53 mg/L. Concluíram, como ilustra a Figura 25, ser possível absorver 100% da radiação incidente em uma profundidade de penetração de 10cm, mesmo fazendo uso da concentração mais baixa (5,6 mg/L) e que a profundidade necessária para obter o mesmo resultado na concentração mais alta (53 mg/L) é de apenas 1cm. O estudo também avaliou a estabilidade de longo prazo (8 meses) dos nanofluidos produzidos em temperatura ambiente e sob aquecimento, concluindo que, em temperatura ambiente, as amostras a base de etilenoglicol e propilenoglicol permaneceram estáveis enquanto as amostras à base de água e Therminol-VP1 sofreram aglomerações variando de gradual (MWCNT/água) à intensa (MWCNT/Therminol-VP1); por outro lado, quando expostas ao aquecimento (até temperaturas de 85°C e 170°C), apenas a amostra de MWCNT/Therminol-VP1 perdeu estabilidade.

Figura 25 – Fração de energia armazenada de nanofluidos de MWCNT em água para diferentes concentrações: a(água destilada), b(5,6 mg/L), c(11,0 mg/L), d(17,0 mg/L), e(27,0 mg/L), f(53,0 mg/L) no trabalho de Hordy et al. (2014).

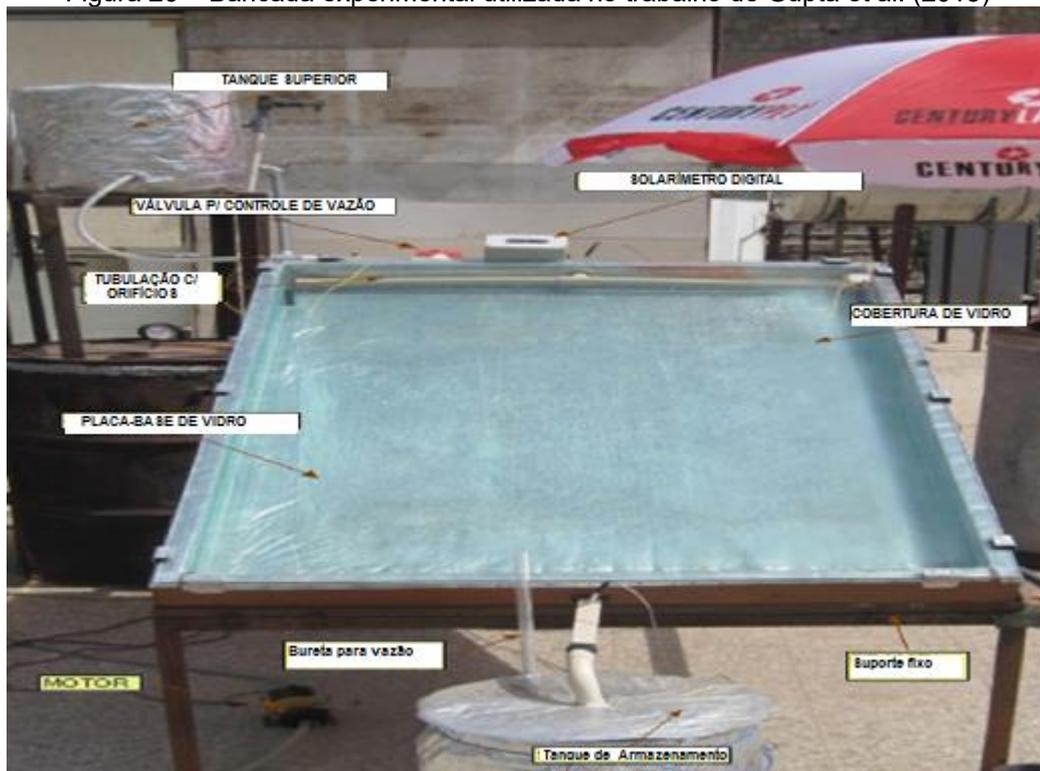


Fonte:Adapatado de Hordy et al. (2014)

Karami et al. (2014) investigaram experimentalmente as características de nanofluidos de nanotubos de carbono funcionalizados em água para seu uso em coletores solares de absorção direta de baixa temperatura. Em suas análises utilizaram amostras de concentração variando entre 5 e 150ppm, sendo observado que a condutividade térmica dos nanofluidos aumenta com a concentração volumétrica de nanopartículas (sendo até 32,2% superior ao da água destilada) e, de forma mais significativa, com a temperatura (amostras avaliadas a 25°C e 60°C). Semelhantemente, o coeficiente de extinção apresentou relação de aumento com a concentração volumétrica, sendo 4,1cm<sup>-1</sup> superior ao da água para a amostra mais concentrada ( $\phi_v=150\text{ppm}$ ).

Gupta et al. (2015) estudaram experimentalmente o uso de nanofluidos de alumina (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) em água num coletor solar de absorção direta, conforme Figura 26, sendo avaliada a influência da concentração volumétrica (variada entre 0,001% e 0,05%) no desempenho do coletor. Concluíram que a eficiência do coletor aumenta com a adição de nanopartículas, no entanto, a amostra que apresentou a maior eficiência (39,6% superior ao do fluido base) foi a segunda de menor concentração ( $\phi_v=0,005\%$ ) enquanto a com pior desempenho (18,75% superior ao da água) foi a amostra mais concentrada ( $\phi_v=0,05\%$ ), indicando a existência de uma concentração de nanopartículas ideal para tal aplicação.

Figura 26 – Bancada experimental utilizada no trabalho de Gupta et al. (2015)



Fonte: Adaptado de Gupta et al. (2015)

Karami et al. (2015) investigaram o uso de nanofluidos de óxido de cobre (CuO) em uma mistura de água com etilenoglicol (na proporção 70%:30%) em um coletor solar de absorção direta (Figura 27). A bancada experimental operou com vazões entre 54 e 90 L/h e os nanofluidos foram produzidos em concentrações volumétricas variando entre 25 e 100ppm. Os autores observaram o aumento da eficiência do coletor com a vazão mássica e com concentração de nanopartículas, sendo o pior e melhor desempenhos obtidos sendo, respectivamente, 9% e 17% superiores ao do fluido base para condições semelhantes.

Figura 27 – Aparato experimental utilizado por Karami et al. (2015) em sua pesquisa.



Fonte: Adaptado de Karami et al. (2015)

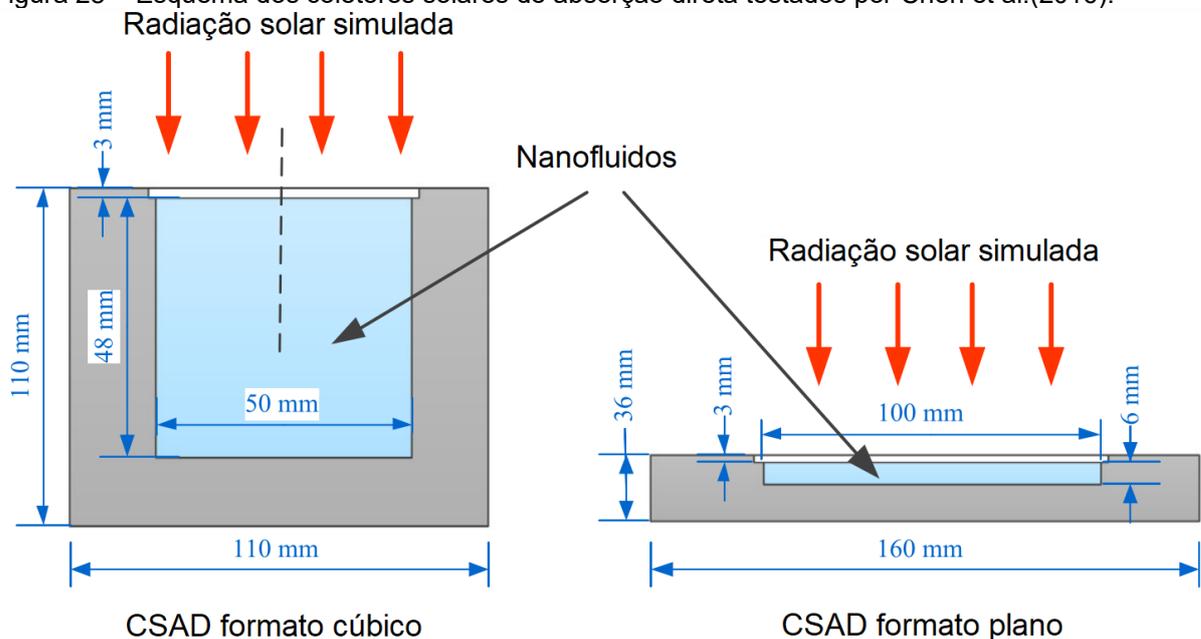
Delfani et al. (2016) estudaram, utilizando a mesma bancada experimental de Karami et al. (2015), o uso de nanofluidos de MWCNT em uma mistura de água e etilenoglicol (proporção de 70%:30% em volume), variando a vazão mássica entre 0,015 e 0,025 kg/s e utilizando três concentrações volumétricas de nanopartículas, 25, 50 e 100ppm. A condutividade térmica dos nanofluidos foi avaliada e foram observados aumentos de 3,6% a 25°C e 21% a 60°C quando comparadas ao fluido base. Concluíram que a eficiência do coletor aumenta com a fração volumétrica e com a vazão mássica, no entanto, esse aumento apresentou comportamento assintótico, atingindo o máximo de 89,3% para o nanofluido mais concentrado escoando na maior vazão mássica, valor 29% superior ao resultado obtido pelo fluido base em condições de teste semelhantes.

Vakili et al. (2016), seguindo os estudos anteriores (Karami et al.(2015) e Delfani et al.(2016)) realizaram um estudo experimental do uso de nanofluidos de grafeno em água em concentrações mássicas 0,0005, 0,001 e 0,005%, variando-se a vazão mássica entre 0,0075 e 0,225 kg/s. Concluíram que a eficiência aumentou com o aumento da fração mássica e que o ponto de máxima eficiência foi atingido na vazão intermediária (0,015 kg/s) tanto nos testes com nanofluidos quanto com o fluido base. Além disso, as máximas eficiências obtidas nos testes com fluido base e nanofluidos com concentrações crescentes foram 70%, 83,5%, 89,7% e 93,2%, respectivamente.

Jeon, Park e Lee (2016) estudaram numericamente o uso de nanofluidos de nanobastões de ouro (em três razões de aspecto diferentes) dispersos em CTAB (brometo de cetiltrimetilamônio) em um coletor volumétrico de absorção direta, além de realizarem experimentalmente a avaliação da eficiência de conversão fototérmica desses nanofluidos. A avaliação numérica foi realizada variando-se os parâmetros de profundidade(H) e comprimento do canal(L) e vazão mássica de escoamento e a análise experimental se deu através do perfil de distribuição de temperatura no nanofluido exposto à radiação solar simulada. O coeficiente de absorção apresentou um valor ótimo, acima do qual o ganho de temperatura diminui em razão das maiores perdas térmicas (por convecção e radiação) na superfície do coletor. Concluíram que a eficiência do coletor aumenta com o aumento da profundidade do canal e da vazão mássica, sofrendo diminuição com o aumento do comprimento do canal.

Chen et al. (2016) avaliaram experimentalmente o uso de nanofluido de ouro em água em um coletor solar de absorção direta investigando a influência do tamanho das nanopartículas (25, 33, e 40 nm) e da geometria do coletor (plano ou cúbico), conforme Figura 28. Observaram que a eficiência de conversão fototérmica era, em geral, maior nos testes utilizando o CSAD cúbico, além disso, notaram que o aumento do tamanho das nanopartículas de ouro causava uma redução na eficiência do CSAD plano, sendo esse efeito não observado no CSAD de formato cúbico.

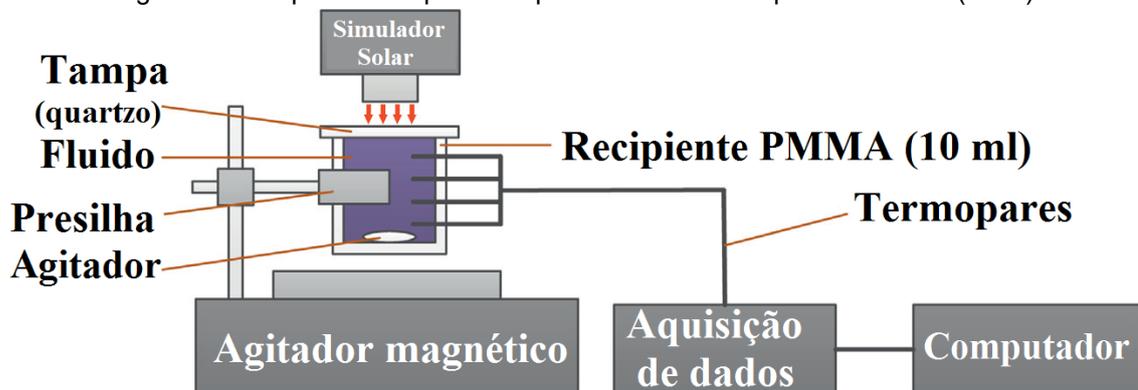
Figura 28 – Esquema dos coletores solares de absorção direta testados por Chen et al.(2016).



Fonte: Adaptado de Chen et al. (2016)

Chen et al. (2017) realizaram um estudo teórico-experimental acerca da eficiência de conversão fototérmica de nanofluidos de ouro variando-se a concentração volumétrica de nanopartículas (0,5 ppm, 1 ppm, 1,5 ppm e 2,5 ppm), a altura de fluido e a intensidade de radiação solar. O aparato experimental utilizado pode ser visto na Figura 29. Os autores observaram que a temperatura de equilíbrio (atingida após algum tempo de exposição das amostras à radiação) aumentava em proporções menores que as do acréscimo de nanopartículas ao fluido base e que ela se relacionava linearmente com a variação da intensidade da radiação incidente. Concluíram também que há uma combinação entre os valores de concentração do nanofluido e altura de fluido no coletor que permite atingir valores desejados de eficiência de conversão fototérmica.

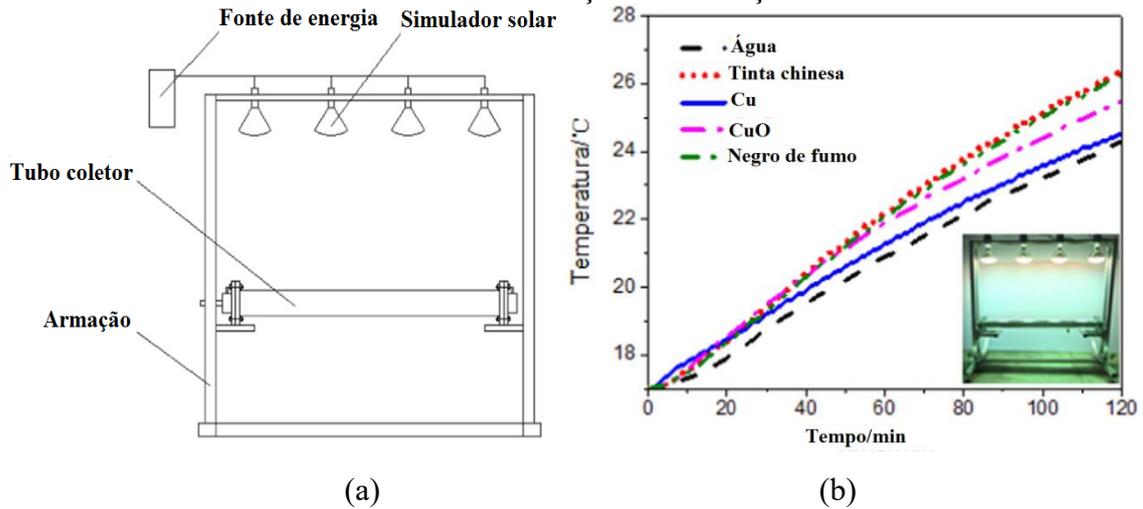
Figura 29 - Esquema do aparato experimental utilizado por Chen et al. (2017).



Fonte: Adaptado de Chen et al.(2017).

Wang et al. (2018) utilizaram nanofluidos a base de Cu, CuO, tinta chinesa (tinta nankin) e negro de fumo dispersos em água em concentrações mássicas iguais (0,05%) em um coletor solar de absorção direta em formato tubular, como mostra a Figura 30(a). Observaram que o nanofluido à base de tinta chinesa obteve os melhores resultados e o à base de cobre o pior resultado, acima apenas do obtido pelo fluido base (água), como mostra a Figura 30(b). Concluíram que a goma (“bone glue”) utilizada na preparação da tinta chinesa para mantê-la estável proporciona melhora indireta na eficiência de conversão fototérmica por evitar a aglomeração das nanopartículas, que, individualmente, tem melhor desempenho que a das aglomerações.

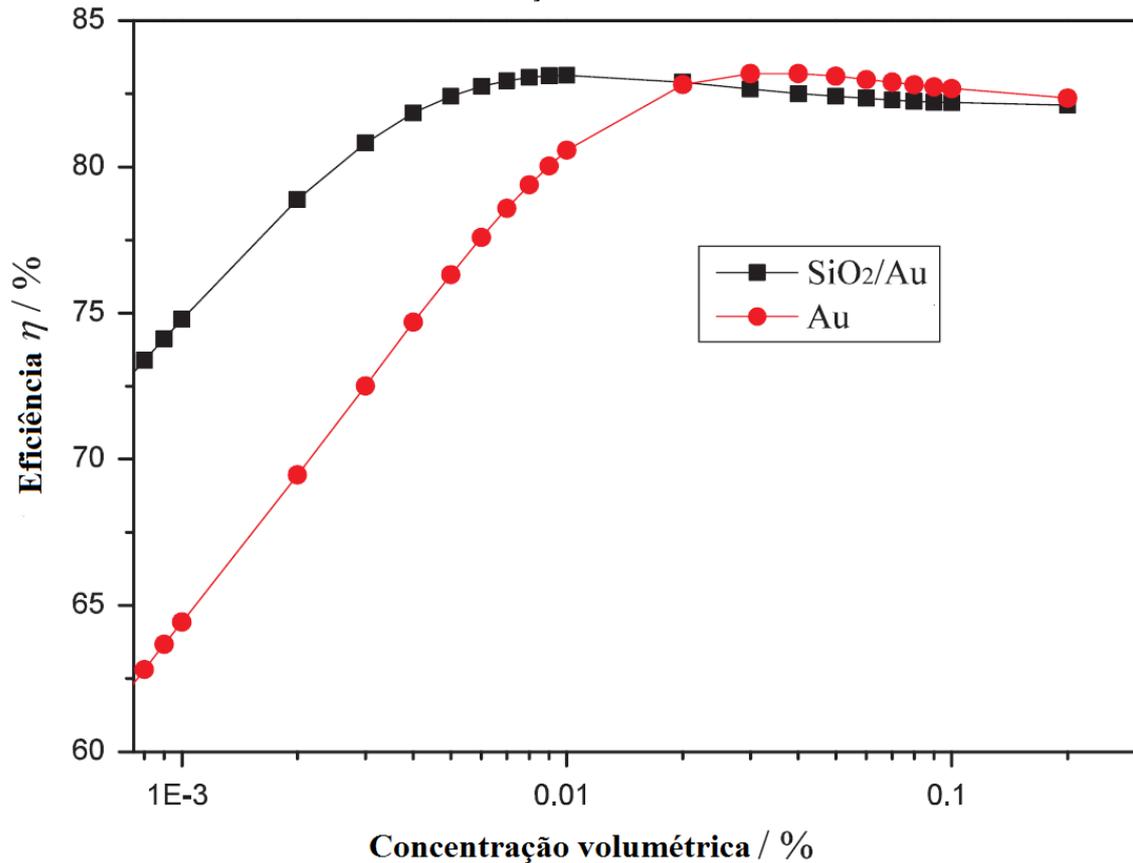
Figura 30 - (a) Esquema do aparato experimental utilizado por Wang et al. (2018) e (b) os resultados obtidos com sua utilização sob radiação solar simulada.



Fonte: Adaptado de Wang et al.(2018).

Duan et al. (2018) realizaram um estudo teórico acerca da exposição de nanopartículas de Au e SiO<sub>2</sub>-Au (núcleo- revestimento, respectivamente) à radiação solar direta. As variáveis analisadas foram: tamanho do núcleo e espessura do revestimento da nanopartícula híbrida, concentração volumétrica (0-0,2%) dos nanofluidos e altura de fluido. Observaram que, para obtenção de uma mesma variação de temperatura, seria necessário o emprego de concentrações de nanopartículas de ouro até cinco vezes maior que ao se utilizar as nanopartículas híbridas SiO<sub>2</sub>/Au. A eficiência do coletor apresentou um comportamento assintótico conforme a altura de fluido era aumentada e, para o nanofluido de SiO<sub>2</sub>/Au considerado (R=10 nm, e=5 nm,  $\Phi_v = 0,01\%$ ), a altura adequada encontrada seria de 10 mm pois, ao aumentarem ainda mais a altura, obtiveram apenas um pequeno ganho na eficiência do coletor. Concluíram a partir dos resultados obtidos para a eficiência do coletor em função da concentração volumétrica dos nanofluidos haver uma concentração ótima para emprego das nanopartículas analisadas, sendo de 0,01% e 0,03% para os nanofluido de SiO<sub>2</sub>/Au e ouro, respectivamente, como mostra a Figura 31.

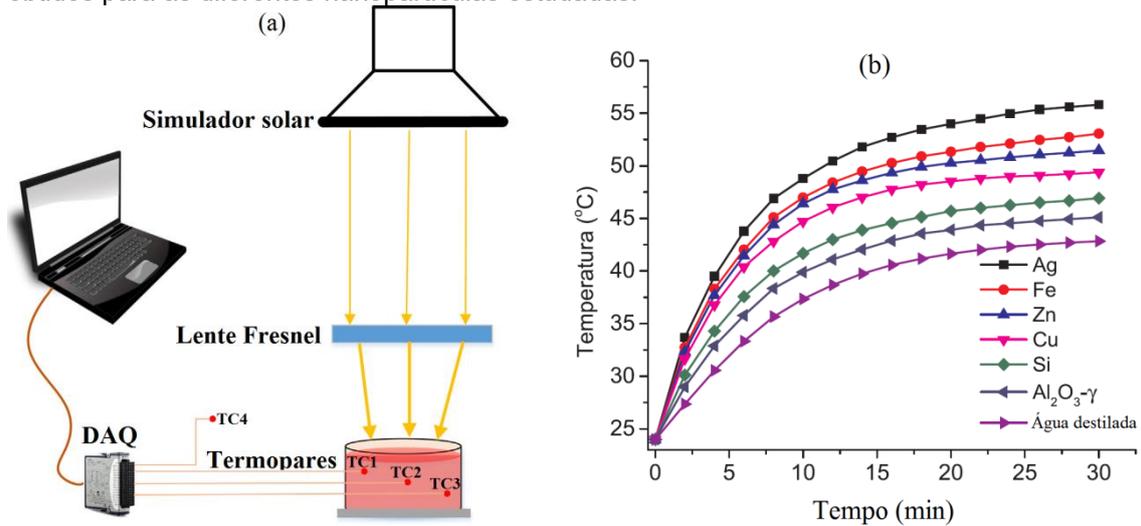
Figura 31 - Resultado obtido por Duan et al. (2018) para a eficiência de conversão fototérmica de acordo com a concentração dos nanofluidos estudados.



Fonte: Adaptado de Duan et al.(2018).

Amjad et al. (2018) realizaram ensaios experimentais utilizando nanopartículas de Ag, Cu, Zn, Fe, Si e Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>- $\gamma$  dispersos em uma solução aquosa (a 0,5% em massa) de citrato trissódico como o esquematizado na Figura 32(a). O desempenho das nanopartículas seguiu o mesmo padrão observado na Figura 32(b), em que o nanofluido com melhor resultado foi o de prata e o pior, o de alumina. Todos os nanofluidos apresentaram desempenho superior ao do fluido base, especialmente nos primeiros instantes de testes (primeiros 6 minutos) e proporcionaram ganhos na eficiência de conversão fototérmica que variaram entre 13,4% para o nanofluido de alumina e 99,7% para o nanofluido de prata.

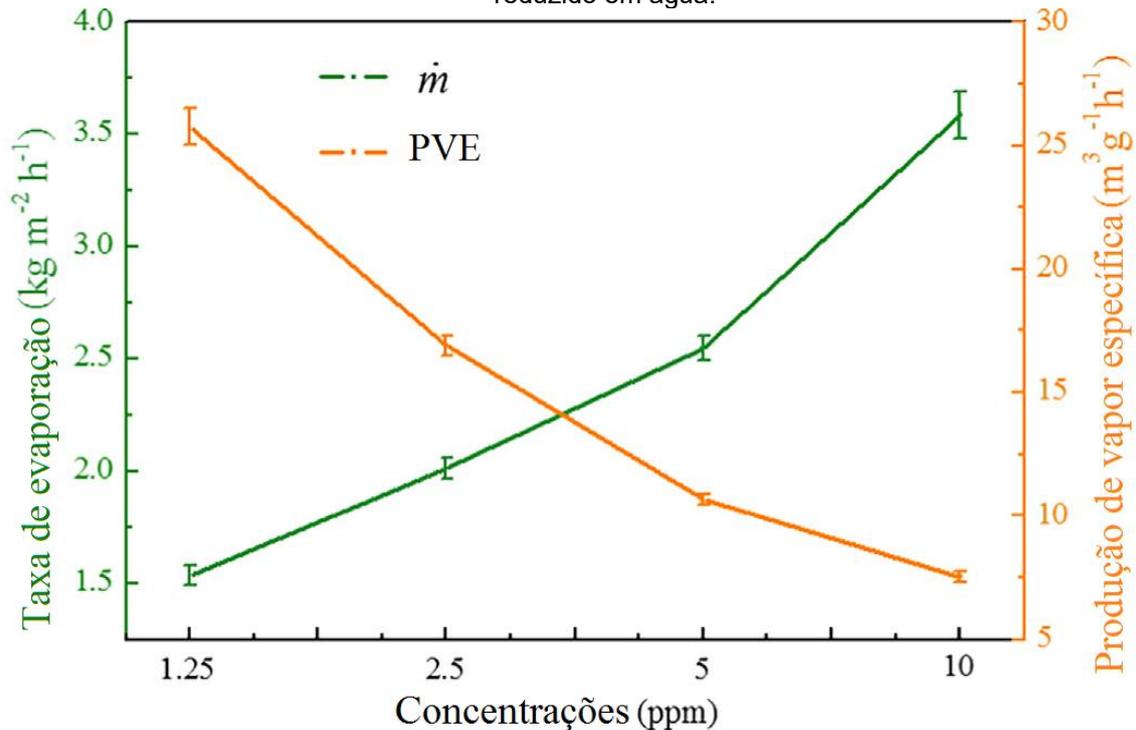
Figura 32 – (a) Bancada experimental utilizada por Amjad et al. (2018) e (b) perfis de temperatura obtidos para as diferentes nanopartículas estudadas.



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

Liu et al. (2018) estudaram o uso de óxido de grafeno reduzido disperso em água em um processo de geração de vapor pela incidência de radiação solar simulada direta. Foram analisadas quatro diferentes concentrações mássicas (1,25 ppm, 2,5 ppm, 5 ppm, e 10 ppm) e cinco intensidades de radiação solar. Concluíram que o aumento da concentração de nanopartículas gera um substancial gradiente de temperatura no fluido (camada superficial atinge altas temperaturas rapidamente, enquanto o restante do fluido permanece a uma temperatura inferior), o que aumenta a eficiência de geração de vapor, mas diminui a eficiência de aquecimento do fluido como um todo. Observaram ainda que, apesar da adição de nanopartículas causar um aumento na taxa de evaporação em todas as intensidades de radiação testadas, a produção de vapor específica (produção de vapor por massa de nanopartículas, por hora) diminui, como mostra a Figura 33.

Figura 33 - Resultado obtido por Liu et al. (2018) para a taxa de evaporação de água ( $\dot{m}$ ) e produção de vapor específica (PVE) para diferentes concentrações de nanofluidos de óxido de grafeno reduzido em água.



Kumar et al. (2020) avaliaram experimentalmente o desempenho de nanofluidos de ouro em água (diâmetro da nanopartícula de 40 nm e  $\Phi_m = 0,0002\%$ ) escoando em três vazões mássicas (0,017, 0,025 e 0,030 kg/s) em um coletor solar de absorção direta. Foram analisados os dados de máxima temperatura de saída ( $T_{out}$ ) e eficiência do coletor ( $\eta$ ), concluindo que o nanofluido atingiu o melhor desempenho na vazão de 0,030 kg/s, com resultados de 55°C ( $T_{out}$ ) e 95% ( $\eta$ ), valores esses respectivamente 7°C e 33% superiores aos obtidos pelo fluido base em mesma condição. Destacaram, ainda, que o fator de perda de calor dos nanofluidos foi até 42% superior ao da água, implicando em queda mais acentuada da eficiência em altas temperaturas.

Guo et al. (2022) investigaram o uso de Ti3C2, GO (óxido de grafeno) e MWCNT em uma solução iônica de [BMIM]BF4<sup>3</sup> para uso em coletor solar de absorção direta. Foram produzidas amostras dos três nanofluidos na concentração mássica de 0,02% para estudo do desempenho de conversão fototérmica de cada um; posteriormente, o nanofluido de Ti3C2, por ter apresentado resultados 20% e 29% superiores aos obtidos pelas nanopartículas de GO e MWCNT, respectivamente, foi

<sup>3</sup>[BMIM]BF4: tetrafluoroborato de 1-butil-3-metilimidazólio

selecionado para testes mais amplos avaliando a influência da concentração mássica, que foi variada entre 0,001% e 0,04%. Na primeira fase, de avaliação das diferentes nanopartículas com  $\phi_m=0,02\%$ , os nanofluidos de Óxido de Grafeno, MWCNT e Ti3C2 apresentaram temperaturas de saída e eficiências de conversão fototérmica de 376,4K/56,7%, 401,5K/53,7% e 413,4K/69,4%, respetivamente. Na segunda fase, o estudo com Ti3C2[BMIM]BF4 evidenciou que o aumento da concentração mássica do nanofluido causava aumento na temperatura máxima de saída do coletor e na eficiência de conversão fototérmica, tendo a amostra mais concentrada ( $\phi_m=0,04\%$ ) apresentado temperatura de saída 416,2K e eficiência de 75,7%.

### 2.3.6 RESUMO DE REFERÊNCIAS SOBRE COLETORES SOLARES

<b>Autores</b>	<b>Nanofluido</b>	<b>Tema do estudo</b>	<b>Tipo estudo</b>	<b>Conclusões</b>
Tyagi et al. (2009)	Al /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Teórico	Nanofluidos possuem capacidade de absorver até nove vezes mais radiação que a água pura e proporcionar um aumento de 10% na eficiência do coletor
Otanicar et al. (2010)	Grafite, CNT, Prata /Água	Aplicação em microcoletor térmico solar	Experimental	Nanofluidos proporcionaram aumentos de até 5% na eficiência; eficiência aumenta significativamente com concentração para $\phi_v < 0,1\%$ . Ag(20 nm)/água propiciou a melhor eficiência do coletor(57,5%)
Khullar e Tyagi (2010)	Al /água	Aplicação em coletor solar parabólico	Teórico	Eficiência aumenta significativamente com concentração de nanopartículas para $\phi_v < 0,004\%$
He et al. (2011)	TiO <sub>2</sub> , MWCNT /água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Nanofluido a base de TiO <sub>2</sub> apresentou resultados inferiores aos de MWCNT. Concentração intermediária de MWCNT/água ( $\phi_m=0,5\%$ ) atingiu os melhores resultados.
Yousefi et al. (2012a)	MWCNT /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	O afastamento do pH do nanofluido do ponto isoelétrico resulta em

				aumento da eficiência do coletor .
Yousefi et al. (2012b)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	A menor concentração ( $\phi_m=0,2\%$ ) apresentou o melhor desempenho (aumento de 28,3% na eficiência do coletor); a adição de surfactante ao nanofluido propiciou aumento de 15,63% na eficiência.
Yousefi et al. (2012c)	MWCNT /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	O nanofluido menos concentrado ( $\Phi_m=0,2\%$ ) diminuiu a eficiência do coletor e o aumento da concentração ( $\Phi_m=0,4\%$ ) e da vazão resultaram em um melhor desempenho.
Khullar et al. (2012)	Al /Therminol VP1	Aplicação em coletor solar parabólico	Teórico	Aumento na eficiência de coletores parabólicos tradicionais entre 5 e 10%.
He et al. (2013)	Cu /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Aumento da capacidade de conversão fototérmica até $\phi_m=0,1\%$ : nanofluido atingiu temperatura máxima 25,3% maior que a da água destilada.
Jamal-Abad et al. (2013)	Cu /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência com o aumento da quantidade de nanopartículas no fluido base, atingindo valores 19%( $\Phi_m=0,05\%$ ) e 29%( $\Phi_m=0,1$ ) superiores aos da água destilada.
Ladjevardi et al. (2013)	Grafite /água	Aplicação em coletor solar volumétrico	Teórico	Nanofluido $\phi_v=0,0001\%$ absorve cerca de 90% da radiação incidente. Concentração $\phi_v=0,000025\%$ propicia o melhor custo-benefício.
Liu et al. (2013)	CuO/água	Aplicação em coletor solar com CPC	Experimental	Aumento do coeficiente de transferência de calor com a concentração até $\phi_m=1,2\%$ e diminuição para a concentração mais alta testada ( $\phi_m=1,5\%$ ); aumento da eficiência máxima e média do sistema em 6,6% e 12,4%.
He et al. (2014)	Cu /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Eficiência diminui com o aumento do tamanho da partícula e da concentração. Aumento de 23.83% na

				eficiência do coletor para $\phi_m=0,1\%$ e tamanho de nanopartícula de 25 nm; máxima temperatura atingida e ganho de calor da água do tanque 12.24% e 24.52% superiores comparados ao fluido base.
Hordy et al. (2014)	MWCNT /água, etilenoglicol, Therminol VP1, propilenoglicol	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Possibilidade de absorção de 100% da radiação incidente em uma profundidade de penetração de 10cm, mesmo na concentração mais baixa (5,6 mg/L); profundidade necessária para obter 100% de absorção na concentração mais alta (53 mg/L) de apenas 1cm.
Karami et al. (2014)	f-CNT /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Condutividade térmica e coeficiente de extinção dos nanofluidos aumenta com a concentração volumétrica de nanopartículas; amostra mais concentrada ( $\phi_v=150$ ppm) apresentou aumento de 32,2% na condutividade térmica e $4,1\text{cm}^{-1}$ no coeficiente de extinção.
Gupta et al. (2015)	$\text{Al}_2\text{O}_3$ /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Segunda amostra de menor concentração ( $\phi_v=0,005\%$ ) apresentou a maior eficiência (39,6% superior ao do fluido base); amostra mais concentrada ( $\phi_v=0,05\%$ ) obteve pior desempenho dentre os nanofluidos (18,75% superior ao da água).
Karami et al. (2015)	CuO /água-etilenoglicol	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Aumento da eficiência do coletor com a vazão mássica e com concentração de nanopartículas, sendo o pior ( $\phi_v=25$ ppm) e melhor ( $\phi_v=100$ ppm) desempenhos obtidos, respectivamente, 9% e 17% superiores aos do fluido base.
Sabiha et al. (2015)	SWCNT /água	Aplicação em coletor solar evacuado	Experimental	Maior eficiência dos testes com nanofluidos, 93,43%, obtida pela amostra $\phi_v=0,2\%$ na maior vazão mássica, 0,025Kg/s, muito

				superior ao resultado obtido pelo fluido base (54,37%) nas mesmas condições.
Salavati Meibodi et al. (2015)	SiO <sub>2</sub> /água-etilenoglicol	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Parâmetro energia removida do coletor diminui com o aumento da vazão mássica; a adição de nanopartículas ao fluido base aumenta a eficiência entre 4 e 8%. Melhor custo benefício do nanofluido com concentração intermediária ( $\phi_v=0,75\%$ ).
Tong et al. (2015)	MWCNT /água	Aplicação em coletor solar tubo em U	Experimental	Adição de nanopartículas à água aumenta coeficiente de transferência de calor e eficiência do sistema; nanofluido de maior concentração ( $\phi_v=0,24\%$ ) obteve aumento de 8% na transferência de calor.
Delfani et al. (2016)	MWCNT /água-etilenoglicol	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Eficiência do coletor aumenta com a fração volumétrica e com a vazão mássica; aumento da eficiência apresentou comportamento assintótico, atingindo máximo de 89,3% para o nanofluido mais concentrado ( $\phi_v=100\text{ppm}$ ) na maior vazão mássica (valor 29% superior ao do fluido base)
Kim et al. (2016)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , CuO, SiO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub> /água-propilenoglicol	Aplicação em coletor solar tubo em U	Teórico	Eficiência do coletor usando nanofluidos, do melhor ao pior: MWCNT, CuO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> e SiO <sub>2</sub> . Nanofluido de MWCNT ( $\phi_v=0,2\%$ ) apresentou a melhor eficiência (62,8%), sendo 10,5% superior ao obtido pelo fluido base.
Vakili et al. (2016)	Grafeno /água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Eficiência aumenta com o aumento da fração mássica; ponto de máxima eficiência foi atingido na vazão intermediária (0,015 Kg/s). Nanofluido mais concentrado, $\phi_v=0,5\%$ , apresentou eficiência máxima de 93,2% contra 70% do fluido base.
Verma et al. (2016)	MgO /água	Aplicação em coletor	Experimental	Aumento nas eficiências térmica e exergética de 9,34% e 32,23%

		solar de placa plana		(concentração intermediária de $\phi_v=0,75\%$ , vazão de 1,5L/min), resulta em aumento da potência de bombeamento de 6,84%. Queda da eficiência do coletor para $\phi_v>0,75\%$ .
Vincely e Natarajan (2016)	Óxido de grafeno /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Eficiência do coletor aumenta com a fração mássica e com o aumento da vazão. Aumentos máximos para o coeficiente de transferência de calor de 8,03% ( $\phi_m=0,005\%$ ), 10,93% ( $\phi_m=0,01\%$ ) e 11,5% ( $\phi_m=0,02\%$ ). Nanofluido ( $\phi_m=0,02\%$ , vazão 0,0167kg/s) resultou aumento de 7,3% na eficiência do coletor.
Jeon, Park e Lee (2016)	Au*/CTAB *mistura de nanobastões com 3 razões de aspecto diferentes	Eficiência de conversão fototérmica/ Aplicação em coletor solar volumétrico de placa plana	Teórico-Experimental	Eficiência do coletor aumenta com a altura de fluido e com a vazão mássica e diminui com o comprimento do canal. O coeficiente de absorção apresentou um valor ótimo acima do qual o ganho de temperatura diminui devido à perda de calor convectivo e irradiante da superfície superior do coletor
Chen et al. (2016)	Au/água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Maior eficiência com uso de geometria cúbica de CSAD. Aumento do tamanho das nanopartículas reduz a eficiência do CSAD plano (efeito não observado no CSAD cúbico)
Ghaderian e Sidik (2017)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Aumento da vazão mássica e da concentração de nanopartículas aumentou a eficiência. Nanofluido mais concentrado ( $\phi_v=0,06\%$ ) obteve maior $\Delta T$ na menor vazão mássica empregada (20 L/h)
Iranmanesh et al. (2017)	Grafeno/água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Aumento na concentração gerou maior ganho de energia/temperatura de saída no sistema. Nanofluido mais concentrado ( $\Phi_m=0,1\%$ ) obteve eficiência térmica de

				90,7% na maior vazão estudada (1,5 L/min).
Chen et al. (2017)	Au/água	Eficiência de conversão fototérmica	Teórico-Experimental	Temperatura de equilíbrio aumenta em proporção menor que a da concentração de nanopartículas. Combinação entre concentração e altura de fluido proporciona a eficiência desejada.
Wang et al. (2018)	Tinta Nankin Cu, CuO, Negro de fumo/água	Eficiência de conversão fototérmica	Experimental	Nanofluido à base de tinta chinesa obteve melhores resultados e o à base de cobre o com pior resultado. A goma ("bone glue") utilizada na preparação da tinta chinesa proporciona melhora indireta na eficiência de conversão fototérmica por evitar a aglomeração das nanopartículas.
Mahbudul et al. (2018)	SWCNT/água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Nanofluido mais concentrado ( $\phi_v=0,2\%$ ) proporcionou aumento de até 10% na eficiência do coletor. Eficiência do coletor aumenta com a adição de nanopartículas e atinge um valor ideal com radiação incidente de $900W/m^2$ .
Duan et al. (2018)	Au, SiO <sub>2</sub> -Au/água	Eficiência de conversão fototérmica	Teórico	Nanofluido híbrido (SiO <sub>2</sub> -Au) obteve melhor resultado que Au isoladamente. Comportamento assintótico da eficiência do coletor vs altura de fluido. Existência de uma concentração ótima ( $\phi_v=0,01\%$ - SiO <sub>2</sub> /Au e $\phi_v=0,03\%$ - Au)
Amjad et al. (2018)	Ag, Cu e Zn e Fe, Si e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - $\gamma$ /solução aquosa de citrato trisódico a 0,5% em massa	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Nanofluido de Ag obteve melhor desempenho (eficiência 99,7% maior) e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> - $\gamma$ o pior (eficiência 13,4% maior). Desempenho superior de todos os nanofluidos (em especial nos 6 primeiros minutos de teste)
Liu et al. (2018)	Óxido de grafeno reduzido/água	Aplicação em sistema solar de geração de vapor	Experimental	Substancial gradiente de temperatura observado nos nanofluidos gerou aumento da eficiência de geração de vapor e diminuição da

				eficiência de aquecimento do fluido como um todo. A produção de vapor por massa de nanopartículas, por hora, diminui com o aumento da concentração mássica.
Tong et al. (2019)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água e CuO/água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência energética e exergética até uma concentração ótima (Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 1% vol. e CuO 0,5% vol.) com diminuição da estabilidade e eficiência das amostras em concentrações superiores a essas. Eficiências energéticas máximas obtidas de 77,5%(Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ) e 73,9%(CuO).
Eltaweel e Abdel-Rehim (2019)	MWCNT/água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Eficiência dos nanofluidos superior ao do fluido base. Máxima eficiência energética e exergética (70,67% e 23,35%) obtida com nanofluido de maior concentração testada (0,1% em massa). Coletor com circulação por termossifão obteve eficiência superior ao de circulação forçada.
Natividade et al. (2019)	Grafeno multicamada s/água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado (com e sem uso de concentrador parabólico)	Experimental	Eficiência média (água como fluido de trabalho) de 19,1% e 4,8% com e sem uso de concentrador parabólico. Eficiência média do coletor usando nanofluidos com concentrador de 25,0% ( $\phi_v=0,00045\%$ ) e 33,6% ( $\phi_v=0,00068\%$ ).
Rajput et al. (2019)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água, surfactante dodecil sulfato de sódio	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência do coletor com a taxa de fluxo e da concentração volumétrica do nanofluido (aumento de 21,32% variando concentração de 0,1% para 0,3% vol.).
Moravej et al. (2020)	TiO <sub>2</sub> /água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência do coletor com a concentração mássica do nanofluido e com a vazão volumétrica. Aumento da eficiência de até 33,54% do coletor usando nanofluidos

				( $\phi_m=5\%$ e vazão de 0,050467 L/s).
Kaya, Alkaseem e Arslan (2020)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /água	Aplicação em coletor solar de Tubo em U evacuado	Teórico	Eficiência do coletor aumenta com o uso de nanofluidos. Máxima eficiência de 67,1% (19,1% superior ao da água) usando nanopartículas em formato de blocos, $\phi_v=4\%$ e vazão de 0,025 Kg/s.
Kumar et al. (2020)	Ouro/água	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Máxima temperatura de saída e eficiência usando nanofluido ( $\phi_m=0,0002\%$ ) de 55°C (7°C superior ao da água pura) e 95% com vazão de 0,030 Kg/s (33% maior que da água pura). Fator de perda de calor até 42% superior do nanofluido em relação à água, implicando em queda mais acentuada da eficiência em altas temperaturas.
Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2020)	MWCNT/água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Aumento da eficiência energética e exérgica com a vazão mássica e da concentração mássica dos nanofluidos. Máximas eficiências energética e exérgica obtidas de 55% e 10% ( $\phi_m=0,05\%$ ).
Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021)	MWCNT/água	Aplicação em coletor solar de placa plana e coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Eficiência energética e exérgica maiores no coletor solar de placa plana (59% e 11,5%) do que no coletor solar de tubo evacuado (55% e 10%) usando nanofluido $\phi_m=0,05\%$ . Coeficiente de perda de calor diminui com o aumento da concentração mássica. Potencial de redução de 26,7% e 29,5% na área dos coletores de placa plana e tubo evacuado e quando usando nanofluidos.
Akram et al. (2021)	Grafeno, SiO <sub>2</sub> e ZnO em água	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumentos na eficiência do coletor usando nanofluidos (vazão de 1,6Kg/min) de 17,45%, 13,05% e 12,36% para os nanofluidos de Grafeno, ZnO e SiO <sub>2</sub> , respectivamente.

Hosseini e Dehaj (2021)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Grafeno em água	Aplicação em coletor solar de calha parabólica com tubo em U	Experimental	Diminuição da eficiência com o aumento da vazão volumétrica do coletor (variada entre 1, 3 e 5 L/min). Máximo aumento da eficiência de 32,1% e 63,2% para os nanofluidos de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e Óxido de Grafeno (vazão de 1 L/min) em relação à água pura.
Dehaj et al. (2021)	NiFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> / água	Aplicação em coletor solar de calha parabólica com e sem Tubo em U	Experimental	Aumento da eficiência do coletor com aumento da vazão e da concentração volumétrica dos nanofluidos. Resultados superiores utilizando coletor (vazão 3L/min) com Tubo em U associado (34%, 40% e 47%) para água, e nanofluidos $\phi_v=0,01\%$ e $\phi_v=0,05\%$ , quando comparados ao sem tubo em U (28%, 38% e 40%, respectivamente).
Guo et al. (2022)	Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> , Óxido de Grafeno e MWCNT em [BMIM]BF <sub>4</sub>	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	O aumento da concentração mássica do nanofluido causou aumento na temperatura máxima de saída e na eficiência de conversão fototérmica (nanofluido Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> mais concentrado, $\phi_m=0,04$ , obteve temperatura de saída 416,2K e eficiência de 75,7%). Para $\phi_m=0,02$ , os nanofluidos de Óxido de Grafeno, MWCNT e Ti <sub>3</sub> C <sub>2</sub> apresentaram temperaturas de saída e eficiências de conversão fototérmica de 376,4K/56,7%, 401,5K/53,7% e 413,4K/69,4%, respectivamente.
Zidan, Maia e Safaei (2022)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , MnFe <sub>2</sub> O <sub>4</sub> , CuO, Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , MgO, SiO <sub>2</sub> e TiO <sub>2</sub> em Therminol VP-1	Aplicação em coletor solar de calha parabólica (fonte de calor de um ciclo Rankine)	Teórico	Maiores eficiências médias anuais do ciclo obtidas com nanofluidos TiO <sub>2</sub> (28,56%) e MgO(28,53%). TiO <sub>2</sub> na maior concentração avaliada ( $\phi_v=2\%$ ) se mostrou o mais adequado ao sistema, atingindo 33,20 MW, 14,48 MW, 95,35 % e 43,90 % de energia útil, exergia útil, eficiência média

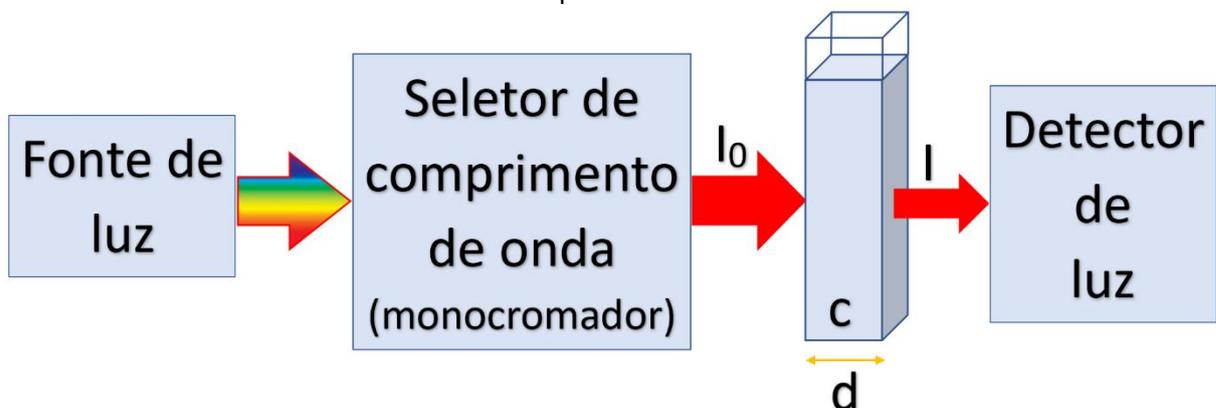
				anual e eficiência exergética, respectivamente.
Joseph e Thomas (2022)	Ponto Quântico de carbono (C-dot)/água	Aplicação em coletor solar de calha parabólica	Experimental	A máxima temperatura de saída (43,49°C) foi obtida usando nanofluido (versus 33,33°C da água) na menor vazão testada (60 L/h). As máximas e mínimas eficiências registradas para o nanofluido (73,41% e 44,67%) foram 57,62% e 34,85% superiores em relação aos resultados da água a uma vazão de 90L/h.
Henein e Abdel-Rehim (2022)	MgO-MWCNT/água, MWCNT/água e MgO/água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Todos nanofluidos apresentaram maiores eficiências comparados ao fluido base, sendo o MgO/água o pior e o MWCNT/água o melhor; a maior concentração testada ( $\phi_m=0,02\%$ ) apresentou melhor resultado em ambos. Para os nanofluidos híbridos, houve aumento da eficiência energética (em 55,83%) e exergética (em 77,14%) com o aumento da razão mássica (MgO:MWCNT) de MWCNT no nanofluido (que variou de 80:20 a 50:50) e da vazão volumétrica.
Tong et al. (2023)	Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> , CuO, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> e MWCNT em água	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Nanofluido de MWCNT/água com concentração $\phi_v=0,01\%$ e radiação incidente de 750W/m <sup>2</sup> proporcionou a máxima eficiência ao coletor, sendo 24,7%, 9,2%, 7,9% e 5,7% superior aos resultados da água e concentrações ótimas de Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> ( $\phi_v=0,015\%$ ), CuO( $\phi_v=0,5\%$ ) e Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> ( $\phi_v=1,0\%$ ), respectivamente.
Presente trabalho (2023)	ZnO-Ag, Grafeno, Au, MWCNT em água	Aplicação em coletor solar de placa plana modificado	Experimental	Capítulo 5 do presente trabalho

## 2.4 ESPECTROFOTOMETRIA

A técnica de espectrofotometria ultravioleta e visível, segundo De Caro e Haller (2015), se baseia na absorção e na forma como ocorre a transmissão de luz através de amostras de substâncias desconhecidas e permite a caracterização e avaliações quantitativas acerca dessas amostras.

O princípio da atenuação da intensidade de um feixe de luz incidente em uma substância permite a utilização da espectrofotometria para determinação da concentração de dispersões e soluções, visto que a redução da intensidade ocorre de forma proporcional à concentração. O processo se baseia em utilizar uma fonte de luz que emita um feixe com variados comprimentos de onda, selecionar um comprimento de onda " $\lambda$ " único através de um monocromador e incidir a amostra a ser analisada com esse feixe de luz monocromático de intensidade " $I_0$ ". Ao atravessar a amostra, alguns comprimentos de onda são seletivamente absorvidos e há uma diminuição da intensidade de " $I_0$ " para " $I$ ", assim, a fração da luz que é transmitida pode ser então detectada por um equipamento adequado e registrada como uma função do comprimento de onda selecionado. Esse processo (Figura 34), quando feito em uma faixa de comprimentos de onda (que usualmente vai de  $100\text{nm} < \lambda < 800\text{nm}$ ), fornece o espectro de absorção UV-Visível da amostra analisada.

Figura 34 – Esquema de análise de espectro de absorção de uma amostra de concentração " $c$ " e espessura " $d$ "



Fonte: Autoria própria (2023)

### Transmitância e absorbância

Em termos de parâmetros usualmente definidos durante o processo de espectrofotometria, De Caro e Haller (2015) definem a transmitância " $T$ " de uma amostra qualquer de concentração " $c$ " e espessura " $d$ ", como:

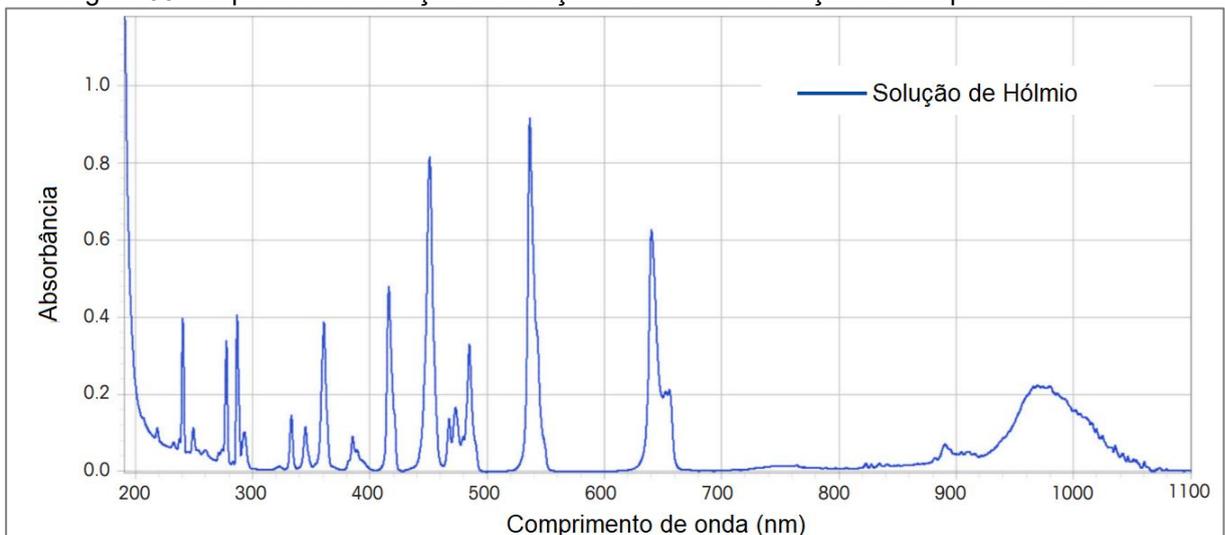
$$T = \frac{I}{I_0} \quad (1)$$

A partir da transmitância, define-se, então, a absorvância dessa amostra, como sendo:

$$ABS = -\log T \quad (2)$$

A absorvância, por sua vez, é um importante parâmetro adimensional no estudo do espectro de absorção, sendo frequentemente utilizada para representar o espectro de absorção UV-Vis em gráficos de “Absorvância *versus* Comprimento de onda”, como o exemplificado na Figura 35.

Figura 35 - Espectro de absorção de solução de hólmio em função do comprimento de onda



Fonte: Adaptado de De Caro e Haller (2015)

Gráficos de espectro de absorção UV-Visível como o ilustrado pela Figura 35 podem ser confeccionados a partir de dados coletados utilizando um equipamento denominado espectrofotômetro, que tem como componentes uma fonte de luz em variados comprimentos de onda, um monocromador, uma cubeta de medição transparente ( $T = 1$ ) e um detector de luz.

### **Lei de Beer-Lambert**

A Lei de Beer-Lambert correlaciona a absorvância com a concentração da amostra analisada através da equação

$$ABS = \varepsilon \times c \times d \quad (3)$$

Onde:

- ABS: absorvância da amostra;
- $\varepsilon$ : coeficiente de extinção, é uma constante específica de cada amostra que descreve o quanto a amostra está absorvendo em um determinado comprimento de onda [L/(cm\*mol) ou mL/(cm\*g)];
- c: concentração da amostra [mol/L ou g/mL];
- d: comprimento atravessado pelo feixe de luz [cm].

A Lei de Beer-Lambert possibilita, então, identificar a concentração de uma determinada amostra através da medição de sua absorvância utilizando uma cubeta de caminho óptico “d” conhecida, fornecendo, idealmente, um gráfico que relaciona de forma linear a absorvância e a concentração da amostra através da equação abaixo:

$$c = \frac{1}{\varepsilon d} \times A \quad (4)$$

### Cubetas para uso em espectrofotômetros

As cubetas para uso em espectrofotômetros, como as ilustradas na Figura 36, podem ser confeccionadas em materiais como quartzo, vidro e acrílico, possuem altura de 45 mm e caminhos ópticos padronizados, que usualmente variam entre 5 mm e 100 mm, sendo as cubetas de 10 mm as mais comuns e aceitas por equipamentos de diferentes fabricantes.

Figura 36 – Cubetas de diferentes caminhos ópticos.



Fonte: [www.ravisientific.in/product/cuvette-for-spectrophotometer-standard-sizes](http://www.ravisientific.in/product/cuvette-for-spectrophotometer-standard-sizes). Acesso em: 19/02/2023

## CAPÍTULO III

### 3 METODOLOGIA

A análise do desempenho de nanofluidos como meio de conversão fototérmica foi realizada a partir de uma sequência de etapas, composta pela produção dos nanofluidos, análise de estabilidade das amostras, construção das bancadas experimentais, preparação da instrumentação utilizada e determinação das condições e cronogramas de teste. Desta maneira, esse capítulo abordará o detalhamento de cada uma dessas etapas.

#### 3.1 PRODUÇÃO DE NANOFLUIDOS

Para a primeira etapa de testes experimentais foram produzidas amostras de nanofluidos de quatro diferentes tipos de nanopartículas dispersas em água, em variadas concentrações, com volume mínimo de 100 ml. Para a segunda etapa, os melhores candidatos selecionados a partir dos resultados obtidos na primeira etapa foram produzidos novamente, nesse momento, em volume maior, cerca de 3 L cada amostra.

Os tipos de nanopartículas testadas na primeira etapa eram compostas por duas formas alotrópicas de carbono, um material híbrido<sup>4</sup> e um metal nobre, sendo eles, respectivamente:

- grafeno(GRAF) e nanotubos de carbono de parede múltipla (MWCNT);
- óxido de zinco com prata(ZnO-Ag);
- ouro(Au).

O processo de produção de diferentes concentrações dos nanofluidos de carbono e de ouro consistiu na adição de água destilada a amostras pré-existentes e

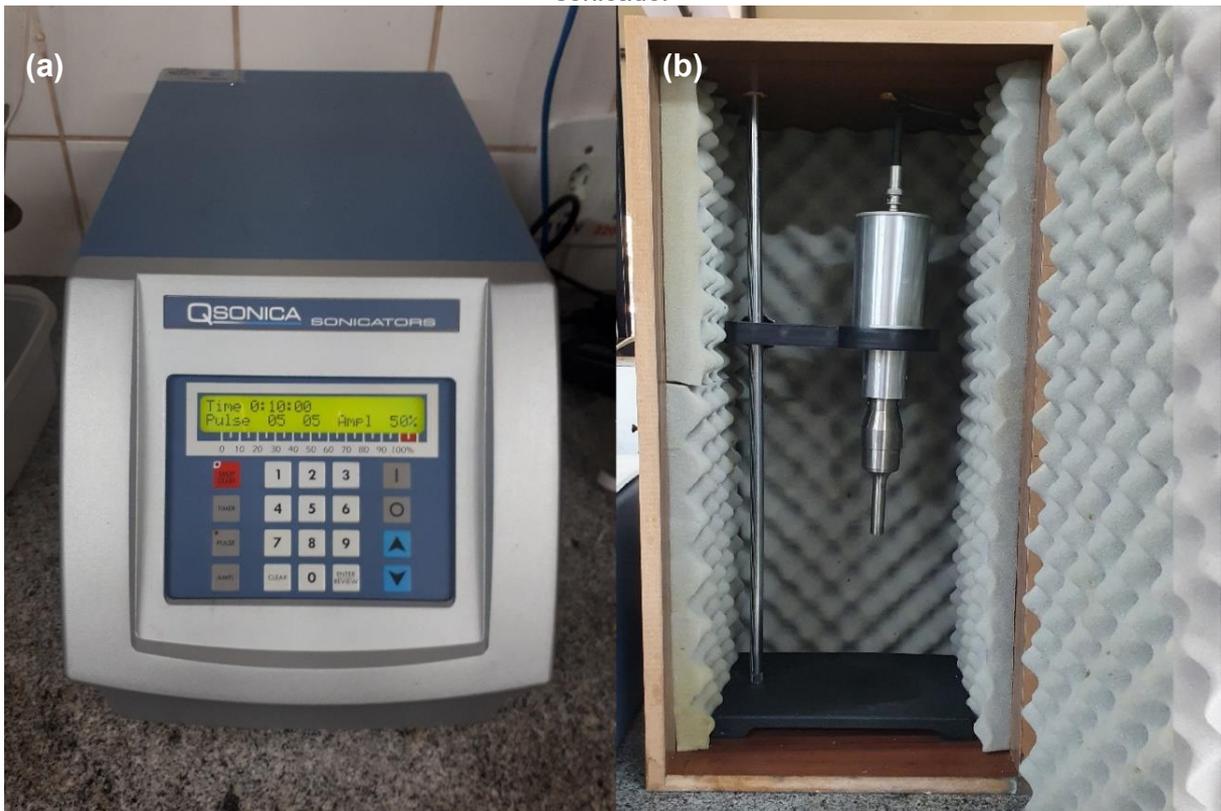
---

<sup>4</sup> Uma nanopartícula é considerada híbrida quando possui mais de um material diferente em sua composição, no caso em questão, a composição é de um óxido com um metal.

mais concentradas, seguidas da homogeneização da dispersão durante vinte minutos em potência 250W (em pulsos de 5 segundos<sup>5</sup>), utilizando o sonicador apresentado na Figura 37.

As amostras mais concentradas de grafeno e MWCNT foram compradas da empresa NanoAmor® e a de ouro foi cedida pela University of Leeds, conforme ilustra a Figura 38.

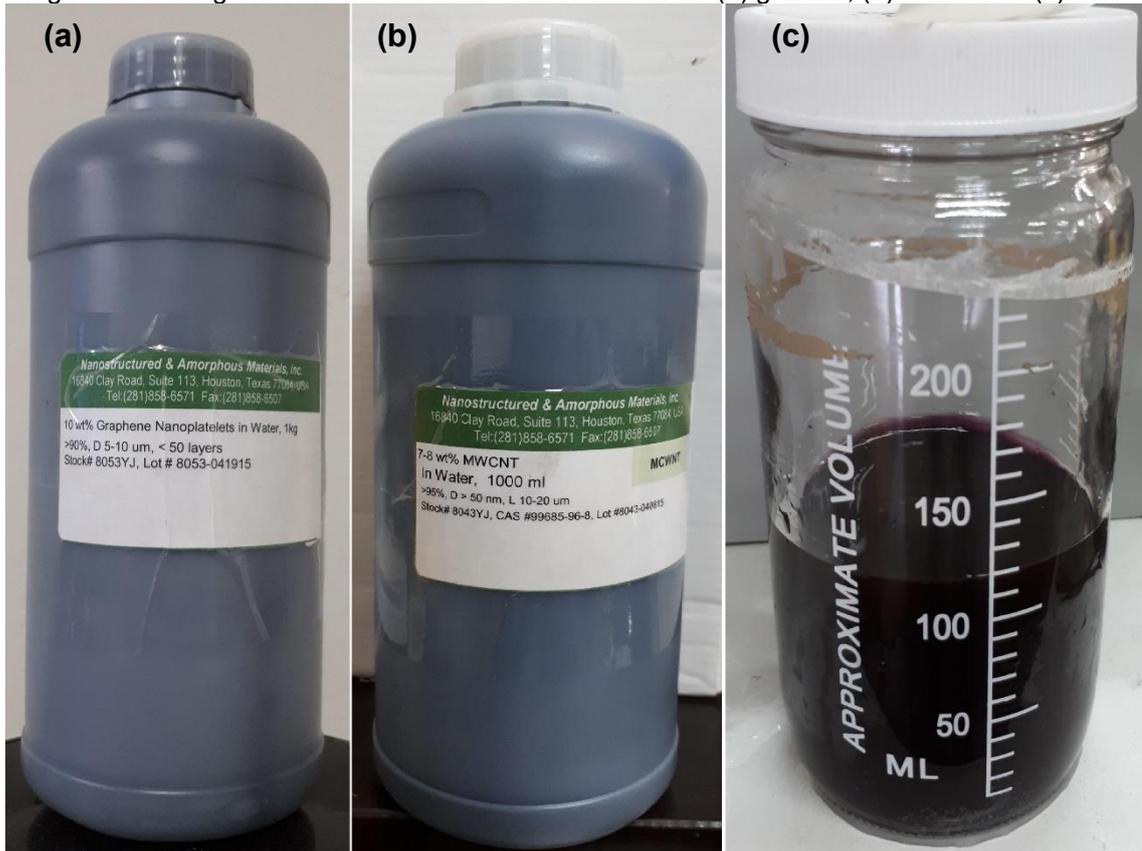
Figura 37 – Sonicador Q500, da Qsonica Sonicators: (a) painel de configuração e (b) sonda do sonicador



Fonte: Autoria própria (2023)

<sup>5</sup> O processo de sonicação em pulsos consiste em ciclos de “ligado” e “desligado” da vibração da sonda imersa no fluido e visa diminuir o aquecimento prejudicial à estabilidade sofrido pelas amostras. No processo descrito, dos 20 minutos de sonicação, em apenas 10 deles a sonda estava de fato atuando, sendo ligada e desligada automaticamente pelo equipamento controlador a cada 5 segundos.

Figura 38 – Imagens das amostras mais concentradas de (a) grafeno, (b) MWCNT e (c) ouro



Fonte: Autoria própria (2023)

O resumo das características das amostras de grafeno, MWCNT e ouro produzidas para a primeira etapa de testes podem ser vistas nas Tabela 1 e Tabela 2.

Tabela 1 – Resumo das informações referentes às amostras de grafeno produzidas

Nome da amostra	Material da nanopartícula	Características	Fluido base	$\phi_m$ (%)	$\phi_v$ (%)	Volume da amostra
GRAF 0,0001%	Grafeno	Formato de folhas/lâminas  Tamanho: 5-10 $\mu\text{m}$  90% pureza  <50 camadas  $\rho_{\text{np}} = 2,1 \text{ g/cm}^3$	Água	0,0002	0,0001	500 ml
GRAF 0,0003%				0,0006	0,0003	
GRAF 0,0005%				0,0011	0,0005	
GRAF 0,0006%				0,0017	0,0008	
GRAF 0,0010%				0,0021	0,0010	
GRAF 0,0020%				0,0042	0,0020	
GRAF 0,0030%				0,0063	0,0030	
GRAF 0,0040%				0,0084	0,0040	
GRAF 0,0050%				0,0105	0,0050	
GRAF 0,0100%				0,0211	0,0100	
GRAF 0,0300%				0,0632	0,0300	

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 2 - Resumo das informações referentes às amostras de MWCNT produzidas

Nome da amostra	Material da nanopartícula	Características	Fluido base	$\phi_m$ (%)	$\phi_v$ (%)	Volume da amostra
MWCNT 0,0001%	Nanotubo de carbono de paredes múltiplas	Tubular com paredes múltiplas	Água	0,0002	0,0001	500 ml
MWCNT 0,0003%				0,0006	0,0003	
MWCNT 0,0005%				0,0011	0,0005	
MWCNT 0,0006%		Diâmetro: >50 nm		0,0017	0,0008	
MWCNT 0,0010%				0,0021	0,0010	
MWCNT 0,0020%		95% pureza		0,0042	0,0020	
MWCNT 0,0030%				0,0063	0,0030	
MWCNT 0,0040%		Comprimento 10-20 $\mu\text{m}$		0,0084	0,0040	
MWCNT 0,0050%				0,0105	0,0050	
MWCNT 0,0100%				0,0211	0,0100	
MWCNT 0,0300%				$\rho_{np} = 2,1 \text{ g/cm}^3$	0,0632	

Fonte: Autoria própria (2023)

Tabela 3 - Resumo das informações referentes às amostras de ouro produzidas

Nome da amostra	Material da nanopartícula	Características	Fluido base	$\phi_m$ (%)	$\phi_v$ (%)	Volume da amostra
AU 0,0001%	Ouro	Esférica	Água	0,0019	0,0001	250 ml
AU 0,0003%				0,0058	0,0003	
AU 0,0005%				0,0097	0,0005	
AU 0,0006%		Tamanho: 20-30 nm		0,0155	0,0008	
AU 0,0010%				0,0194	0,0010	
AU 0,0020%		$\rho_{np} = 19,3 \text{ g/cm}^3$		0,0387	0,0020	
AU 0,0030%				0,0580	0,0030	
AU 0,0040%				0,0774	0,0040	
AU 0,0050%				0,0967	0,0050	

Fonte: Autoria própria (2023)

O processo de produção das amostras de ZnO-Ag foi ligeiramente diferente, neste, as nanopartículas em forma de pó foram dispersas em água destilada, agitadas manualmente e, posteriormente, sonicadas. As nanopartículas de ZnO-Ag foram cedidas pelo Instituto de Física da UFU, tendo sido produzidas pelo método de coprecipitação em que íons  $\text{Ag}^+$  foram usados como dopante<sup>6</sup> variando a concentração nominal de prata de 0,1 a 5%, resultando em 8 diferentes amostras de nanopartículas híbridas, como apresentado na Tabela 4.

<sup>6</sup> Dopagem é um processo químico no qual átomos estranhos são introduzidos na estrutura cristalina de uma substância; nesse caso, íons de prata ( $\text{Ag}^+$ ) introduzidos na matriz cristalina de óxido de zinco (ZnO).

Tabela 4 – Resumo das informações referentes às amostras de ZnO-Ag produzidas

Nome da amostra	Material da nanopartícula	Características	Fluido base	$\phi_m$ (%)	Volume da amostra
ZnO	ZnO puro	Esférica  Tamanho: 28-30 nm  $\rho_{np\_ZnO} = 5,61$ g/cm <sup>3</sup>  $\rho_{np\_Ag} = 10,49$ g/cm <sup>3</sup>	Água	0,01428	300 ml
ZnO-0,1%Ag	Nanopartículas de ZnO dopadas com Ag <sup>+</sup>				
ZnO-0,3%Ag					
ZnO-0,5%Ag					
ZnO-0,7%Ag					
ZnO-0,9%Ag					
ZnO-1%Ag					
ZnO-3%Ag					
ZnO-5%Ag					
Ag	Prata pura				

Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.2 ANÁLISE DA ESTABILIDADE DAS AMOSTRAS PRODUZIDAS

A estabilidade das amostras de nanofluidos produzidas foram avaliadas ao longo do tempo de forma qualitativa através de inspeção visual e quantitativa através de medidas sucessivas da absorbância. Os detalhes das avaliações realizadas estão descritas a seguir.

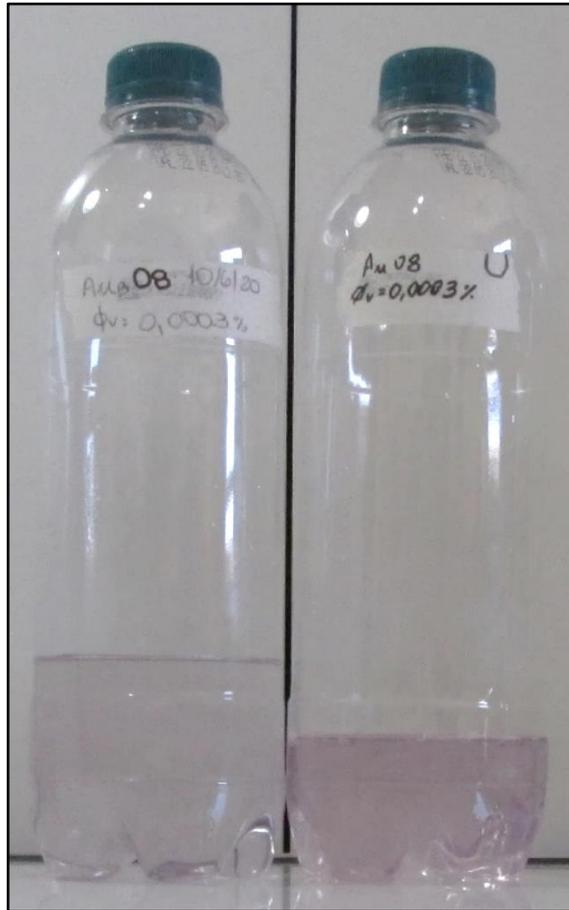
#### 3.2.1 Análise qualitativa da estabilidade: inspeção visual

Todas as amostras de nanofluidos produzidos foram observadas visualmente ao longo do tempo para possíveis sinais de degradação das amostras, tais como: mudança de cor e presença de aglomerações ou sedimentação de nanopartículas nos recipientes de armazenamento e teste. Nessa análise foi também considerada a influência da exposição à radiação solar e consequente aquecimento das amostras durante os testes experimentais na estabilidade dos nanofluidos produzidos, sendo comparadas amostras sem uso com as amostras usadas em testes nas bancadas experimentais.

Um exemplo da inspeção visual realizada em amostras com e sem uso pode ser observada na Figura 39 em que se nota uma discreta mudança na cor após exposição do nanofluidos de ouro à radiação solar. No caso de nanofluidos de ouro, especificamente, a mudança de tonalidade das amostras indica uma mudança no tamanho aparente das nanopartículas (que se dá pelo tamanho real associado ao grau de afastamento entre as nanopartículas), conforme descrito por Njoki et al. (2007) e

ilustrado pela Figura 40, em que se nota que, quanto menor a nanopartícula, mais avermelhada é a dispersão, e quanto maior a nanopartícula, mais azul-arroxeadada ela se torna.

Figura 39 – Variação de cor discreta observada em duas amostras de ouro em água de mesma concentração  $\phi_v=0,0003\%$  (não utilizada e após exposição solar)



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 40 – Variação de cor em dispersões de nanopartículas de ouro de diferentes tamanhos em água



Fonte: Njoki et al. (2007)

Essa mesma avaliação foi realizada em todas as amostras produzidas e o resultado observado no curto prazo – cerca de uma semana - foi utilizado como norteador para a realização da avaliação quantitativa da estabilidade de longo prazo – descrita na seção 3.2.2 – dos nanofluidos que visualmente apresentavam melhor estabilidade.

### 3.2.2 Análise quantitativa da estabilidade: medição da absorbância

A avaliação quantitativa da estabilidade das mostras de nanofluidos foi realizada baseando-se no princípio da variação da absorbância com a concentração de dispersões quando avaliadas pelo método de espectrofotometria UV-vis descrito na seção 2.4. Os nanofluidos que visualmente apresentaram melhor estabilidade de curto prazo tiveram a estabilidade avaliada através de medidas sucessivas da absorbância ao longo do tempo utilizando cubetas de caminho óptico 10mm e o espectrofotômetro UV-1900 da Shimadzu ilustrado na Figura 41, com largura de banda espectral de 1 nm, exatidão de +/-0,002 ABS e faixa fotométrica que vai de - 4 ABS a + 4 ABS.

Figura 41 – Espectrofotômetro UV-1900

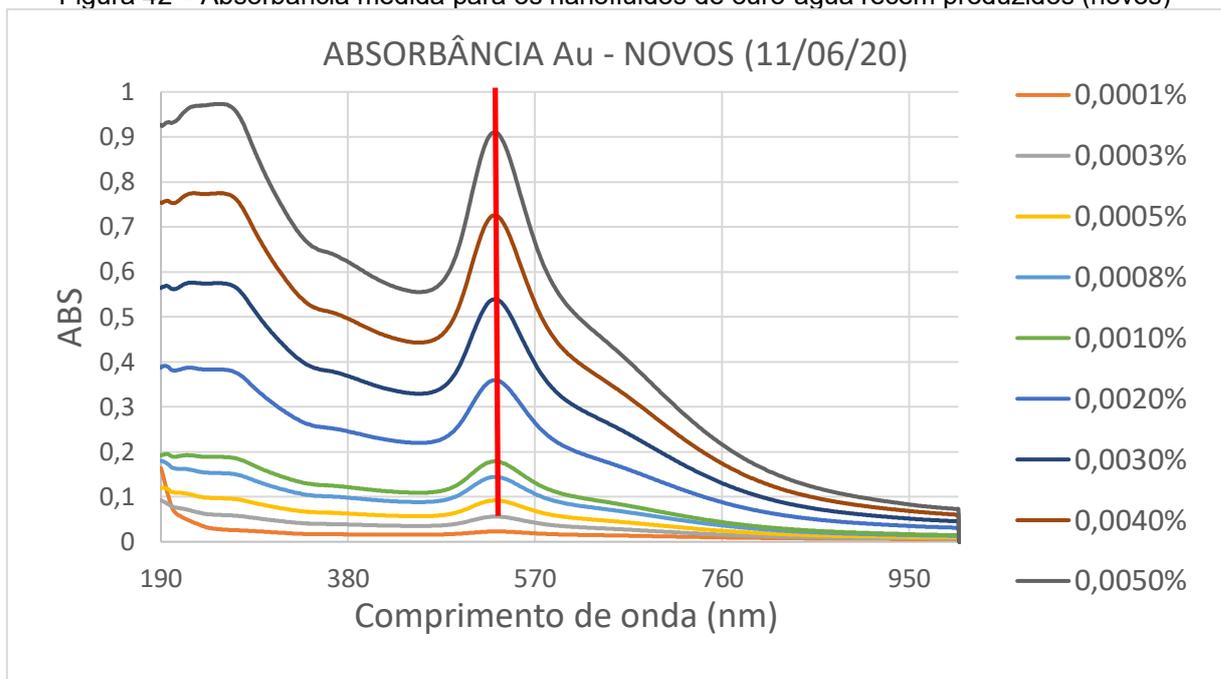


Fonte: A autoria própria (2023)

Cada uma das amostras foi avaliada em comprimentos de onda que variaram entre 190-1100nm, que corresponde aos limites do equipamento. Destaca-se que a análise da estabilidade através das medições da absorbância se dá comparando os valores medidos ao longo dos dias para um mesmo comprimento de onda escolhido, respeitando-se a faixa fotométrica do equipamento ao realizar a escolha<sup>7</sup>. No caso das amostras de nanofluidos de ouro, o comprimento de onda escolhido foi 520 nm, já para as amostras de MWCNT, o comprimento de onda escolhido para a análise da estabilidade foi 745 nm. As amostras de grafeno e ZnO-Ag não apresentaram estabilidade visual no curto prazo, desta maneira, as medidas de absorbância desses não foi realizada.

Baseando-se nos princípios expostos na seção 2.4, foram realizadas medições de absorbância de todas as 9 concentrações de nanofluidos de ouro em água logo após sua produção na faixa de 190-1100nm, obtendo-se o gráfico apresentado na Figura 42. A partir dos dados obtidos, foi avaliada a absorbância de cada amostra no comprimento de onda escolhido (520 nm) destacado no gráfico através da linha vertical vermelha.

Figura 42 – Absorbância medida para os nanofluidos de ouro-água recém produzidos (novos)



Fonte: Autoria própria (2023)

<sup>7</sup> Algumas dispersões com concentrações muito altas forneceriam valores de absorbância que extrapolam a faixa fotométrica do equipamento utilizado UV-1900 em determinados comprimentos de onda, dessa maneira, se fez necessária a escolha de comprimentos de onda no qual as absorbâncias medidas estivessem abaixo de +4ABS.

De posse dos valores de absorvância, foi construída a Tabela 5 e, a partir dela, o gráfico exposto na Figura 43, através do qual se pôde estabelecer a relação da absorvância com a concentração de nanopartículas em cada amostra realizando uma regressão linear, cuja equação é:

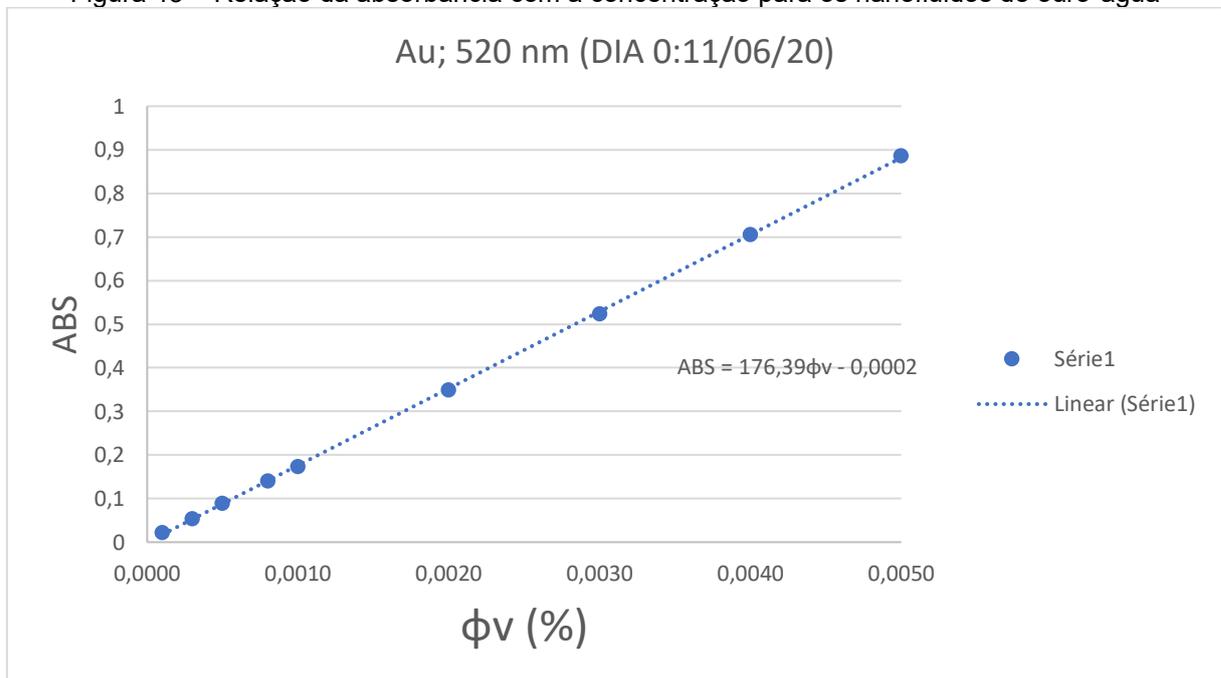
$$ABS_{Au} = 176,39 \times \phi v_{Au} - 0,0002 \quad (5)$$

Tabela 5 – Absorvância das amostras de nanofluidos de ouro-água em  $\lambda=520$  nm

		Absorvância em $\lambda=520$ nm							
$\phi v$ (%)	0,0001	0,0003	0,0005	0,0008	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0050
ABS	0,022	0,054	0,089	0,14	0,174	0,349	0,524	0,706	0,886

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 43 – Relação da absorvância com a concentração para os nanofluidos de ouro-água



Fonte: Autoria própria (2023)

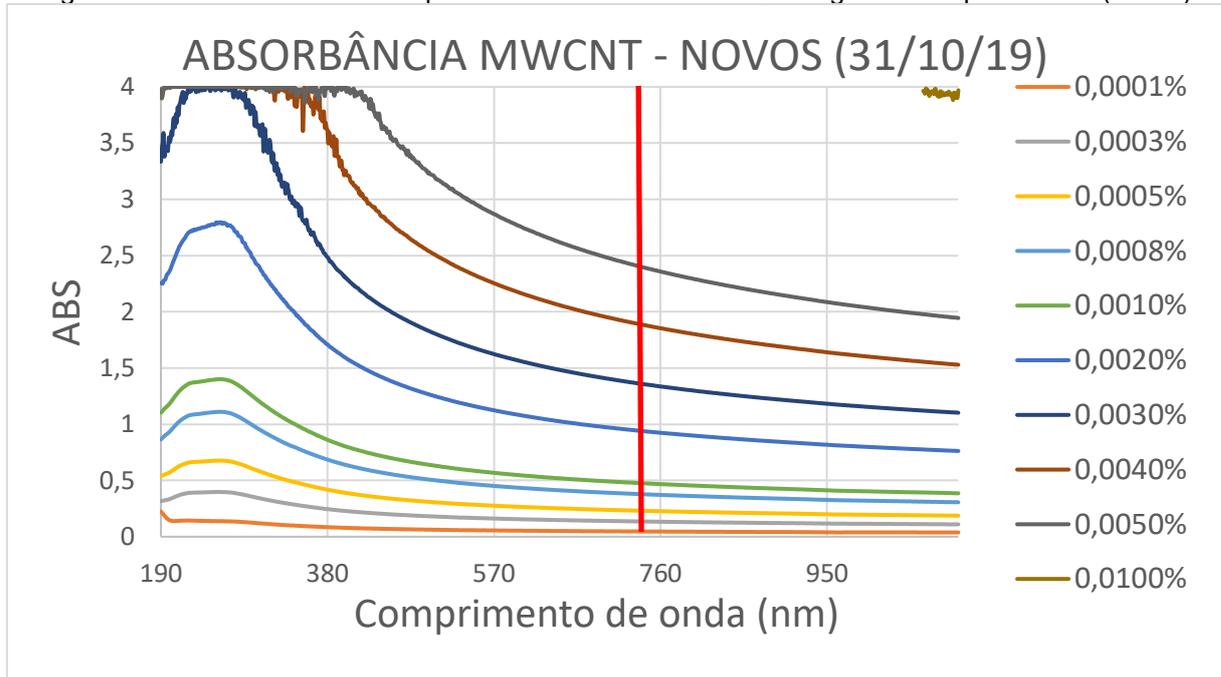
Rearranjando a Equação (5), obtemos a Equação (6), que permite estimar a concentração real das amostras de ouro-água ao longo do tempo a partir de novas medições de absorvância.

$$\phi v_{Au} = \frac{ABS_{Au} + 0,0002}{176,39} \quad (6)$$

Analogamente ao procedimento adotado para os nanofluidos de ouro, procedeu-se às medições de absorvância das amostras de nanofluidos MWCNT-

água, obtendo-se o gráfico apresentado na Figura 44, assim, foi obtida a absorvância de cada amostra no comprimento de onda escolhido (745 nm) destacado no gráfico através da linha vertical vermelha.

Figura 44 - Absorvância medida para os nanofluidos de MWCNT-água recém produzidos (novos)



Fonte: Autoria própria (2023)

A partir dos dados coletados no comprimento de onda 745 nm, foi construída a Tabela 6 e o gráfico da Figura 45 que nos fornece a relação entre absorvância e concentração de nanopartículas da amostra através da seguinte equação de regressão linear:

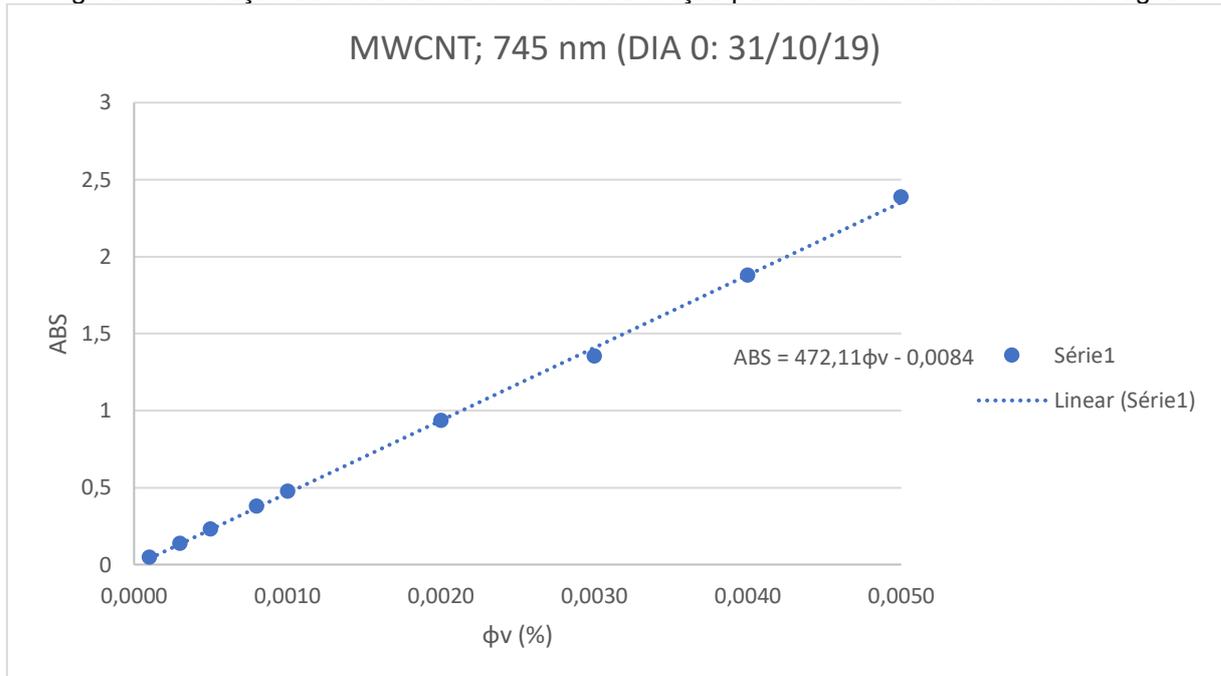
$$ABS_{MWCNT} = 472,11 \times \phi v_{MWCNT} - 0,0084 \quad (7)$$

Tabela 6 - Absorvância das amostras de nanofluidos de MWCNT-água em  $\lambda=745$  nm

		Absorvância em $\lambda=745$ nm								
$\phi v$ (%)	0,0001	0,0003	0,0005	0,0008	0,0010	0,0020	0,0030	0,0040	0,0050	0,0100
ABS	0,046	0,135	0,23	0,376	0,473	0,935	1,352	1,876	2,386	

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 45 - Relação da absorvância com a concentração para os nanofluidos de MWCNT-água



Fonte: Autoria própria (2023)

Rearranjando a Equação (7), obtemos a (8), que foi utilizada posteriormente para estimar ao longo do tempo a concentração real das amostras de MWCNT-água e, assim, realizar uma análise quantitativa da estabilidade de longo prazo das amostras.

$$\phi_{v_{MWCNT}} = \frac{ABS_{MWCNT} + 0,0084}{472,11} \quad (8)$$

### 3.3 BANCADA 1 – EXPOSIÇÃO DE NANOFLUIDOS À RADIAÇÃO SOLAR

Para a primeira etapa de testes experimentais deste trabalho foi construído um aparato que possibilitasse a exposição dos nanofluidos e seu respectivo fluido base à radiação solar, bem como a aquisição de dados de radiação solar incidente e temperatura dos fluidos ao longo do dia.

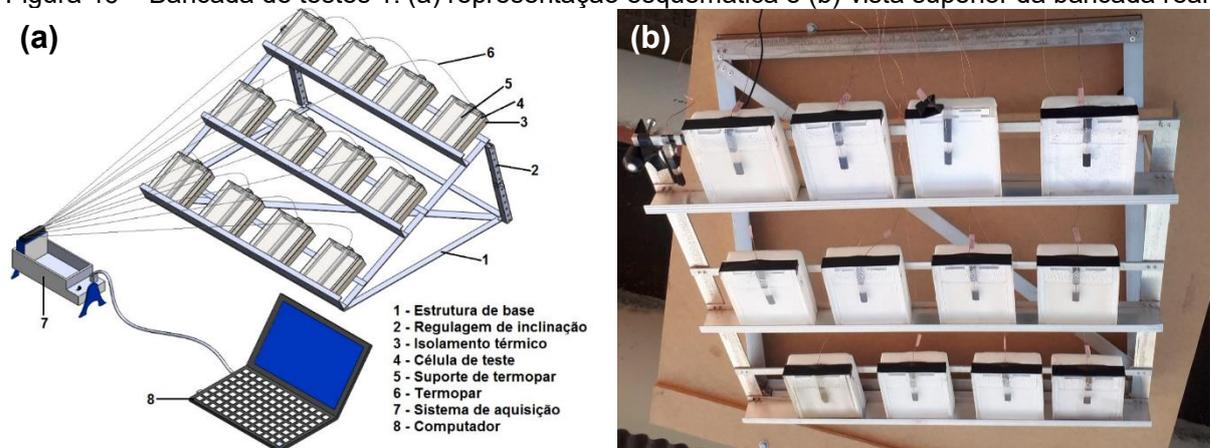
#### 3.3.1 Características gerais da bancada de testes 1

A bancada 1 foi, então, construída conforme esquema e foto apresentados na Figura 46, tendo as seguintes características construtivas:

- Bancada instalada em local com plena exposição à radiação solar ao longo do dia e localizada na cidade de Uberlândia-MG (18° 54' 41" Sul, 48° 15' 44" Oeste);

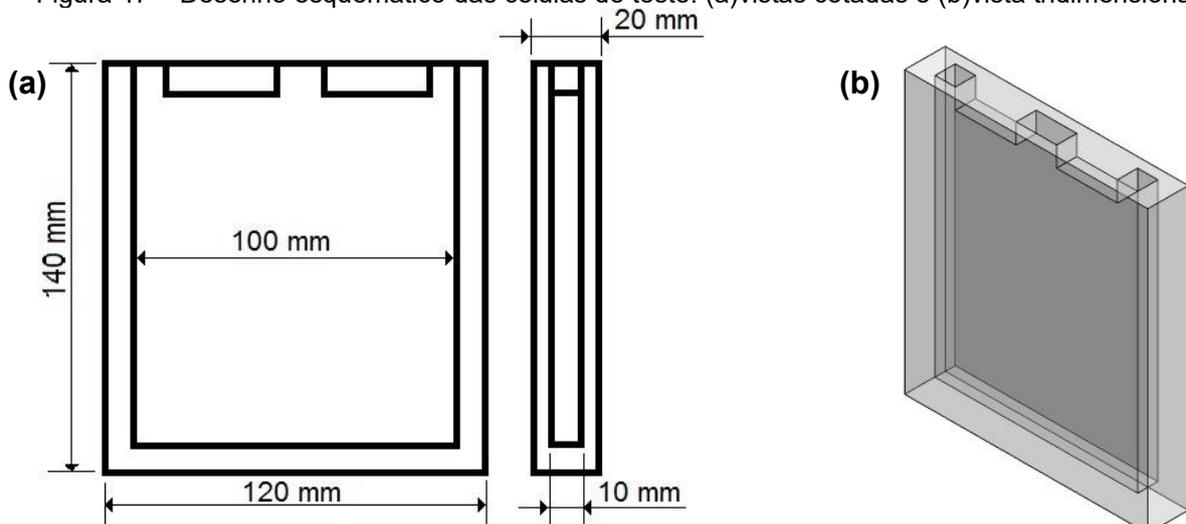
- Estrutura de base em alumínio que permite o posicionamento de até 12 células de teste simultaneamente;
- Células de teste projetadas para comportar 100 ml de líquido, confeccionadas em chapas de acrílico de 5 mm e espessura livre de 10 mm, conforme Figura 47;
- Hastes em acrílico com alça para posicionamento de um termopar na posição central de fluido de cada célula de teste;
- Um termopar fixado na estrutura de base para avaliação da temperatura ambiente;
- Medidor de radiação solar fixado na estrutura de base no mesmo plano da face frontal das células de teste.

Figura 46 – Bancada de testes 1: (a) representação esquemática e (b) vista superior da bancada real



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

Figura 47 – Desenho esquemático das células de teste: (a) vistas cotadas e (b) vista tridimensional.

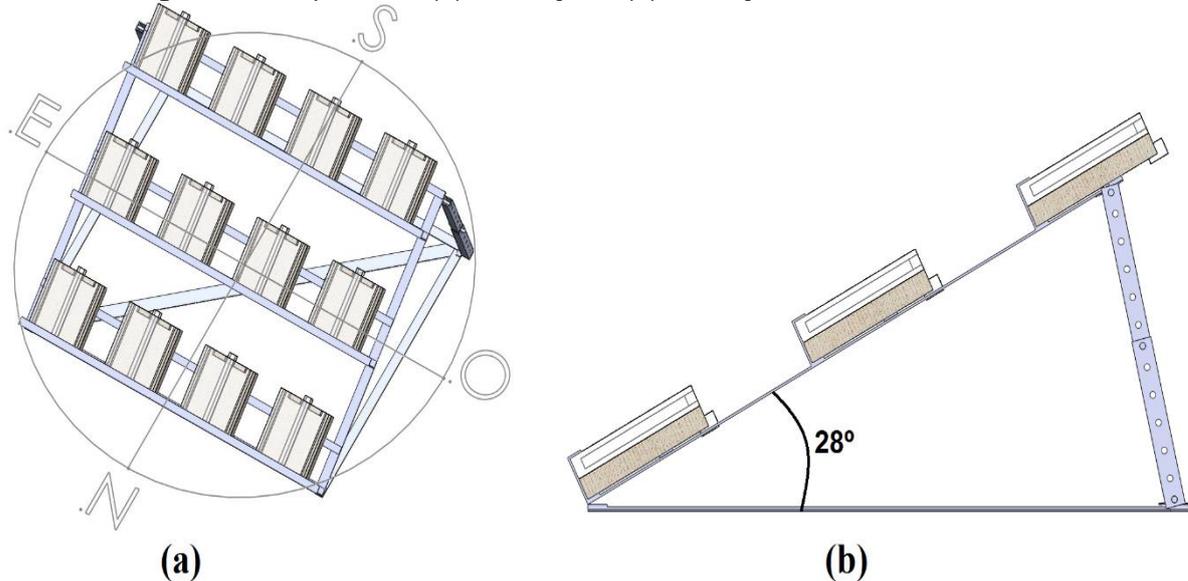


Fonte: Elaborado pela autora (2023)

### 3.3.2 Posicionamento da bancada de testes 1

A bancada de testes 1, conforme Figura 48, foi orientada e inclinada seguindo a norma ABNT NBR 15569 (2021), tendo a face frontal voltada para o norte, a face traseira devidamente isolada termicamente e com uma inclinação de  $28^\circ$  em relação ao solo para compensar a latitude local ( $18^\circ$ ) e favorecer o período do inverno ( $10^\circ$ ).

Figura 48 - Esquema da (a) orientação e (b) inclinação da bancada de testes.



Fonte: Elaborado pela autora (2023)

### 3.3.3 Cronograma e condições de testes – bancada 1

Os testes experimentais da bancada 1 foram realizados nos meses de junho e outubro, conforme cronograma apresentado na Tabela 7, tendo cada dia de teste se iniciado por volta de 7:00 AM e encerrado por volta de 5:00 PM.

Tabela 7 – Cronograma de testes bancada 1

Dias de teste	Nanofluido testado
08/10/18	Grafeno
14, 16, 17, 18 e 19/6/19	ZnO-Ag
11, 12, 13, 14 e 15/6/20	Ouro
15, 17, 18, 19 e 20/10/19	MWCNT

Para a realização dos testes, ao início do primeiro dia de cada etapa, cada célula foi preenchida com 100 ml de líquido (nanofluido ou fluido base) e vedada. Os fluidos foram testados durante cinco dias, não havendo reposição de seu conteúdo ao longo desses dias, sendo o líquido retirado ao final desse período e as células de teste devidamente limpas para cada nova etapa.

### 3.4 INSTRUMENTAÇÃO DAS BANCADAS EXPERIMENTAIS

A aquisição de dados de temperatura e radiação das bancadas de testes experimentais foi composta por:

- Sensores de temperatura: termopares do tipo T devidamente calibrados para as condições de teste;

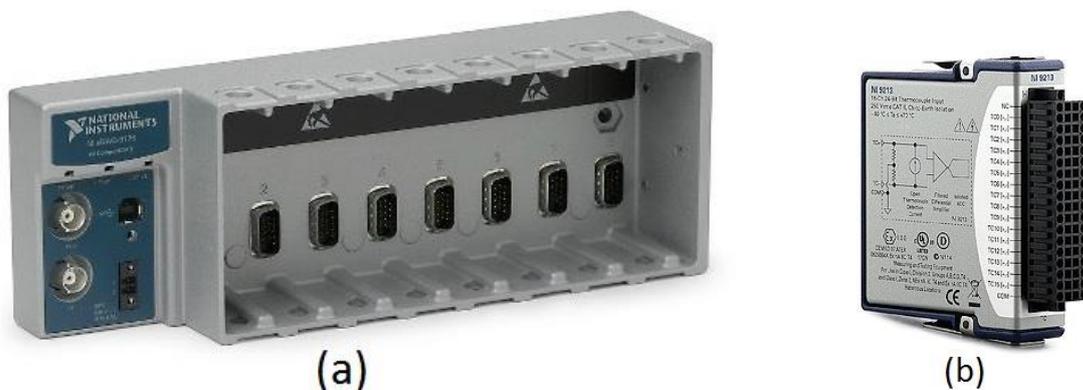
Figura 49 – Termopar do tipo T utilizado na bancada 2



Fonte: Autoria própria (2023)

- Chassi NI cDAQ-9178 e módulo de aquisição NI 9213 da National Instruments – conforme Figura 50 para aquisição dos sinais provenientes dos termopares;

Figura 50 - Sistema de aquisição de dados; (a) Chassi NI cDAQ-9178, (b) módulo de aquisição NI 9213.



Fonte: Site oficial da National Instruments Disponível em: < <http://www.ni.com/data-acquisition/compactdaq/pt/>> Acesso em: 15/12/2016

- Medidor de radiação solar MES-200, da Instrutherm (Figura 51): fornece dados de radiação solar incidente em  $W/m^2$ , resolução de  $0,1 W/m^2$  (se  $<100W/m^2$ ) ou  $1 W/m^2$  (se  $>100W/m^2$ ) e exatidão de  $10 W/m^2$ ;

Figura 51 – Medidor de radiação MES-200, da Instrutherm



Fonte: Autoria própria (2023)

- Software “Solar Meter V8.01”, próprio do MES-200, cuja interface é mostrada na Figura 52;

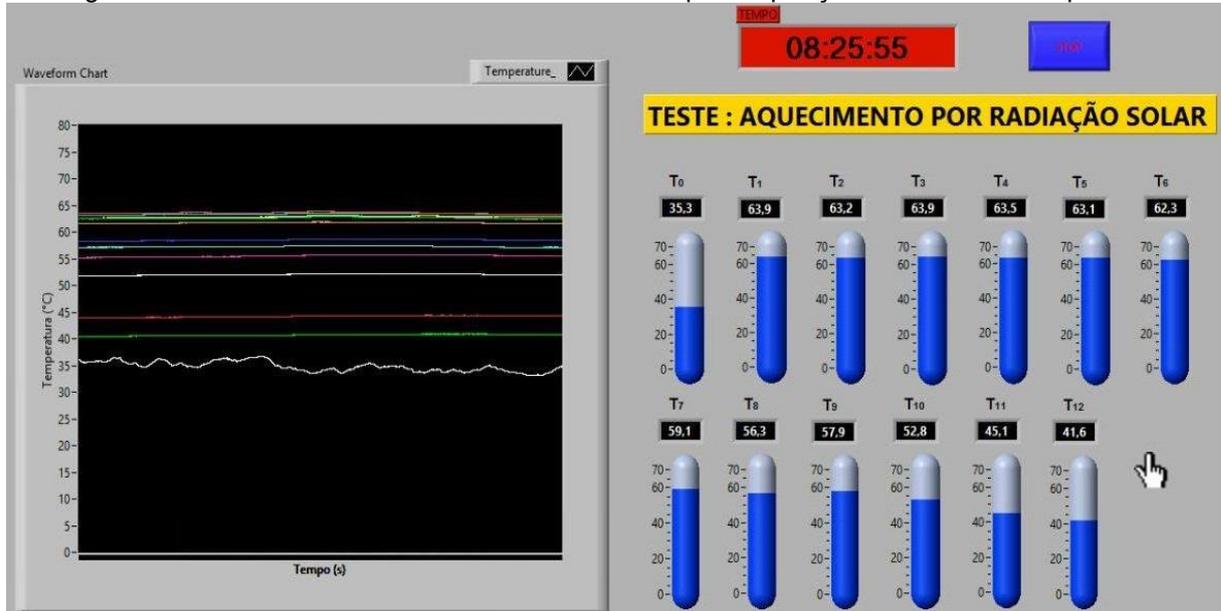
Figura 52 – Interface do software “Solar meter V8.01”



Fonte: Autoria própria (2023)

- Computador para coleta, armazenamento e análise dos dados coletados;
- Interface em ambiente LabView®, conforme Figura 53, para a aquisição e armazenamento dos dados de temperatura provenientes de até 13 termopares, configurado para aquisição de dados na frequência de 1Hz;

Figura 53 – Interface criada em ambiente Labview® para aquisição de dados de temperatura



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.5 EQUAÇÕES DE ANÁLISE DA BANCADA DE TESTES 1

#### 3.5.1 Razão de energia armazenada (“SER”)

A razão de energia armazenada (do inglês, *Stored Energy Ratio*, “SER”) é um importante parâmetro para análise do desempenho dos nanofluidos como meio de conversão fototérmica, representando quanta energia a mais o nanofluido foi capaz de armazenar devido à presença das nanopartículas no fluido base.

Esse parâmetro é matematicamente definido como a razão entre as energias armazenadas pelo nanofluido e seu fluido base desde o início do teste (instante “t=0”) até um dado instante de tempo “t”, como apresentado na Equação (9).

$$SER = \frac{Q_{nf}(t)}{Q_{fb}(t)} = \frac{(m_{fb}c_{fb} + m_{np}c_{np})(T_{nf}(t) - T_{nf}(0))}{m_{fb}c_{fb}(T_{fb}(t) - T_{fb}(0))} \quad (9)$$

Onde:

- SER: razão de energia armazenada;

- m: massa [g];
- c: calor específico [kJ/g°C];
- t: tempo [s];
- T(t): Temperatura do fluido em um instante de tempo t [°C].

E os subscritos representam:

- fb: fluido base, no caso, água;
- np: nanopartícula;
- nf: nanofluido.

Reavaliando a Equação (9) e sabendo-se que o calor específico dos materiais das nanopartículas é inferior ao da água e que as concentrações utilizadas nesse trabalho são suficientemente pequenas para tornar o produto  $m_{np}c_{np}$  desprezível quando comparado ao produto  $m_{fb}c_{fb}$ , reduz-se a Equação 9 a:

$$SER = \frac{T_{nf}(t) - T_{nf}(0)}{T_{fb}(t) - T_{fb}(0)} \quad (10)$$

Desta maneira, o parâmetro “SER” para as condições de teste desse trabalho se resume à razão entre as variações de temperatura do nanofluido e do fluido base.

Para as condições de teste desse trabalho, estabeleceu-se como condição para o cálculo do “SER” o período do início do aquecimento das amostras até, aproximadamente, o meio-dia solar (cerca de cinco horas após o início dos testes).

### 3.5.2 Taxa de absorção específica (“SAR”)

A eficiência de conversão fototérmica dos nanofluidos pode ser representada através da taxa de absorção específica “SAR” (do inglês, *Specific Absorption Rate*), que representa a capacidade de absorção de energia das nanopartículas por unidade de massa e tempo pela equação:

$$SAR = \frac{(m_{fb}c_{fb} + m_{np}c_{np})\Delta T_{nf} - m_{fb}c_{fb} \Delta T_{fb}}{1000m_{np}\Delta t} \quad (11)$$

Onde:

- SAR: taxa de absorção específica [kW/g];
- m: massa [g];
- c: calor específico [kJ/g°C];

- $\Delta T$ : variação na temperatura [ $^{\circ}\text{C}$ ];
- $\Delta t$ : variação no tempo [s].
- E os subscritos representam:
- fb: fluido base, no caso, água;
- np: nanopartícula;
- nf: nanofluido.

De maneira semelhante ao observado no cálculo do SER, nota-se que  $m_{fb}c_{fb} \gg m_{np}c_{np}$ , assim, a Equação (11) pode ser simplificada como:

$$\text{SAR} = \frac{m_{fb}c_{fb}}{1000m_{np}} \left( \frac{\Delta T_{nf}}{\Delta t} - \frac{\Delta T_{fb}}{\Delta t} \right) \quad (12)$$

Admitindo-se que tanto a massa da amostra, quanto o calor específico da água ( $c_{\text{água}}=4,18\text{J/g}^{\circ}\text{C}$ ) não variem ao longo do período de testes, conclui-se que o “SAR” varia de acordo com a diferença entre a taxa de variação da temperatura do nanofluido e da água.

Para as condições de teste desse trabalho, estabeleceu-se como condição para o cálculo das taxas de variação de temperatura intervalos de tempo ( $\Delta t$ ) de 5 minutos, sendo avaliadas do início do aquecimento das amostras até, aproximadamente, o meio-dia solar (cerca de cinco horas após o início dos testes).

### 3.6 BANCADA 2 – COLETORES SOLARES UTILIZANDO NANOFLUIDOS

A partir dos resultados obtidos na primeira fase de testes experimentais realizados na bancada 1, foram selecionados os nanofluidos com melhores resultados a fim de serem testados em uma aplicação prática que utiliza o fenômeno de conversão fototérmica para aquecimento de um fluido secundário, no caso, água. Para tal, foi construída uma segunda bancada experimental que possibilitasse o uso de nanofluidos como meio absorvedor de radiação solar em um coletor de placa plana em escala reduzida devidamente modificado para comportar líquidos em seu interior, bem como a aquisição de dados de radiação solar incidente e de temperatura da água na entrada e saída do coletor.

A bancada 2 foi idealizada inicialmente para que se aproximasse da proporção de 1:10 em relação a um coletor solar de placa plana de uso residencial de  $1\text{m}^2$  de área, que utiliza um reservatório térmico (“boiler”) com capacidade de 200L, assim

sendo, foi projetado um sistema de aquecimento solar (SAS) em escala reduzida com área e capacidades nominais de 0,1m<sup>2</sup> e 20L, conforme esquematizado na Figura 54.

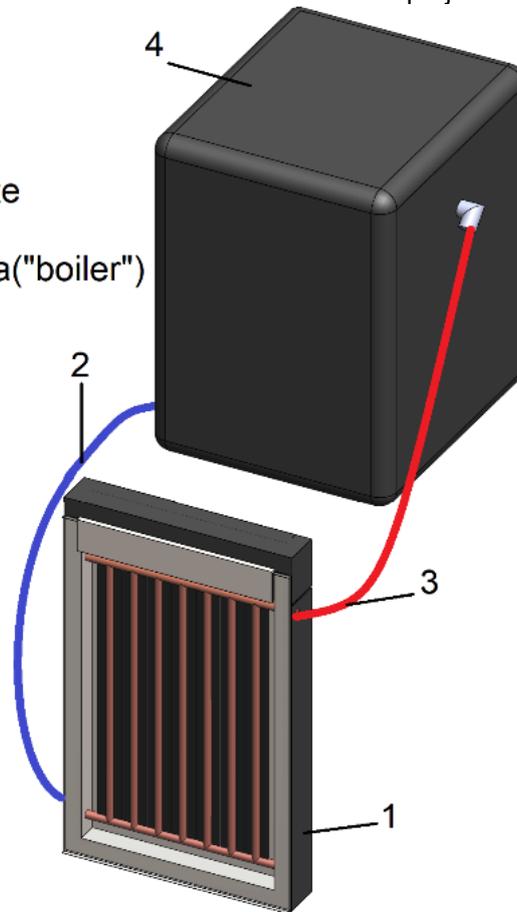
Figura 54 – Desenho esquemático do SAS em escala reduzida projetado

1- Coletor solar

2- Entrada de água fria

3- Saída de água quente

4- Reservatório de água("boiler")



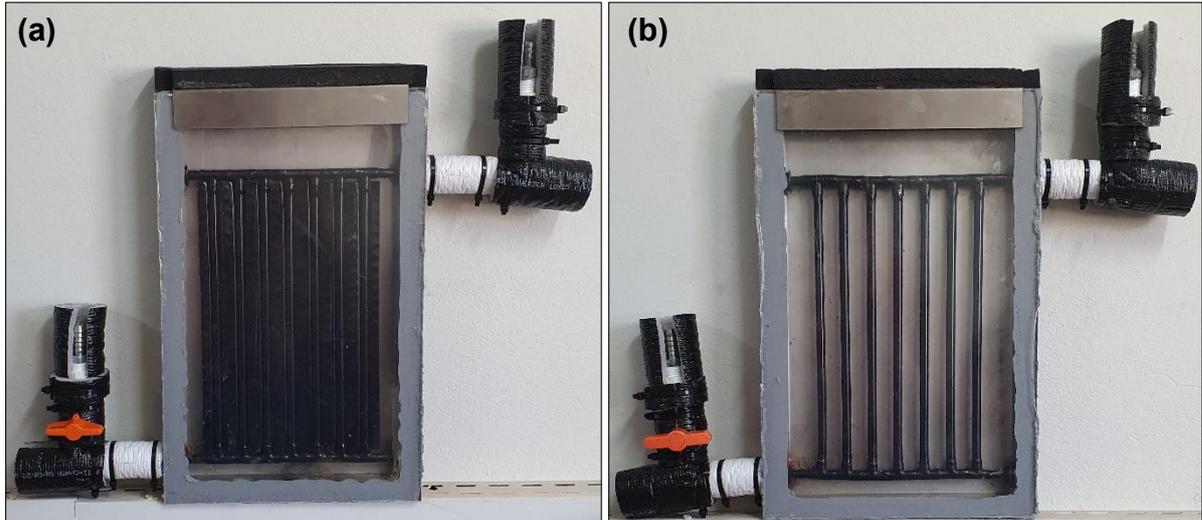
Fonte: Autoria própria (2023)

Com o objetivo de realizar a análise comparativa do desempenho dos nanofluidos como meio de conversão fototérmica em relação ao modelo de coletor solar tradicional, foram construídos 3 conjuntos de coletor+boiler, sendo:

- Coletor 1: coletor de placa plana tradicional em escala reduzida composto por serpentina e placa absorvedora, conforme Figura 55(a); na fase de testes, o coletor não foi preenchido com nanofluidos;
- Coletor 2: coletor modificado no qual a placa absorvedora foi removida, restando apenas a serpentina de aquecimento, conforme Figura 55(b); na fase de testes, os nanofluidos foram usados para preencher o interior do coletor (em substituição ao ar) e eram os únicos responsáveis pelo processo de conversão fototérmica.

- Coletor 3: coletor de placa plana tradicional em escala reduzida composto por serpentina e placa absorvedora, idêntico ao Coletor 1; na fase de testes, os nanofluidos foram usados para preencher o interior do coletor (em substituição ao ar) e trabalharam em conjunto com a placa absorvedora no processo de conversão fototérmica;

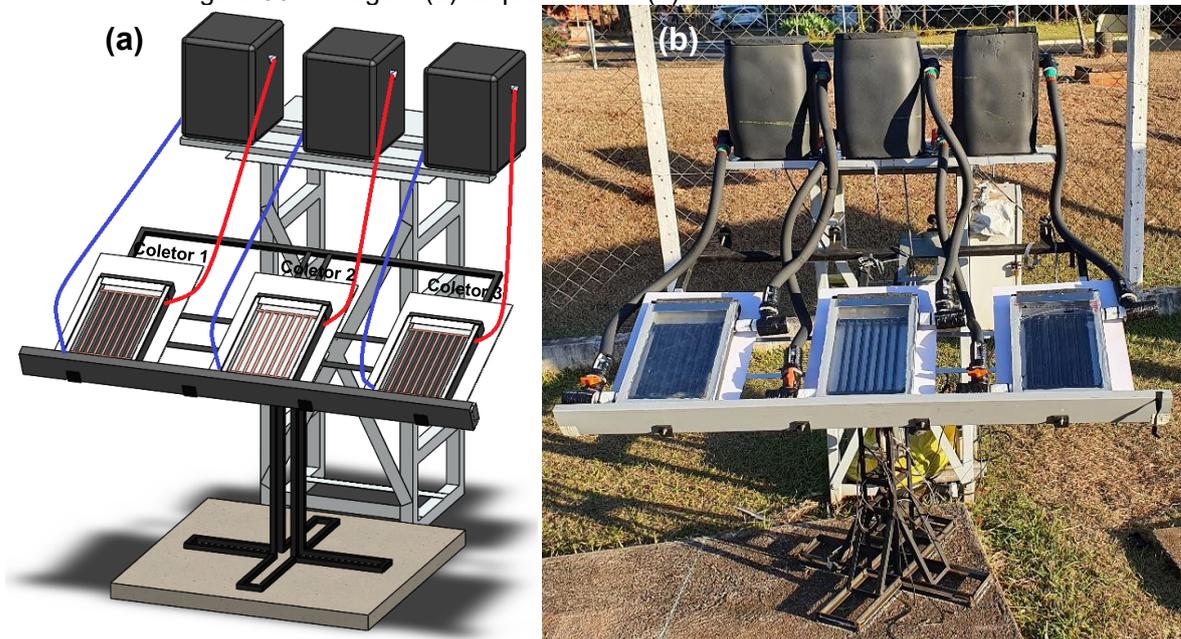
Figura 55 – Fotos dos coletores com (a) placa e serpentina e (b) apenas serpentina



Fonte: Autoria própria (2023)

O desenho esquemático e a imagem da bancada de testes 2 montada podem ser visualizados na Figura 56.

Figura 56 – Imagem (a) esquemática e (b) real da bancada de testes 2



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.6.1 Características gerais da bancada de testes 2

O sistema idealizado foi então construído, tendo as seguintes características construtivas:

- Bancada instalada em local com plena exposição à radiação solar ao longo do dia e localizada na cidade de Uberlândia-MG (18° 54' 41" Sul, 48° 15' 44" Oeste);
- Estruturas de base metálica que permitem o posicionamento de 3 conjuntos de coletor e reservatório térmico ("boiler") simultaneamente;
- Um termopar instalado em cada seção de entrada e de saída de água dos coletores solares;
- Um termopar fixado na estrutura de base dos coletores para avaliação da temperatura ambiente;
- Medidor de radiação solar fixado na estrutura de base no mesmo plano da face frontal dos coletores solares.

### 3.6.2 Características construtivas dos coletores solares

Os coletores solares podem ser representados de forma esquemática pela Figura 57, tendo as seguintes características:

- Coletor solar com tampa superior que permite acesso à área de absorção (placa e/ou serpentina) para preenchimento e esvaziamento utilizando os nanofluidos a serem testados, bem como proceder à limpeza;
- Revestimento frontal do coletor em acrílico, espessura de 5mm
- Demais faces do coletor isoladas termicamente utilizando manta de espuma elastomérica ARMAFLEX® de 19mm de espessura (condutividade térmica  $\leq 0,036 \text{ W/(m.K)}$ )
- Dimensões externas do coletor+isolamento térmico (AxLxP): 45x28x5 cm
- Dimensões internas da estrutura metálica de cada coletor (AxLxP): 41x24x2,5 cm
- Volume interno útil do coletor (considerando o seu uso na posição inclinada): 2,25 L
- Diâmetro dos tubos absorvedores ("serpentina"): 9,525 mm (3/8")
- Quantidade de tubos absorvedores em cada coletor: 7

- Dimensão total da placa absorvedora em alumínio (AxL): 29,1x19,6 cm
- Serpentina e placas absorvedoras pintadas com tinta spray preta fosca

Figura 57 – Detalhes do coletor solar em escala reduzida projetado

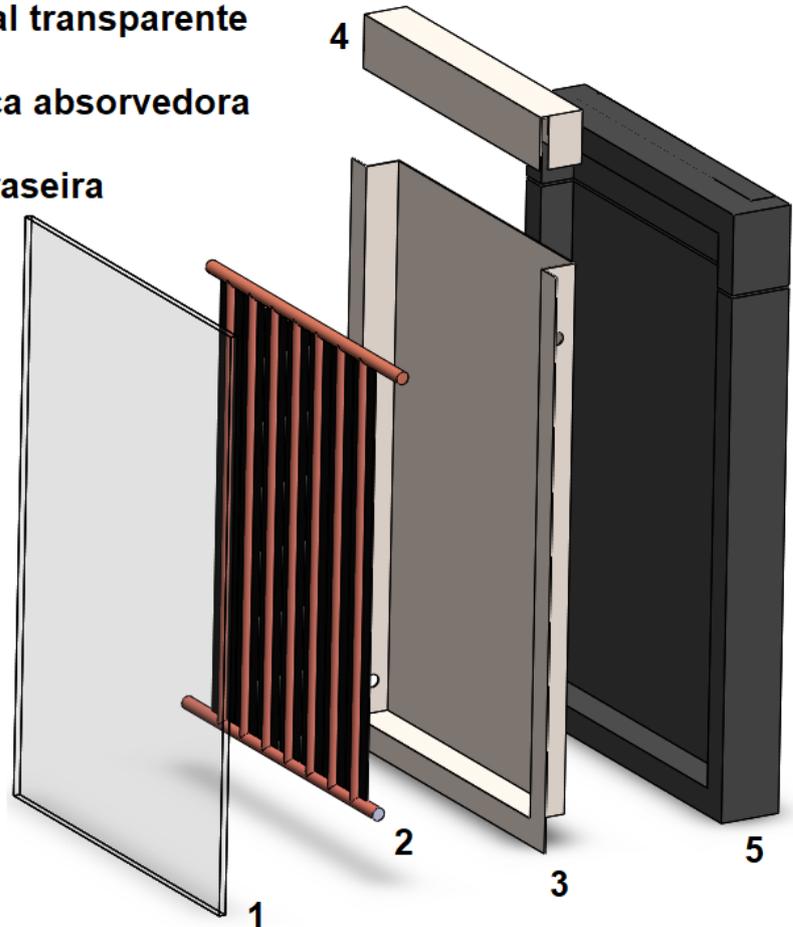
**1 - Revestimento frontal transparente**

**2- Serpentina com placa absorvedora**

**3- Estrutura metálica traseira**

**4- Tampa superior**

**5- Isolamento térmico**



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.6.3 Características construtivas dos Reservatórios térmicos (“boiler”)

Os reservatórios térmicos construídos podem ser visualizados na Figura 58 e possuem as seguintes características:

- Dimensões externas do reservatório térmico “boiler” (AxLxP): 39x28,5x32,5 cm
- Todas as faces do “boiler” isoladas termicamente utilizando manta de espuma elastomérica ARMAFLEX® de 19mm de espessura (condutividade térmica  $\leq 0,036$  W/(m.K))
- Volume total do reservatório de água (“boiler”): 22,5 L

Figura 58 – Reservatório de água (“boiler”)



Fonte: Autoria própria (2023)

#### 3.6.4 Características construtivas das conexões coletor-boiler

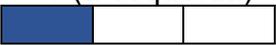
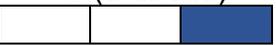
- Diâmetro das mangueiras: 1/2"
- Mangueiras isoladas termicamente utilizando tubos de espuma elastomérica ARMAFLEX® de 13mm de espessura (condutividade térmica  $\leq 0,036$  W/(m.K))
- Conexões e válvulas isoladas termicamente com tubo isolante EPEX® de polietileno blindado de 12mm de espessura (condutividade térmica  $\leq 0,037$  W/(m.K))

#### 3.6.5 Posicionamento da bancada de testes 2

A posição e características dos coletores segue a sequência exposta na Tabela 8. A orientação da bancada 2, bem como a inclinação utilizadas para os testes experimentais ( $28^\circ$  em relação à horizontal) observadas na Figura 59, seguem, assim como na bancada 1, os critérios estabelecidos na norma ABNT NBR 15569. O posicionamento adotado garante a exposição plena e igual dos três coletores à

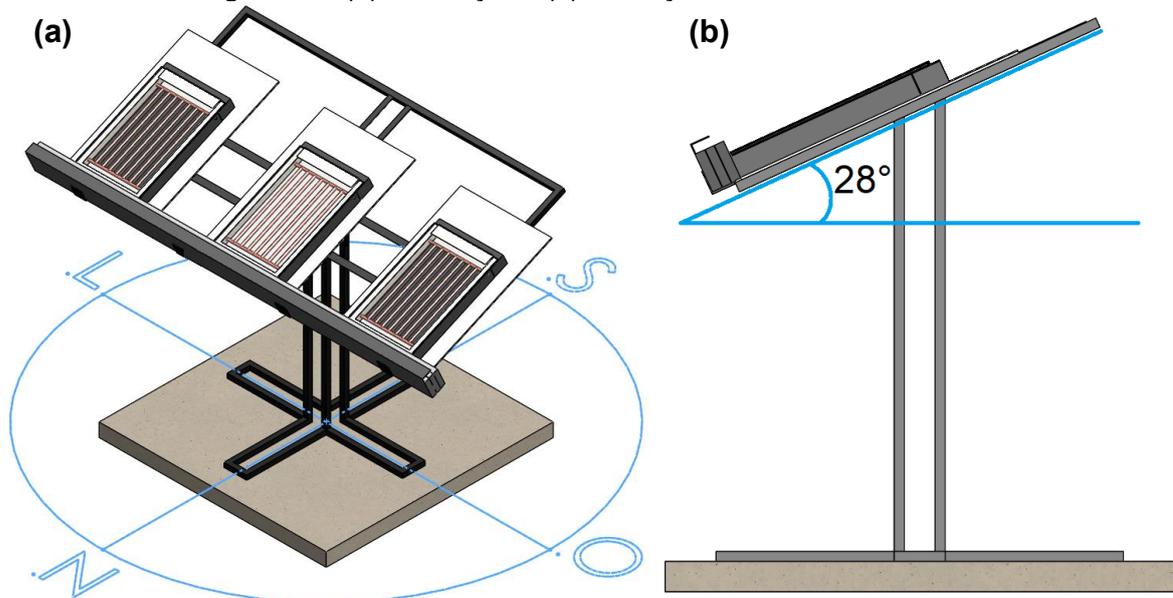
radiação solar, assim, a sequência adotada não influencia os resultados e os coletores foram mantidos fixos.

Tabela 8 – Características dos coletores na bancada de testes 2

	Coletor 1	Coletor 2	Coletor 3
Sigla representativa	col1	col2	col3
Configuração construtiva	Tradicional	Modificado (placa absorvedora removida)	Tradicional
Tipo de superfície de absorção	Serpentina +Placa absorvedora (etapa de validação e etapa de testes com nanofluidos)	Apenas Serpentina absorvedora (etapa de validação)  Serpentina +Nanofluidos (etapa de testes com nanofluidos)	Serpentina +Placa absorvedora (etapa de validação)  Serpentina +Placa absorvedora +Nanofluidos (etapa de testes com nanofluidos)
Posição na bancada de testes	1 (à esquerda) 	2 (central) 	3 (à direita) 

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 59 – (a) Orientação e (b) inclinação da bancada de testes 2



Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.6.6 Cronograma e condições de testes – bancada 2

Além das condições expostas até aqui, os testes experimentais da bancada 2 seguiram o cronograma apresentado na Tabela 9, tendo sido realizados nos meses de julho e agosto, sendo que cada dia de teste se iniciou por volta de 8:00 AM e se encerrou por volta de 5:30 PM.

Tabela 9 – Cronograma de testes bancada 2

Dias de teste	Descrição
22, 25 e 26/7/23	Validação – Etapa 1
27, 29 e 30/7/23	Validação - Etapa 2
5, 6, 7, 8 e 9/8/23	MWCNT, $\Phi_v=0,0010\%$
11, 12, 13, 14 e 15/8/23	MWCNT, $\Phi_v=0,0008\%$
16, 17, 18, 19 e 20/8/23	MWCNT, $\Phi_v=0,0005\%$

Fonte: Autoria própria (2023)

Durante a etapa 2 da validação e na etapa de testes com nanofluidos um dos coletores de configuração tradicional (Coletor 1 ou 3) e o coletor modificado (sem placa absorvedora, Coletor 2) foram preenchidos com 2,25L de líquido ao redor das placas e serpentinas de aquecimento, sem reposição ao longo dos dias, sendo mantidos vedados durante esse período. Cada etapa de validação teve três dias de duração e cada concentração de nanofluido foi testada por um período de cinco dias consecutivos. Após os testes com cada concentração de nanofluido, o interior dos coletores solares foi devidamente limpo para evitar possíveis contaminações entre os fluidos testados.

### 3.7 VALIDAÇÃO DA BANCADA DE TESTES 2

Os testes de validação da bancada foram divididos em 2 etapas: Na primeira etapa, os três coletores - dois de configuração tradicional, com tubos (“serpentina”) e placa absorvedora, e o que opera sem placa absorvedora, apenas com o uso da serpentina - estavam preenchidos com ar em seu interior. Na segunda etapa, um dos coletores com serpentina e placa absorvedora, bem como o coletor construído apenas com uso de serpentina foram preenchidos em seu interior com água para verificar a estanqueidade e comportamento do sistema sob essas condições. Além disso, o preenchimento com líquido dos coletores de composição

tradicional foi alternado ao longo dos dias de teste, como pode ser verificado na Tabela 10.

Tabela 10 - Configuração da bancada de testes 2 nas duas etapas de validação

Etapa	Dia de teste de validação	Coletor 1 ("col1") Tradicional (Serpentina +Placa absorvedora)	Coletor 2 ("col2") Modificado (Apenas Serpentina absorvedora)	Coletor 3 ("col3") Tradicional (Serpentina +Placa absorvedora)
		Preenchimento da cavidade do coletor		
1	22/07/22	AR	AR	AR
	25/07/22			
	26/07/22			
2	27/07/22	ÁGUA	ÁGUA	AR
	29/07/22	AR	ÁGUA	ÁGUA
	30/07/22	AR	ÁGUA	ÁGUA

Fonte: Autoria própria (2023)

### 3.8 EQUAÇÕES DE ANÁLISE DA BANCADA DE TESTES 2

#### 3.8.1 Estimativa teórica da vazão mássica – Efeito termossifão

A determinação da vazão mássica foi realizada através da Equação (14), baseando-se na metodologia descrita por Siqueira (2003), que considera a perda de carga ao longo do circuito operando em regime de termossifão equivalente à diferença de pressão, a qual é função da massa específica da água na entrada e saída dos coletores, como se segue:

$$\Delta p = (\rho_{ent} - \rho_{sai})gH \quad (13)$$

Onde:

- $\rho_{ent}, \rho_{sai}$ : massa específica na entrada e saída do coletor [ $\text{kg/m}^3$ ]
- g: gravidade [ $\text{m/s}^2$ ]
- H: altura representativa [m]

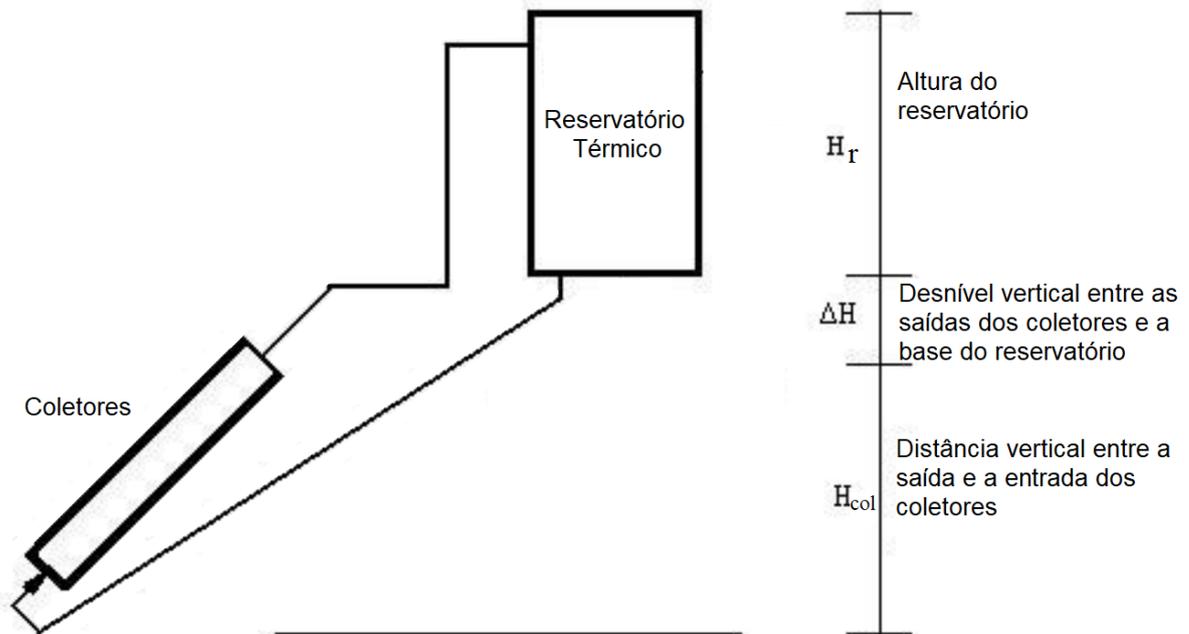
$$\dot{m} = \frac{(\rho_{ent} - \rho_{sai})gH\pi D^4 \rho}{128L\mu} \quad (14)$$

Onde:

- $\dot{m}$ : vazão mássica da água do coletor [kg/s]
- $\rho$ : massa específica média do coletor [kg/m<sup>3</sup>]
- $D$ : diâmetro da tubulação do coletor [m]
- $L$ : comprimento da tubulação do coletor [m]
- $\mu$ : viscosidade [s/m<sup>2</sup>]

Observando-se as características construtivas do sistema de aquecimento solar avaliado, conforme Figura 60, é possível determinar a altura representativa “H” a partir da Equação (15).

Figura 60 – Desenho esquemático do sistema de aquecimento solar



Fonte: Adaptado de Siqueira (2003)

$$H = \frac{H_{col}}{2} + \Delta H + \frac{H_r}{2} \quad (15)$$

A relação da variação da densidade com a variação da temperatura a uma pressão constante (P) pode ser dada pelo coeficiente de expansão térmica ( $\beta$ ), conforme Equação (16):

$$\beta = \frac{-1}{\rho} \left( \frac{\partial \rho}{\partial T} \right)_P \quad (16)$$

A Equação (16) pode ser aproximada por:

$$\beta \cong \frac{-1 (\rho_{sai} - \rho_{ent})}{\rho (T_{sai} - T_{ent})} \quad (17)$$

Sendo que a massa específica média ( $\rho$ ) é dada por:

$$\rho = \frac{\rho_{ent} + \rho_{sai}}{2} \quad (18)$$

Desta maneira, a Equação (14) pode ser reescrita como função da diferença de temperatura ao longo dos coletores e dos parâmetros geométricos do sistema (diâmetro, comprimento e altura representativa), conforme Equação (19):

$$\dot{m} = \frac{\pi D^4 g H \beta \rho_{ent}^2 \Delta T (2 - \beta \Delta T)}{256 L \mu} \quad (19)$$

Para a realização dos cálculos de vazão mássica foram considerados os seguintes parâmetros do sistema:

- $D=0,007945$  m;
- $H_r=0,39$  m;
- $\Delta H=0,446$  m;
- $H_c=0,139$  m;
- $L=2.487$  m;
- $\mu =8,9e-4$  Ns/m<sup>2</sup>.

### 3.8.2 Variação de temperatura no coletor

A variação de temperatura experimentada pela água nos coletores solares da bancada 2 é dada pela diferença entre a temperatura medida na saída e na entrada do coletor, como sendo:

$$\Delta T = T_{sai} - T_{ent} \quad (20)$$

Onde:

- $T_{ent}$  e  $T_{sai}$ : Temperatura da água na entrada e saída do coletor [°C]

### 3.8.3 Eficiência do coletor solar

A partir dos valores de vazão mássica, da variação da temperatura nos coletores e da radiação solar incidente no coletor é possível determinar a eficiência instantânea do coletor através da Equação (21):

$$\eta_i = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{A_{col} G} \quad (21)$$

Onde:

- $\eta_i$ : eficiência instantânea do coletor
  - $\dot{m}$ : vazão mássica da água do coletor [kg/s]
  - $c_p$ : calor específico [kJ/g°C]
  - $\Delta T$ : variação da temperatura no coletor [°C]
  - $A_{col}$ : área absorvedora do coletor [m<sup>2</sup>]<sup>8</sup>
- G: irradiação solar incidente sobre o coletor [W/m<sup>2</sup>]

Para o cálculo da eficiência dos coletores testados na bancada 2, a norma ABNT NBR 17003 (2021) estabelece alguns requisitos a serem atendidos para o cálculo da eficiência de coletores solares planos, dentre eles:

- níveis de irradiação superiores a 700 W/m<sup>2</sup>, sem variações acima de 50 W/m<sup>2</sup>;
- ensaio com duração mínima de 3 h, podendo ser constituídas de intervalos com mínimo de 30 min de duração

Desta maneira, a eficiência térmica dos coletores foi calculada para intervalos de tempo que atendessem à norma e que fossem representativos de cada dia de teste.

### 3.8.4 Temperatura da água do reservatório térmico (“Boiler”)

A temperatura da água do reservatório térmico é estratificada em relação à posição vertical de cada camada de líquido em seu interior, assim, a temperatura instantânea média poderia ser obtida mediante a integração do perfil térmico ao longo de toda a altura do boiler. Considerando que o perfil térmico não foi experimentalmente definido, a temperatura instantânea média foi estimada como sendo igual à temperatura da água que sai do boiler, que, em condições ideais de

---

<sup>8</sup> A área de absorção ( $A_{col}$ ) do coletor tradicional (Coletor 1) é cerca de 22% menor que a dos coletores preenchidos com nanofluido, pois o fluido preenche regiões abaixo, acima e nas laterais da serpentina de aquecimento que são, no coletor tradicional, originalmente vazias.

isolamento das mangueiras e conexões, é igual à temperatura da água que entra em cada coletor.

$$T_{Boiler} \cong T_{sai\_boiler} = T_{ent\_col} \quad (22)$$

Sabe-se que essa estimativa se torna mais exata no início dos testes e à medida que se aproxima do período final de aquecimento, momento em que toda a água do boiler atinge o equilíbrio térmico e se encontra a uma mesma temperatura.

Assim sendo, a máxima temperatura de entrada da água no coletor ( $T_{ent\_col\ máx}$ ) foi utilizada nesse trabalho como uma estimativa da máxima temperatura atingida pelo volume total de água presente no boiler em cada dia de testes.

### 3.9 ANÁLISE DE INCERTEZA: DADOS DE TEMPERATURA E RADIAÇÃO

Os termopares utilizados no trabalho foram calibrados e a incerteza de medição associada foi calculada segundo o procedimento exposto no apêndice C.

Os 13 termopares utilizados na bancada 1 foram calibrados para a faixa de temperatura de 15 a 65°C em intervalos de 5°C, fornecendo os seguintes valores de incerteza de medição:

Tabela 11 - Incerteza de medição associada a cada termopar utilizado na bancada 1

Termopar	Incerteza de Medição (°C)
T0	0,26
T1	0,23
T2	0,21
T3	0,20
T4	0,19
T5	0,19
T6	0,19
T7	0,19
T8	0,18
T9	0,19
T10	0,18
T11	0,18
T12	0,18

Fonte: Autoria própria (2023)

Os 7 termopares utilizados na bancada 2 foram calibrados para a faixa de temperatura de 18 a 68°C em intervalos de 10°C, fornecendo os seguintes valores de incerteza de medição:

Tabela 12 - Incerteza de medição associada a cada termopar utilizado na bancada 2

Termopar	Incerteza de Medição (°C)
T0	0,16
T1	0,18
T2	0,21
T3	0,20
T4	0,21
T5	0,20
T6	0,21

Fonte: Autoria própria (2023)

A incerteza associada à medição utilizando o solarímetro MES-200 foi determinada como sendo  $11 \text{ W/m}^2$  a partir dos procedimentos estabelecidos no GUM-INMETRO (2008), considerando-se uma Avaliação Tipo B da incerteza-padrão, fator de abrangência de 95,45% na distribuição t de student e os seguintes dados fornecidos pelo fabricante do equipamento:

- Resolução:  $0,1 \text{ W/m}^2$  (se  $<100 \text{ W/m}^2$ ),  $1 \text{ W/m}^2$  (se  $>100 \text{ W/m}^2$ )
- Exatidão:  $10 \text{ W/m}^2$
- Erro induzido de temperatura:  $0.38 \text{ W/m}^2 / ^\circ\text{C}$ , para medições em temperaturas diferentes de  $25^\circ\text{C}$

## CAPÍTULO IV

### 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Neste capítulo serão apresentados e discutidos os dados obtidos através dos testes realizados nas bancadas 1 e 2 (radiação incidente e perfis de temperatura e/ou variação de temperatura), bem como os resultados dos parâmetros de desempenho obtidos por cada nanofluido testado (“SAR” e “SER” para bancada 1 e eficiência dos coletores solares para bancada 2). Além disso, serão apresentadas as análises qualitativas e quantitativas de estabilidade das amostras de nanofluidos produzidas, realizadas através de inspeção visual e avaliação do espectro de absorção, respectivamente.

#### 4.1 RESULTADOS BANCADA DE TESTES 1

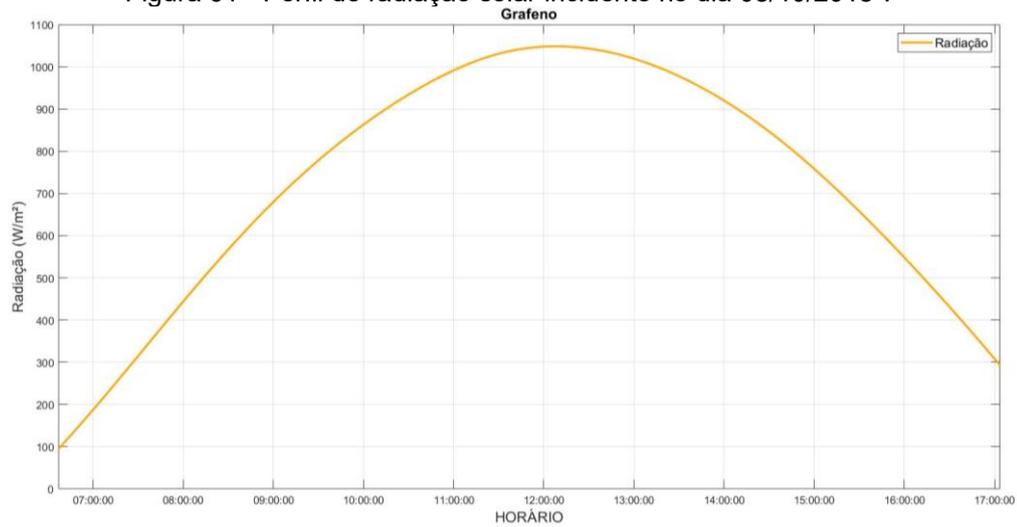
##### 4.1.1 Nanofluidos de Grafeno em água

O teste utilizando nanofluidos de grafeno em água na bancada 1 foi realizado no dia 08/10/18, tendo duração de aproximadamente 10 horas. Foram testadas 11 amostras de nanofluidos, com concentrações volumétricas variando entre  $\phi_v=0,0001\%$  e  $\phi_v=0,03\%$ , e uma de fluido base, água.

##### **Perfis de Radiação e Temperatura**

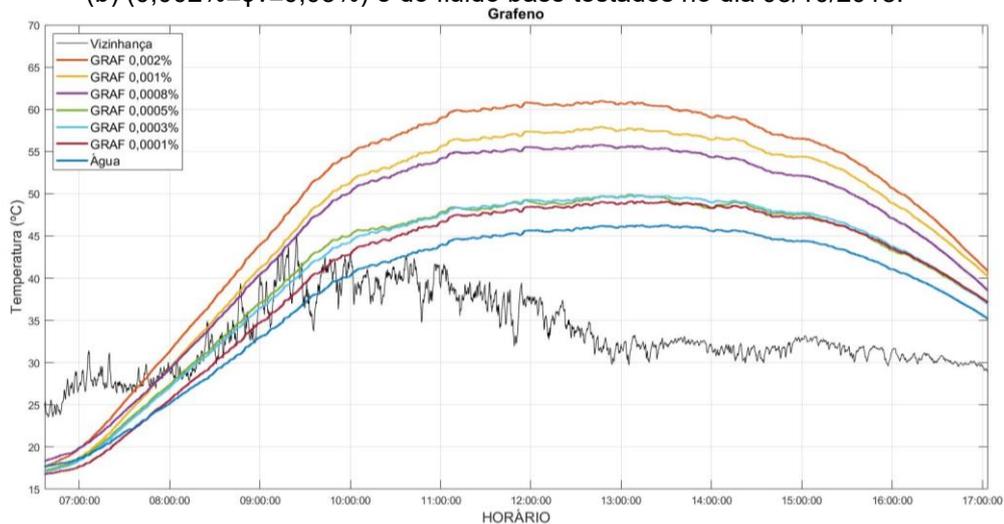
Os dados de radiação relativos a esse dia podem ser observados na Figura 61. Os dados coletados de temperatura das amostras de nanofluidos de menor concentração juntamente com o perfil de temperatura do fluido base podem ser visualizados na Figura 62(a) e os de maior concentração na Figura 62(b).

Figura 61 - Perfil de radiação solar incidente no dia 08/10/2018<sup>9</sup>.



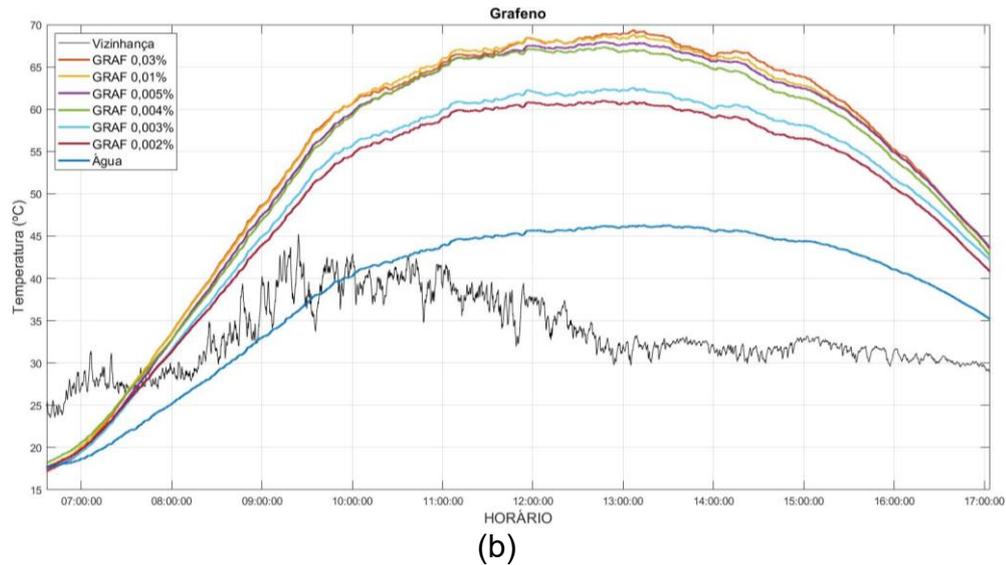
Fonte: Autoria própria a partir de dados do site do INMET, disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A507>. Acesso em: 20/09/2022.

Figura 62 - Perfis de temperatura dos nanofluidos de grafeno em água (a) ( $0,0001\% \leq \phi \leq 0,002\%$ ) e (b) ( $0,002\% \leq \phi \leq 0,03\%$ ) e do fluido base testados no dia 08/10/2018.



(a)

<sup>9</sup> No dia 08/10/2018, em função da indisponibilidade do solarímetro MES-200, os dados de radiação solar incidente foram obtidos por meio da estação meteorológica do INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) para a cidade de Uberlândia-MG, disponível em: <https://tempo.inmet.gov.br/TabelaEstacoes/A507>, Acesso em: 20/09/2022.



Observa-se a partir dos perfis de temperatura:

- rápido aumento da temperatura dos nanofluidos durante a primeira hora de testes;
- aumento da temperatura que se assemelha visualmente a uma parábola após a primeira hora de teste;
- horário de máxima temperatura para todos os fluidos testados ocorre cerca de uma hora após o meio-dia solar (ponto de máximo da curva na Figura 61);
- todas as amostras de nanofluido de grafeno demonstram maior variação de temperatura quando comparados ao fluido base (água);
- até às 10:00 AM, a adição de nanopartículas ao fluido base produz efeitos de aumento da taxa de aquecimento e maiores temperatura alcançadas;
- nos nanofluidos com concentrações mais altas ( $\phi_v > 0,003\%$ ) não houve diferença significativa entre os perfis de temperatura.

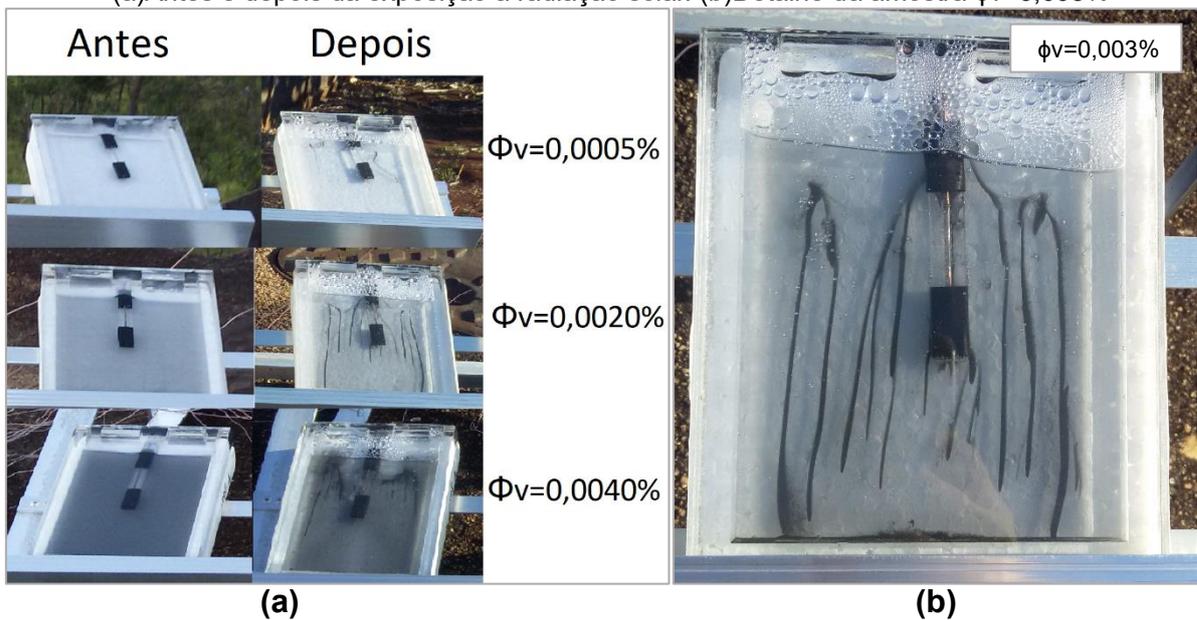
### Estabilidade de curto prazo das amostras

Considerando os padrões observados, nota-se o potencial de uso de nanofluidos como meio de conversão fototérmica, no entanto, após dez horas de exposição das amostras de grafeno à radiação solar, todas apresentaram visualmente intensa degradação, como pode ser observado na Figura 63 e, em maiores detalhes, na Figura 64, onde nota-se a aglomeração de nanopartículas em forma de grandes linhas verticais no fundo de cada célula de teste.

Figura 63 – Foto da bancada de testes com nanofluidos de grafeno após 10 horas de exposição à radiação solar



Figura 64 – Fotos da degradação apresentada pelas amostras de nanofluidos de grafeno em água. (a) Antes e depois da exposição à radiação solar. (b) Detalhe da amostra  $\phi_v=0,003\%$



A visível falta de estabilidade dos nanofluidos de grafeno diante das condições experimentais inviabilizou seu uso nos dias subsequentes e a continuidade dos testes, dessa maneira, as amostras foram testadas apenas no dia 08/10/18.

#### 4.1.2 Nanofluidos de ZnO-Ag em água

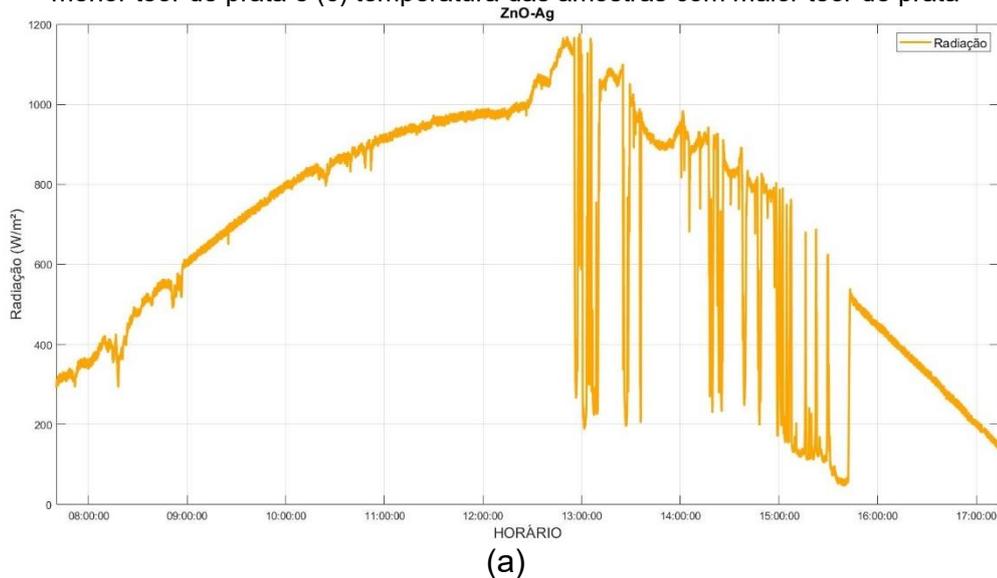
Os testes utilizando nanofluidos de ZnO-Ag em água na bancada 1 foram realizados nos dias 14, 16, 17, 18 e 19/6/19, com duração de aproximadamente 10 horas cada. Foram testadas uma amostra de água e 10 amostras de nanofluidos com concentração mássica de 0,0143%, sendo uma de ZnO puro, 8 delas com concentração nominal de prata na matriz de ZnO variando entre 0,1 a 5%, e uma de prata pura, todas usando água como fluido base.

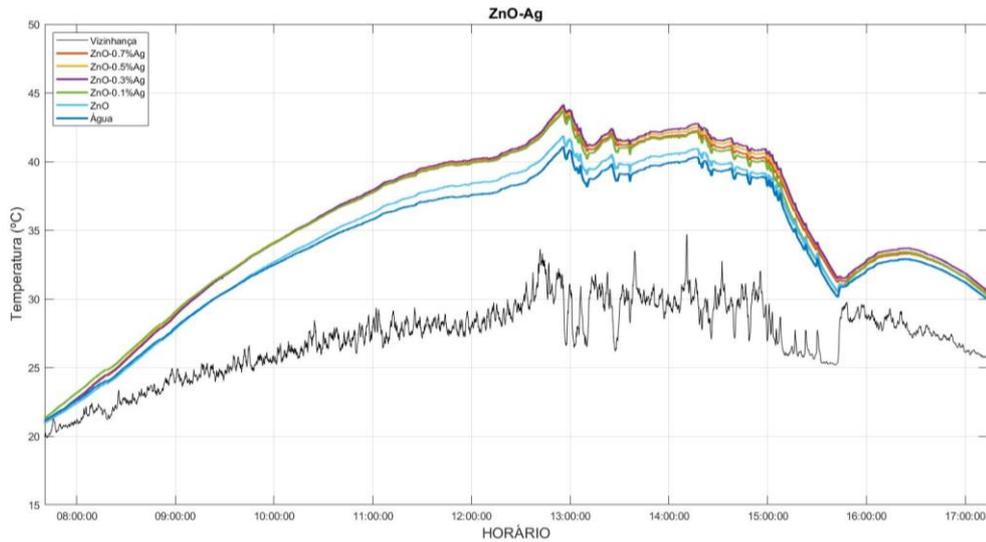
#### Perfis de Radiação e Temperatura

Os dados relativos ao primeiro dia de testes com nanofluidos ZnO-Ag-Água (dia 14/6/19) de radiação solar incidente e perfis de temperatura podem ser visualizados na Figura 65. Os perfis de temperatura das amostras com menor teor de prata na composição são visualizados na Figura 65(b) e o das amostras com maior teor de prata, na Figura 65(c).

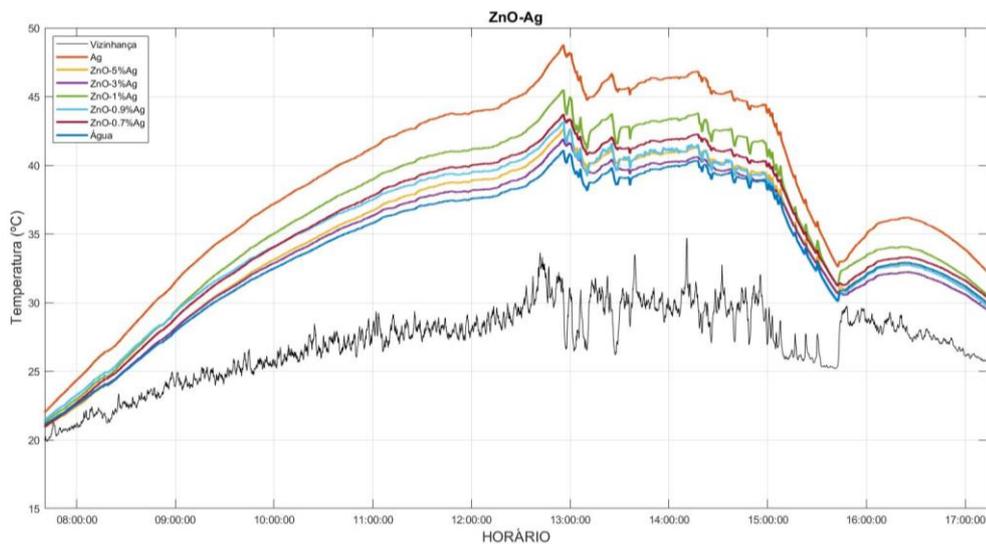
Os dados relativos ao último dia de testes (19/6/19) com nanofluidos ZnO-Ag-Água podem ser vistos no Apêndice D.

Figura 65 - Perfis do dia 14/6/19 de (a) radiação solar incidente, (b) temperatura das amostras com menor teor de prata e (c) temperatura das amostras com maior teor de prata





(b)



(c)

Observa-se nos perfis de temperatura que, apesar de todos os nanofluidos apresentarem uma taxa de aquecimento e temperaturas máximas superiores ao da água, os nanofluidos híbridos não apresentaram nenhum padrão que correlacionasse diretamente a quantidade de prata na matriz de ZnO com o desempenho apresentado pelo respectivo nanofluido. O único nanofluido que apresentou resultados visivelmente superiores aos demais foi o de prata pura, evidenciado pela curva laranja-escuro mais acima na Figura 65(c). Ressalta-se que esse comportamento foi observado em todos os dias de teste.

### **Estabilidade de curto prazo das amostras**

Destaca-se, ainda, que os nanofluidos recém produzidos possuíam uma aparência levemente translúcida e esbranquiçada e, após cinco dias de teste, a

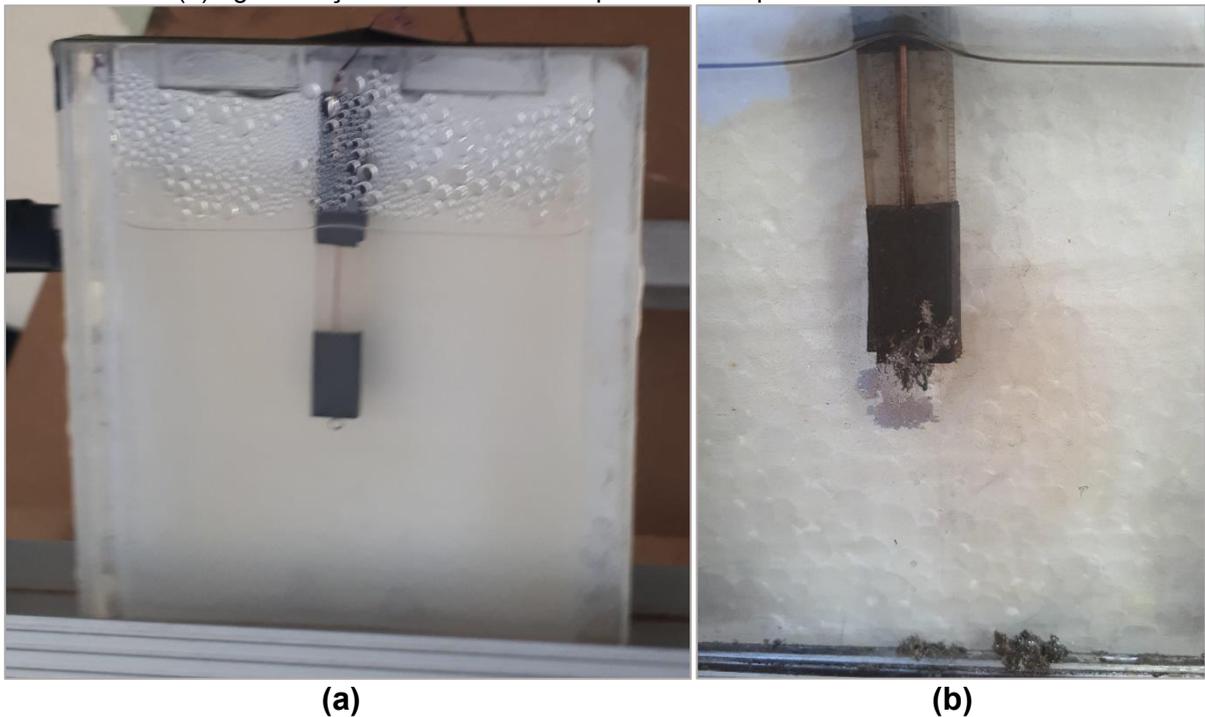
tonalidade de quase todas as amostras sofreu visível alteração, como visto na Figura 66, passando a amarelada (Figura 67(a)). Além disso, todos os nanofluidos apresentaram intensa aglomeração e deposição de nanopartículas no fundo da célula de teste, com destaque para o nanofluido de prata pura em água, no qual foi possível notar inclusive a adesão de nanopartículas à parede frontal do acrílico, formando um pequeno “espelho” na superfície, como mostra a Figura 67(b).

Figura 66 – Foto da bancada de testes com ZNO-Ag-Água no (a) primeiro (14/6/19) e (b) último (19/6/19) dias de testes.



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 67 – Detalhes da degradação das amostras. (a) Mudança de cor da amostra (tom amarelado) (b) Aglomeração e adesão de nanopartículas de prata na célula de teste.



Fonte: Autoria própria (2023)

A visível instabilidade dos nanofluidos de ZnO-Ag-Água testadas inviabilizou análises complementares do desempenho de conversão fototérmica das amostras e seu uso nos coletores solares da bancada 2.

#### 4.1.3 Nanofluidos de Ouro em água

Os testes utilizando nanofluidos de Ouro em água na bancada 1 foram realizados nos dias 11, 12, 13, 14 e 15/6/20, tendo duração de aproximadamente 10 horas. Foram testadas uma amostra de água e 9 amostras de nanofluidos com concentrações volumétricas variando entre 0,0001 e 0,005%.

##### Perfis de Radiação e Temperatura

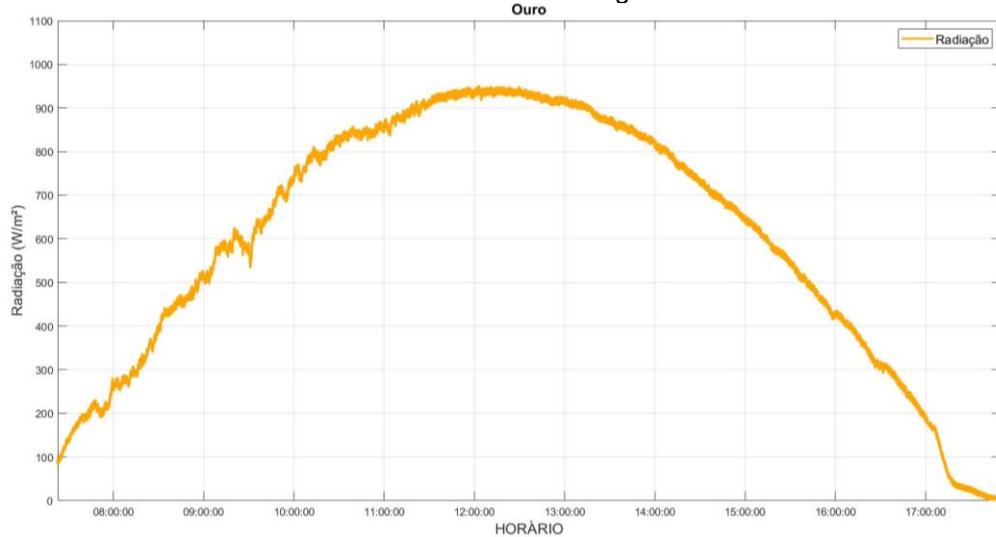
Uma foto da bancada no primeiro dia de testes (11/6/20) com os nanofluidos de ouro-água está apresentada na Figura 68, enquanto o perfil de radiação solar incidente para pode ser visualizado na Figura 69(a) e os perfis de temperatura das amostras de nanofluido na Figura 69(b).

Figura 68 - Foto da bancada de testes com Ouro-água no dia 11/6/20

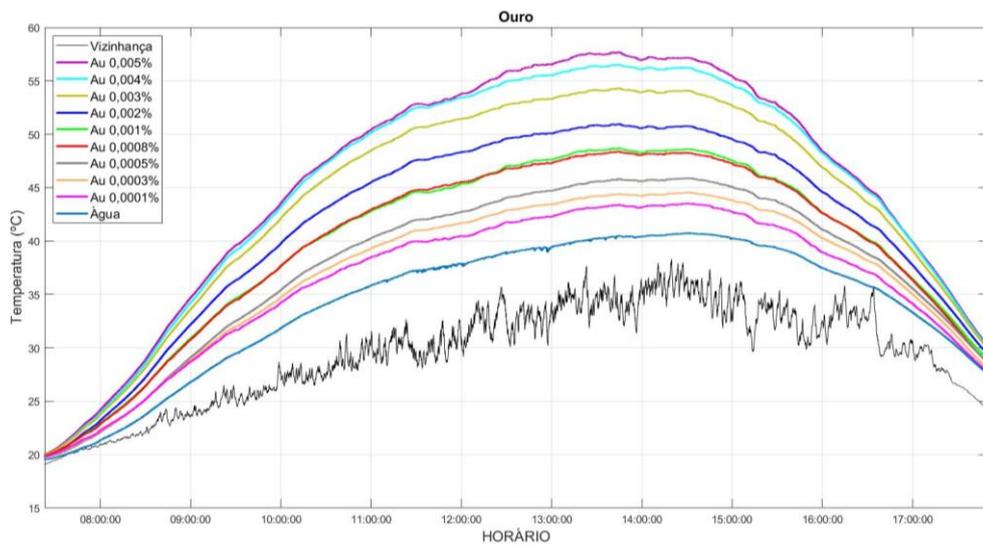


Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 69 - Perfis do dia 11/6/20 de (a) radiação solar incidente e (b) temperatura das amostras de nanofluidos de ouro-água



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se a partir dos perfis de temperatura que o comportamento da taxa de variação da temperatura foi semelhante ao observado nos nanofluidos de grafeno-água, em que ocorre um rápido aumento da temperatura dos nanofluidos durante a primeira hora de testes, seguido de um perfil visualmente semelhante a uma parábola. Outra semelhança são as maiores variações de temperatura e temperaturas máximas atingidas por todas as concentrações de nanofluidos quando comparadas ao fluido base água.

De forma geral notam-se temperaturas máximas alcançadas crescentes com o aumento da concentração volumétrica das amostras, no entanto, as amostras com concentrações 0,0008 e 0,001% em volume e 0,004 e 0,005% em volume apresentaram, em pares, comportamento discrepante dessa tendência através de perfis visualmente coincidentes.

Destaca-se que esses padrões relatados acerca do primeiro dia de testes (11/6/20) foram semelhantemente observados nos demais dias (12, 13, 14 e 15/6/20), sendo que os dados relativos ao último dia de testes (15/6/20) podem ser vistos no Apêndice D.

### **Estabilidade de curto prazo das amostras**

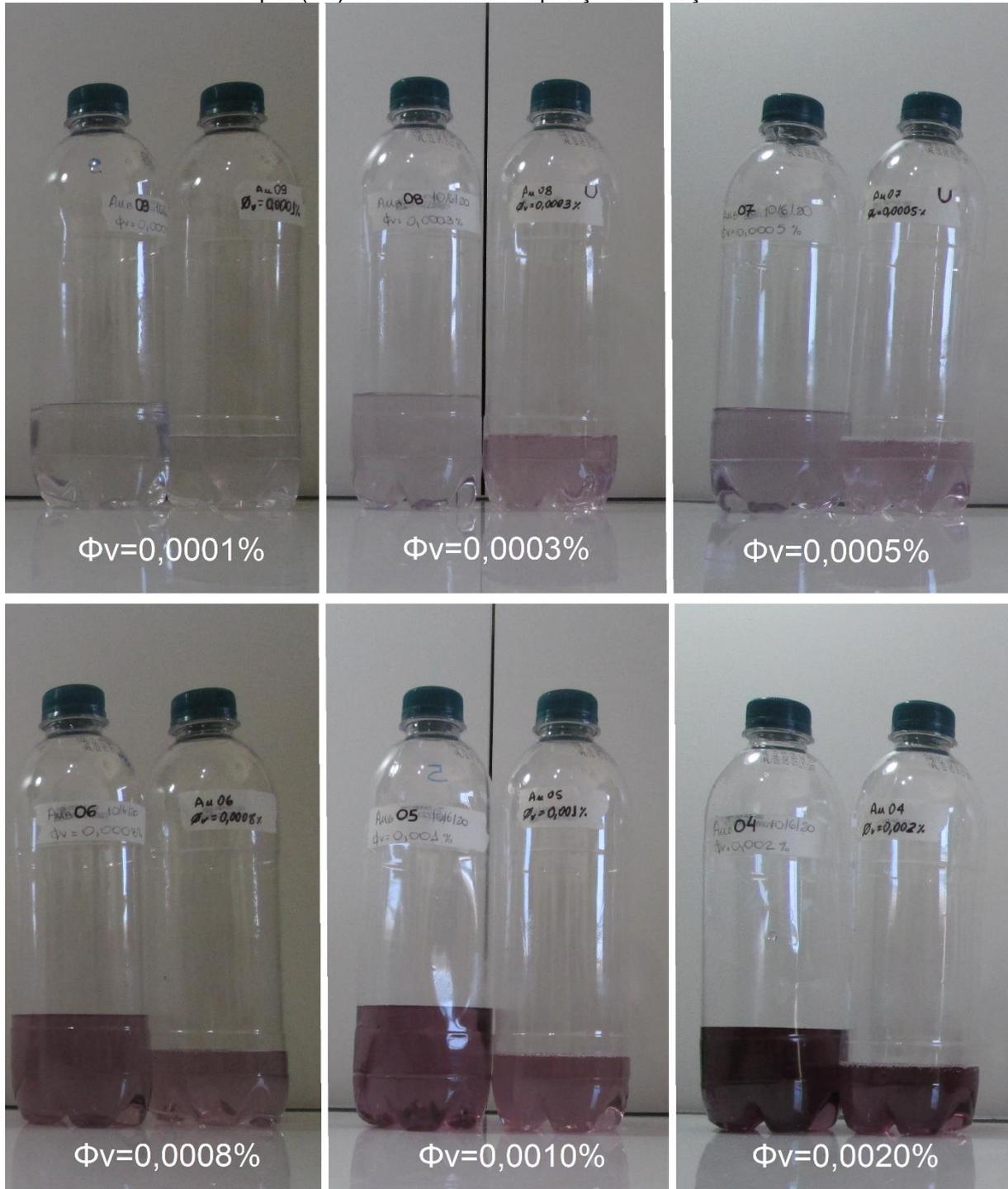
Ao final de cinco dias de teste as amostras de nanofluidos de ouro-água não apresentaram sinais grosseiros de degradação ou decantação, sendo possível notar apenas alguns pequenos pontos de aglomeração, como mostrados na Figura 70 e uma mudança muito discreta de tonalidade das amostras, como apresentado na Figura 71.

Figura 70 – Pequenas aglomerações observadas no fundo das células de teste de nanofluidos de ouro-água



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 71 – Amostras de nanofluido de ouro-água de diferentes concentrações antes(esq.) e depois(dir.) de cinco dias de exposição à radiação solar



Fonte: Autoria própria (2023)

Considerando a análise da estabilidade de curto prazo através da inspeção visual das amostras, os nanofluidos de ouro em água se mostraram promissores para a avaliação de longo prazo da estabilidade através do método de espectrofotometria descrito na Seção 3.2.2, bem como para a avaliação dos parâmetros de eficiência de

conversão fototérmica “SER” e “SAR”, descritos nas Seções 3.5.1 e 3.5.2, respectivamente.

### Estabilidade de longo prazo das amostras

Através do procedimento descrito na Seção 3.2.2 foi avaliada a estabilidade das amostras e ouro-água por um período de aproximadamente seis meses (166 dias) após sua produção, tanto das amostras não usadas nos testes (nanofluido “novo”), quanto das amostras expostas por 5 dias à radiação solar (nanofluido “usado”).

Os resultados dessa avaliação foram organizados na Tabela 13, que apresenta os valores estimados para a concentração volumétrica das amostras ao longo do tempo a partir das sucessivas medições de suas absorvâncias.

Tabela 13 – Concentração estimada para os nanofluidos novos e usados de ouro-água ao longo do tempo

$\Phi_{v\_inicial}$	$\Phi_v$ estimado pela absorvância medida (ppm)										
	Dias decorridos desde a produção										
	13	21	33	47	61	75	89	103	117	131	166
1 ppm (0,0001%)	0,12	0,07	0,07	0,01	0,12	0,12	0,24	0,18	0,12	0,18	0,18
	0,52	0,58	0,52	0,41	0,18	0,07	0,07	0,07	0,12	0,12	0,18
3 ppm (0,0003%)	0,75	0,46	0,24	0,12	0,12	0,07	0,12	0,12	0,07	0,12	0,12
	2,17	2,11	2,00	1,88	1,83	1,66	1,54	1,43	1,26	1,15	0,52
5 ppm (0,0005%)	1,60	1,20	0,92	0,58	0,46	0,41	0,46	0,41	0,35	0,41	0,35
	2,56	2,28	2,11	1,94	1,60	1,03	0,63	0,58	0,46	0,41	0,12
8 ppm (0,0008%)	4,94	3,53	3,13	2,17	1,03	0,86	0,86	0,81	0,63	0,58	0,46
	4,43	4,09	3,81	2,90	0,81	0,29	0,12	0,12	0,07	0,07	0,01
10 ppm (0,0010%)	7,66	7,32	6,87	2,96	1,43	1,32	1,49	1,43	1,43	1,54	1,66
	6,13	5,68	5,34	4,49	3,19	1,77	1,09	0,52	0,29	0,29	0,24
20 ppm (0,0020%)	16,23	14,69	13,56	12,60	12,03	10,05	7,66	6,87	6,02	5,40	4,55
	15,26	14,64	13,90	13,56	9,48	7,04	6,36	6,25	6,02	5,45	4,66
30 ppm (0,0030%)	25,47	21,55	18,72	17,81	15,55	13,33	12,37	11,58	10,61	9,71	8,46
	23,54	22,35	20,02	18,44	15,55	12,77	11,29	10,84	10,33	9,76	8,52
40 ppm (0,0040%)	35,44	29,04	27,05	25,24	21,04	18,49	17,64	17,30	16,57	15,83	13,50
	29,21	25,01	22,63	21,44	19,85	18,38	16,34	14,98	13,62	12,31	10,67
50 ppm (0,0050%)	46,44	44,40	38,96	33,12	31,42	29,83	28,58	27,34	26,26	25,01	22,23
	34,76	32,84	30,91	29,77	28,75	27,62	26,26	25,41	23,65	22,86	20,70

Nanofluidos novos
  Nanofluidos usados

Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que a concentração estimada para as amostras de ouro-água novas e usadas ao longo do tempo sofre diminuição substancial já nas primeiras semanas após a produção.

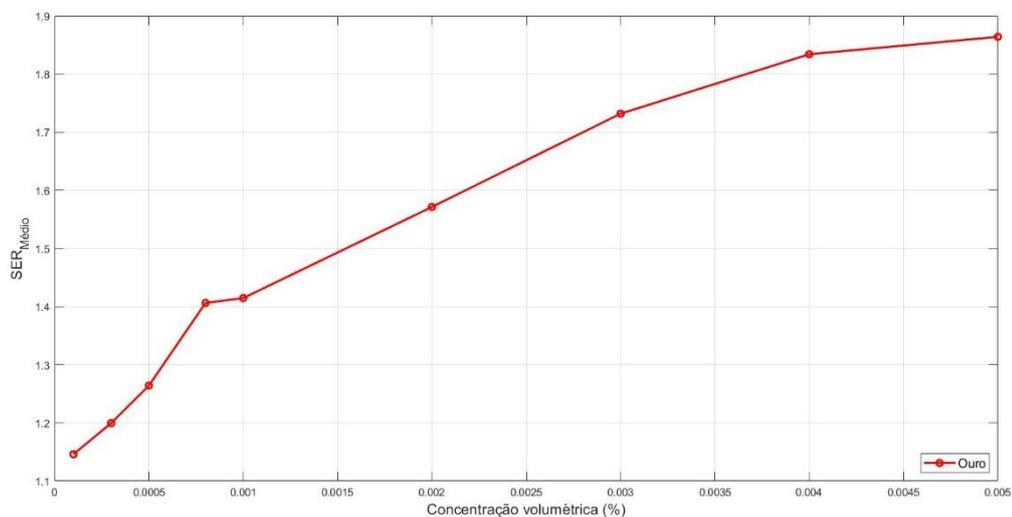
Nota-se que as amostras usadas (expostas à radiação solar por 5 dias) dos nanofluidos menos concentrados ( $\phi_v \leq 0,0008\%$ ) sofreram menor degradação ao longo das primeiras semanas após a produção quando comparadas às amostras novas (não usadas nos testes), no entanto, após 166 dias de avaliação todas essas apresentaram concentração estimada próxima de zero (equivalente a água pura).

A avaliação das amostras mais concentradas ( $\phi_v > 0,0008\%$ ) apontou que, após 166 dias, o nanofluido que apresentou melhor estabilidade foi o não usado nos testes experimentais e de maior concentração ( $\phi_v = 0,0050\%$ ), com uma diminuição da concentração estimada de 55% em relação à concentração inicial.

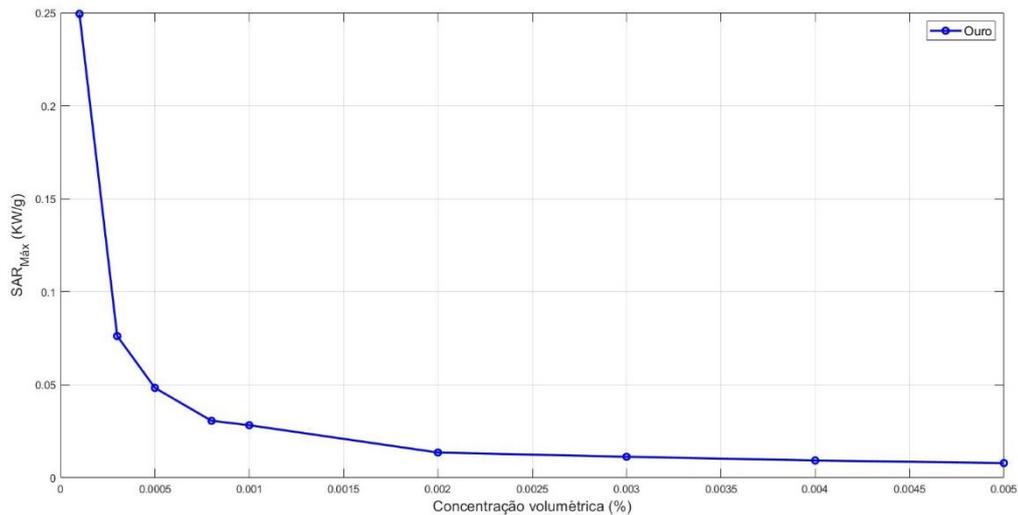
### “SER” e “SAR”

A análise da razão de energia armazenada “SER” de cada amostra de nanofluido de ouro-água, que informa sobre quanta energia a mais o nanofluido foi capaz de armazenar devido à presença das nanopartículas no fluido base, foi realizada e o resultado relativo ao teste do dia 11/6/20 exposto na Figura 72(a). De forma complementar, os máximos valores calculados para a taxa de absorção específica “SAR”, que exprime a taxa de absorção de energia de cada grama de nanopartícula presente no fluido base, são mostrados na Figura 72(b).

Figura 72 – Parâmetros de conversão fototérmica dos nanofluidos de ouro-água, testados dia 11/6/20  
(a) “SER” médio e (b) “SAR” máximo



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

A Figura 72(a) sugere que, com o aumento da concentração volumétrica de nanopartículas, os nanofluidos são capazes de armazenar cada vez mais energia quando comparados ao fluido base, água. No entanto, seguindo uma tendência contrária, observa-se a partir da Figura 72(b) que o aumento da quantidade de nanopartículas causa uma queda exponencial no máximo SAR calculado, tendo o nanofluido de menor concentração (0,0001% em volume) apresentado os maiores valores de “SAR” e o de concentração mais alta (0,005% em volume), o menor. Nota-se também que ocorre uma estabilização do “SAR” para os nanofluidos com concentrações maiores ou iguais a 0,002% em volume, sugerindo a existência da concentração volumétrica ideal (ou limite) para aplicações utilizando essa nanopartícula, acima da qual não se obtém resultados substancialmente superiores que justifiquem os maiores gastos com a produção das amostras.

Esses resultados indicam que, apesar da adição de nanopartículas à água produzir efeitos de maior armazenamento de energia, esse processo se torna menos eficiente à medida que se utilizam concentrações mais altas.

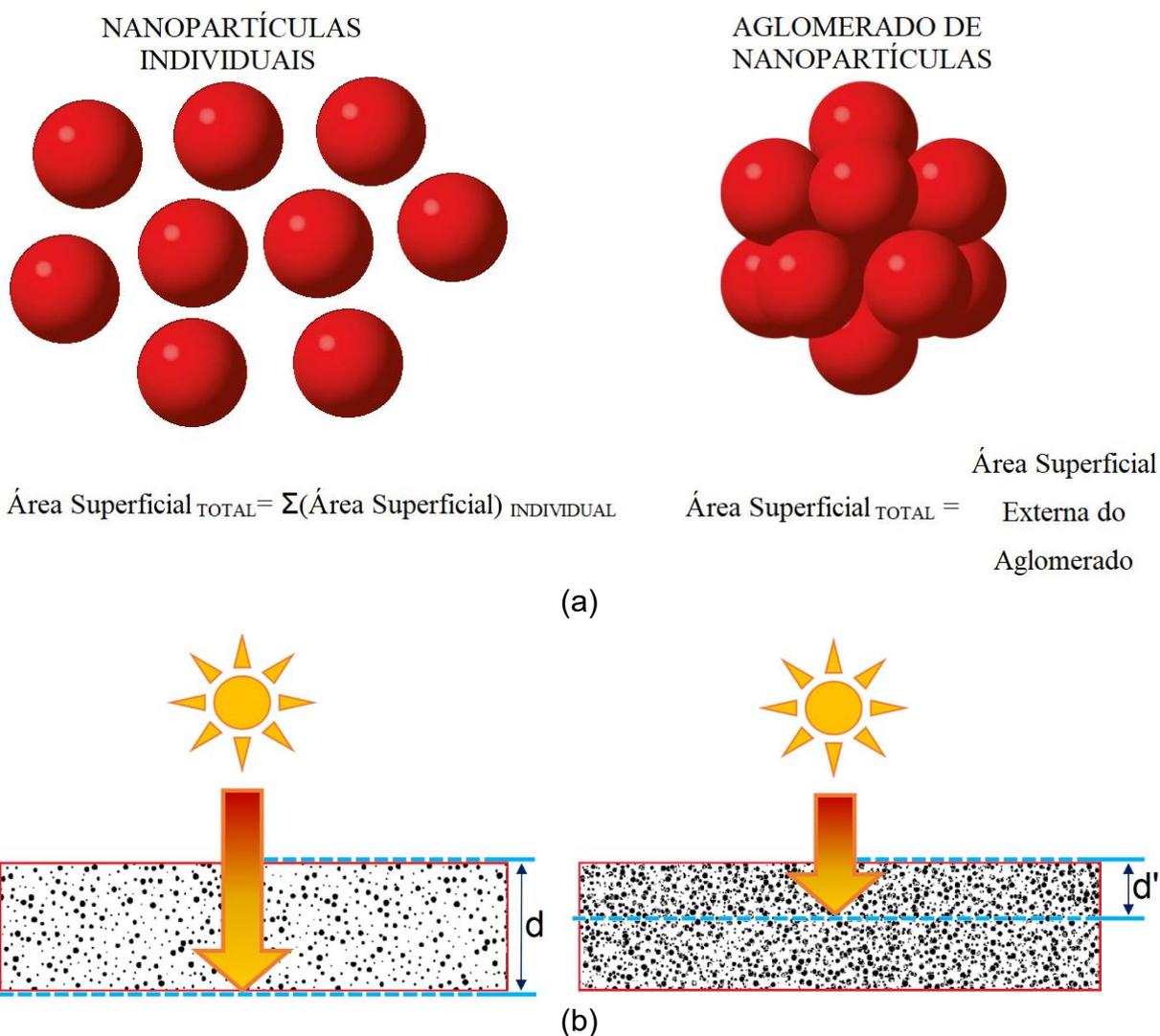
O comportamento observado para o parâmetro SAR poderia ser explicado por dois fenômenos:

- a maior quantidade de nanopartículas presente no fluido base causa uma aproximação entre as elas cada vez maior, de maneira que as partículas passam a realizar a conversão fototérmica não mais como nanopartículas individuais, mas como pequenos aglomerados, o que diminui a área superficial

responsável pela absorção de radiação (Figura 73(a)), tornando o processo menos eficiente;

- o aumento da concentração de nanopartículas diminui proporcionalmente a distância “d” (Figura 73(b)) que a radiação solar é capaz de penetrar na espessura de fluido, assim, o processo de conversão fototérmica não é realizada por todo o volume de fluido, mas apenas por uma camada cada vez mais superficial e próxima à parede externa do recipiente, local onde também ocorre a maior parcela das perdas térmicas do coletor, o que reduz a eficiência do processo.

Figura 73 – Esquemas (a) da área superficial de nanopartículas individuais *versus* aglomerados de nanopartículas e (b) da absorção de radiação por nanofluidos de diferentes concentrações.



Fonte: Autoria própria (2023)

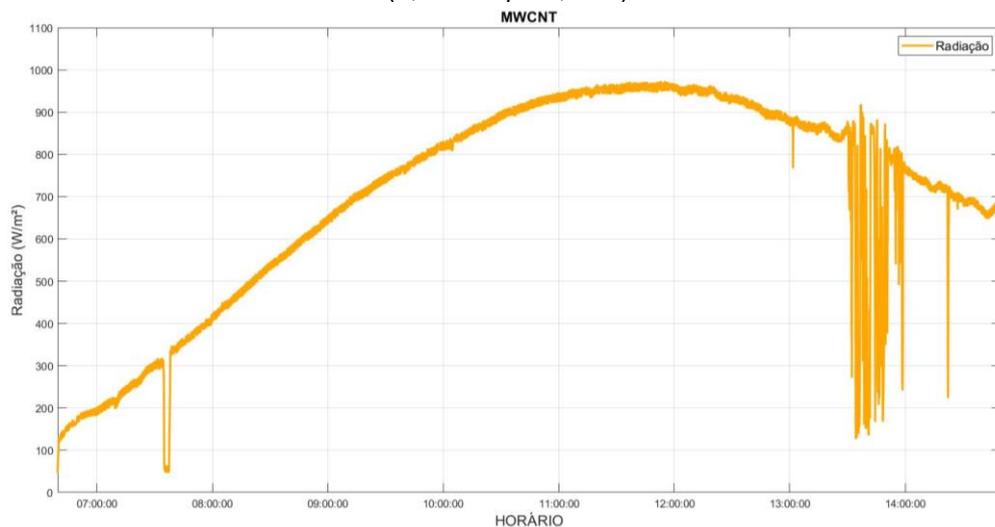
#### 4.1.4 Nanofluidos de MWCNT em água

Os testes utilizando nanofluidos de MWCNT em água na bancada 1 foram realizados nos dias 15, 17, 18, 19 e 20/10/19, tendo duração de aproximadamente 10 horas. Foram testadas uma amostra de água e 11 amostras de nanofluidos com concentrações volumétricas variando entre 0,0001 e 0,03%.

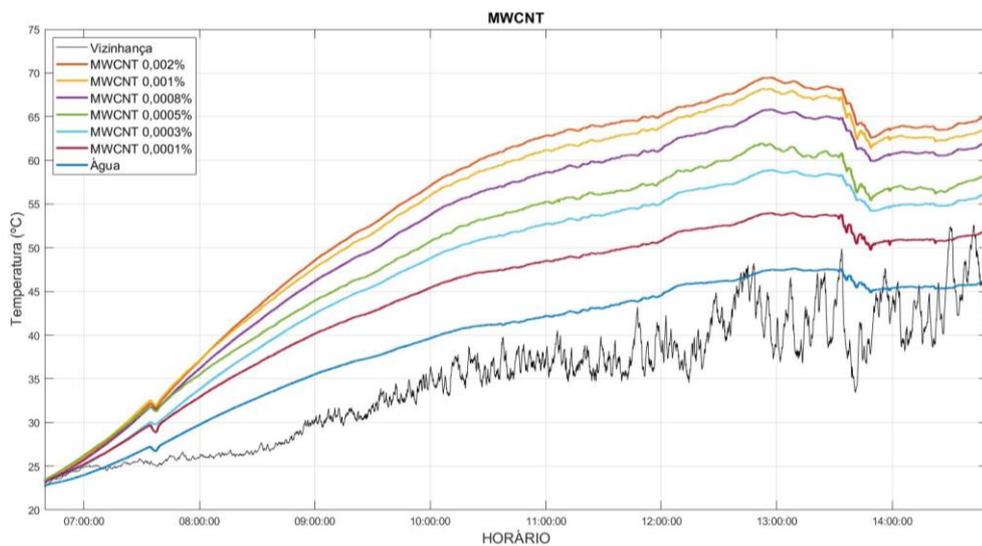
#### Perfis de Radiação e Temperatura

O perfil de radiação solar incidente para pode ser visualizado na Figura 74(a), os perfis de temperatura das amostras de nanofluido menos concentradas na Figura 74(b) e das mais concentradas na Figura 74(c).

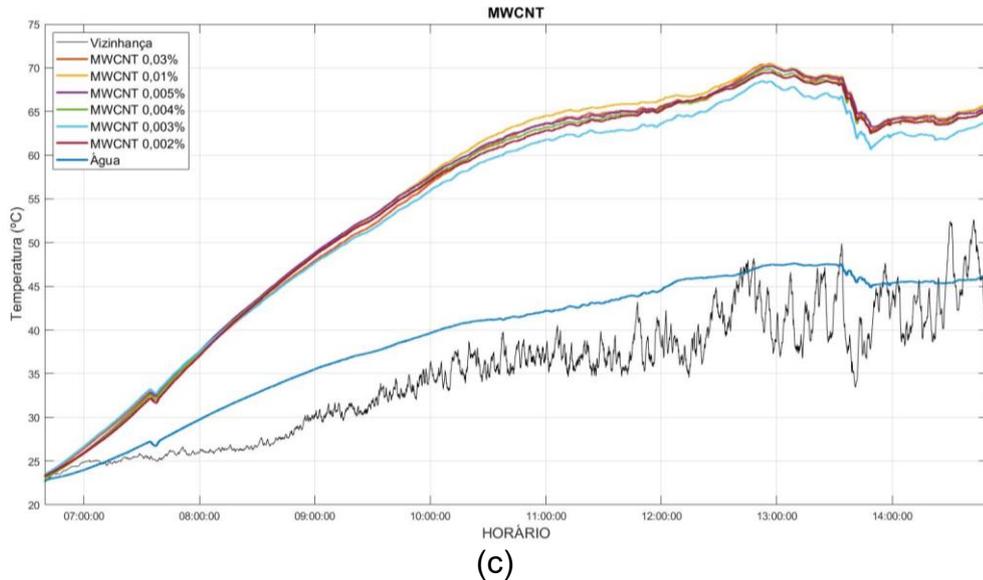
Figura 74 - Perfis do dia 15/10/19 de (a) radiação solar incidente, (b) temperatura dos nanofluidos de MWCNT-água de (a) menor concentração ( $0,0001\% \leq \phi_v \leq 0,002\%$ ) e (b) maior concentração ( $0,002\% \leq \phi_v \leq 0,03\%$ )



(a)



(b)



Observa-se que os nanofluidos de MWCNT-água se comportaram de maneira semelhante aos nanofluidos de grafeno-água e ouro-água quando avaliados o comportamento da taxa de variação da temperatura e temperaturas máximas atingidas por todas as concentrações de nanofluidos quando comparadas ao fluido base água.

Nota-se que, para os nanofluidos de MWCNT-água, as temperaturas máximas alcançadas são crescentes com o aumento da concentração volumétrica até 0,002%. Além disso, para os nanofluidos com concentrações mais altas ( $\phi_v \geq 0,002\%$ ) não houve diferença significativa entre os perfis de temperatura das amostras.

Destaca-se que os padrões observados no primeiro dia de testes (15/10/19) foram semelhantemente observados nos demais dias (17, 18, 19 e 20/10/19), sendo que os dados relativos ao último dia de testes (20/10/19) podem ser vistos no Apêndice D.

### **Estabilidade de curto prazo das amostras**

Ao final de cinco dias de teste (Figura 75) as amostras de nanofluidos de MWCNT-água não apresentaram sinais grosseiros de degradação ou decantação, e estavam visivelmente estáveis, como exemplificado na Figura 76.

Figura 75 - Foto da bancada de testes com MWCNT-água no último dia de testes (20/10/19).



Fonte: Aatoria própria (2023)

Figura 76 – Detalhe da célula de teste com nanofluido  $\Phi_v=0,0008\%$  após cinco dias de exposição solar.



Fonte: Aatoria própria (2023)

Considerando a análise da estabilidade de curto prazo através da inspeção visual das amostras, os nanofluidos de MWCNT em água se mostraram, dentre as

quatro nanopartículas testadas na bancada 1, os mais promissores para a avaliação de longo prazo da estabilidade (método de espectrofotometria da Seção 3.2.2) e dos parâmetros de eficiência de conversão fototérmica “SER” e “SAR” (Seções 3.5.1 e 3.5.2, respectivamente).

### Estabilidade de longo prazo das amostras

Através do procedimento descrito na Seção 3.2.2 foi avaliada a estabilidade das amostras de MWCNT-água por um período de aproximadamente um ano (390 dias) após sua produção, tanto das amostras não usadas nos testes (nanofluido “novo”), quanto das amostras expostas por 5 dias à radiação solar (nanofluido “usado”).

Os resultados dessa avaliação foram organizados na Tabela 14, que apresenta os valores estimados para a concentração volumétrica das amostras ao longo do tempo a partir das sucessivas medições de suas absorbâncias.

Tabela 14 - Concentração estimada para os nanofluidos novos e usados de MWCNT-água ao longo do tempo

$\Phi_{v\_inicial}$	$\Phi_v$ estimado pela absorbância medida (ppm)										
	Dias decorridos desde a produção										
	7	14	21	104	125	204	245	285	320	355	390
1 ppm (0,0001%)	0,95	0,77	0,85	0,60	0,52	0,39	0,34	0,35	0,26	0,18	0,13
		0,90		0,84	0,82	0,94	0,81	0,82	0,94	0,76	0,76
3 ppm (0,0003%)	2,95	2,88	2,90	2,87	2,80	2,75	2,73	2,72	2,70	2,65	2,52
		2,59		2,40	2,45	2,57	2,42	2,44	2,55	2,49	2,44
5 ppm (0,0005%)	4,90	4,90	4,92	4,68	4,55	4,11	3,77	3,46	3,21	3,10	2,95
		4,98		4,40	4,01	3,81	3,70	3,75	3,91	3,91	3,93
8 ppm (0,0008%)	7,94	7,86	7,89	7,89	7,89	8,10	8,16	8,24	8,27	8,78	8,98
		8,03		8,24	8,22	8,30	8,10	8,03	8,10	8,03	8,00
10 ppm (0,0010%)	9,83	9,87	9,86	9,54	9,42	8,60	7,86	8,60	8,47	8,39	8,33
		10,00		10,31	10,35	10,77	10,66	10,79	11,10	11,10	11,18
20 ppm (0,0020%)	19,81	19,68	19,67	20,30	20,18	20,53	20,43	20,76	21,05	21,56	21,94
		19,92		20,16	20,32	21,07	20,86	21,19	21,66	21,96	22,10
30 ppm (0,0030%)	30,28	30,20	30,17	29,52	29,69	30,20	30,13	30,33	30,51	31,12	31,60
		30,50		30,76	30,74	30,25	29,55	29,34	29,17	29,01	28,66
40 ppm (0,0040%)	42,73	41,60	41,75	40,71	40,94	41,43	41,49	41,72	42,11	43,73	44,70
		40,91		41,40	41,56	42,00	41,62	41,21	41,46	42,24	42,24
50 ppm (0,0050%)	51,15	50,73	50,84	50,09	50,50	50,23	51,52	51,84	52,75	53,83	53,87
		51,01		51,38	51,54	51,57	51,49	50,11	50,89	51,09	50,98



Nanofluidos novos



Nanofluidos usados

Fonte: Autoria própria (2023)

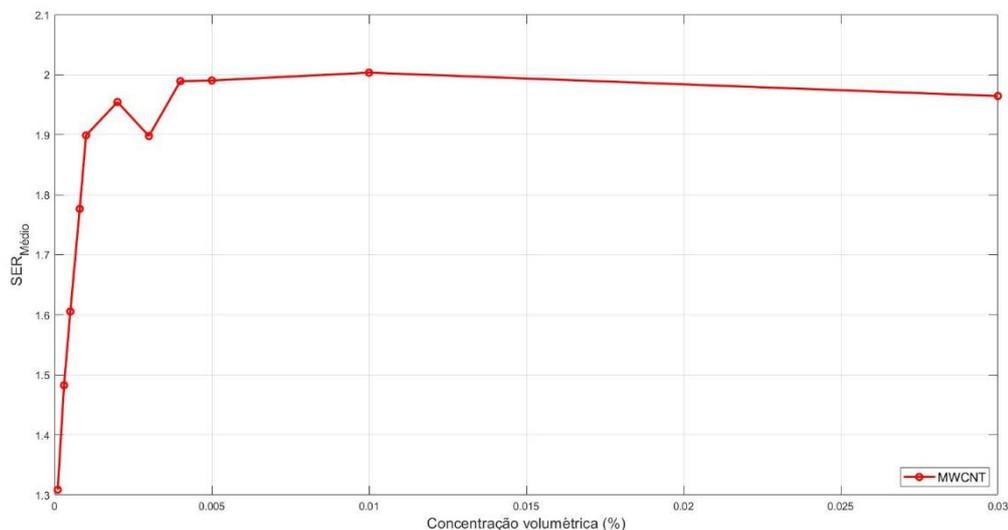
Observando a Tabela 14 nota-se que a amostra que apresentou pior estabilidade, foi a menos concentrada ( $\phi_v=0,0001\%$ ) sem uso, com uma queda de 87% em relação a concentração inicial, além disso, observa-se um resultado inesperado, em que em alguns dias a concentração estimada é superior à concentração inicial. Esse fenômeno, quando apresenta valores muito superiores ao esperado (como os observados no nanofluido novo  $\phi_v=0,0040\%$ ), ou mesmo quando, após alguns dias de valores de concentração em queda, o valor estimado volta a subir substancialmente (como observado no nanofluido novo  $\phi_v=0,0008\%$ ), indica uma possível decantação da amostra, em que se forma uma estratificação da quantidade de nanopartículas encontrada em cada altura da amostra, assim, a amostra estaria localmente mais concentrada naquela altura de fluido analisada.

De forma geral, os resultados obtidos na análise quantitativa da estabilidade das amostras novas de nanofluidos de MWCNT em água até a concentração volumétrica 0,0010% se mostraram melhores que os obtidos pelos nanofluidos de ouro-água, mantendo-se significativamente estáveis por mais que o dobro do tempo.

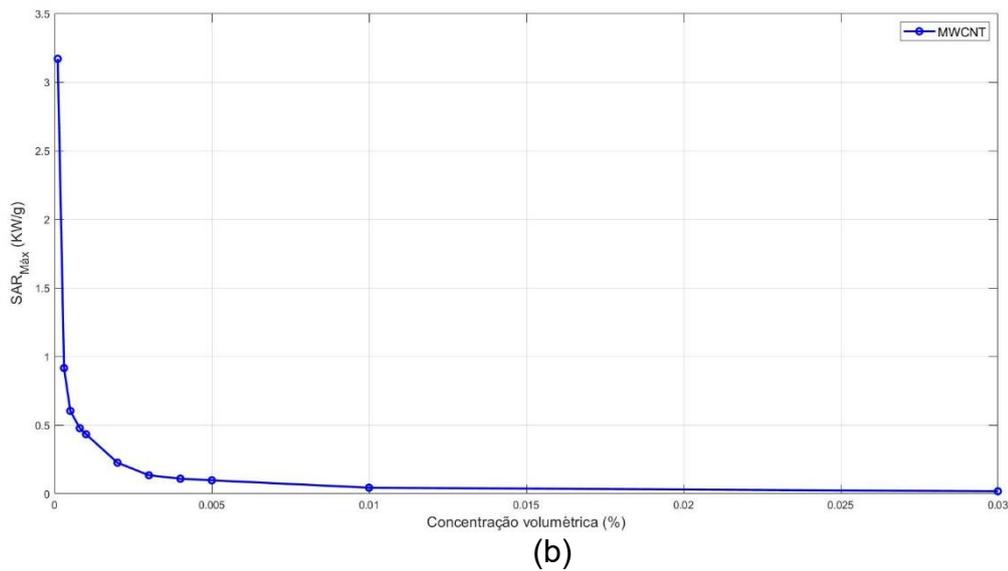
#### **Razão de energia armazenada (SER) e taxa de absorção específica (SAR)**

Relativo aos dados do teste com MWCNT-água do dia 15/10/19, a análise da razão de energia armazenada “SER” foi realizada e o resultado exposto na Figura 77(a). De forma complementar, os máximos valores calculados para a taxa de absorção específica “SAR” para a mesma data são mostrados na Figura 77(b).

Figura 77 – Parâmetros de conversão fototérmica dos nanofluidos de MWCNT-água, testados dia 15/10/19 (a) “SER” médio e (b) “SAR” máximo



(a)



Fonte: Autoria própria (2023)

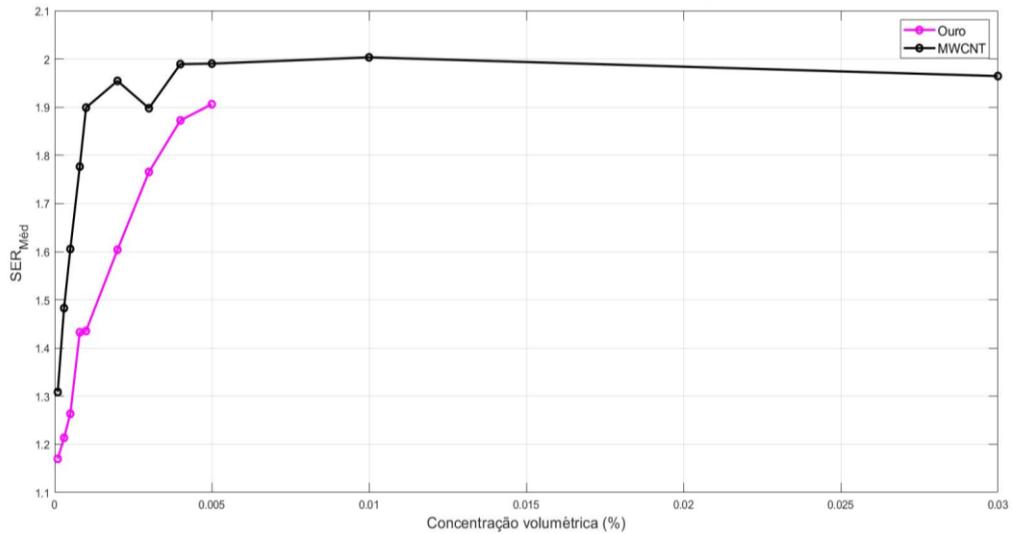
Os resultados obtidos para o “SER” e “SAR” dos nanofluidos de MWCNT-água até a concentração volumétrica de 0,0010% apresentam tendência semelhante ao observado nos nanofluidos de ouro-água, em que, a maior quantidade de nanopartículas presentes no fluido base resulta num aumento da energia armazenada por cada amostra (“SER” crescente) às custas de uma menor eficiência no processo de conversão fototérmica (“SAR” decrescente).

Ao analisar os valores de “SER” e “SAR” obtidos pelos nanofluidos de maior concentração ( $\phi_v \geq 0,002\%$ ), fica evidente a inviabilidade de aplicações utilizando grandes quantidade de MWCNT em água, visto que para essas condições não se obtém melhores resultados de energia armazenada e a taxa de absorção específica já se encontra muito próxima ao menor valor calculado (estabilização dos valores de “SAR” para  $\phi_v \geq 0,0020\%$ ), o que indicaria  $\phi_v = 0,0010\%$  como a concentração ideal (ou limite) para futuras aplicações.

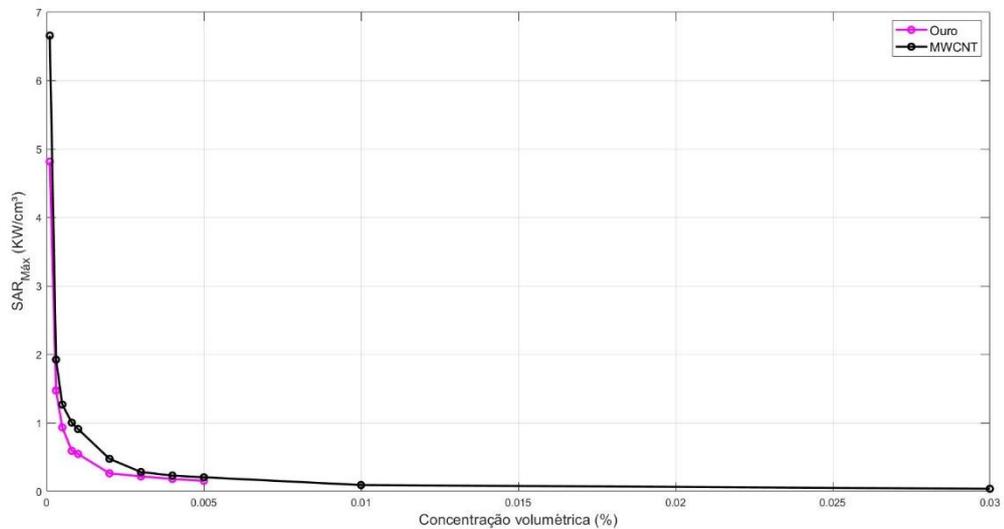
#### 4.1.5 Comparativo Nanofluidos de ouro-água e MWCNT-água

Avaliando os resultados obtidos no primeiro dia de testes dos nanofluidos de Ouro-água(11/6/20) e MWCNT-água(15/10/19) para os parâmetros “SER” e “SAR” (Figura 78(a) e (b)) observa-se que os resultados obtidos pelas nanopartículas de ouro são ligeiramente inferiores aos do MWCNT, assim como a estabilidade das amostras analisadas.

Figura 78 – Parâmetros de conversão fototérmica (a) “SER” médio e (b) “SAR” máximo para os nanofluidos de ouro e MWCNT em água



(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Assim, considerando os resultados obtidos e o objetivo pretendido de aplicação dos melhores dentre os fluidos estudados na bancada 1 em coletores solares para aquecimento de água utilizando nanofluidos como meio de conversão fototérmica, selecionou-se os de MWCNT-água com concentrações volumétricas de 0,0005%, 0,0008% e 0,0010% <sup>10</sup> para aplicação na bancada 2.

<sup>10</sup> A amostra MWCNT-água  $\phi_v=0,001\%$  apresentou-se como a concentração ideal (ou limite) para aplicações futuras em condições semelhantes às da bancada 1, motivo pelo qual essa foi a maior concentração selecionada para testes na bancada 2.

## 4.2 RESULTADOS BANCADA DE TESTES 2

### 4.2.1 Validação da bancada de testes 2: Resultados

A bancada 2 passou por duas etapas de validação do funcionamento que precedeu a avaliação do desempenho dos coletores solares utilizando nanofluidos. Como previamente exposto na Tabela 10 (Seção 3.7), na etapa 1 todos os coletores possuíam apenas ar ao redor das placas e serpentinas de aquecimento, enquanto na etapa 2 dois dos três coletores construídos foram preenchidos com água de forma alternada. Essas etapas de validação permitiram a verificação do correto funcionamento dos coletores nos quesitos:

- aquecimento da água do “boiler” através do processo de conversão fototérmica ocorrido nos coletores;
- adequada circulação da água nos coletores através do efeito termossifão;
- estanqueidade dos coletores ao receberem líquido em seu interior.

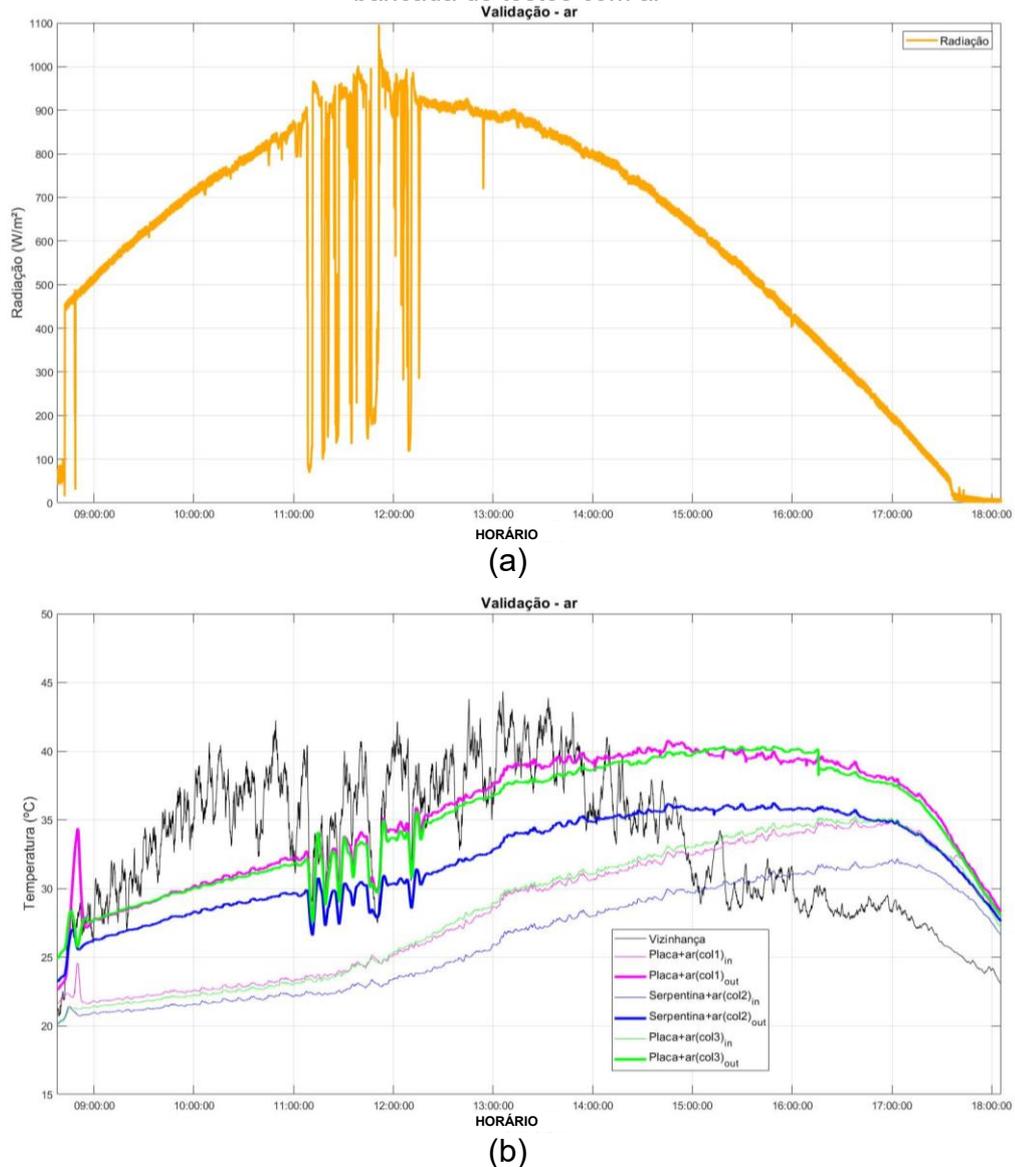
Os dados de temperatura na entrada e saída de cada um dos coletores, bem como os de radiação solar incidente, foram obtidos e representam os resultados obtidos nos testes de validação.

Nos gráficos, os coletores 1, 2 e 3 são identificados, em sequência, pelas siglas “col1”, “col2” e “col3”, e as temperaturas de entrada e saída em cada coletor foram designadas pelos subscritos “in” e “out” respectivamente.

#### **Validação bancada 2 - Etapa 1**

O resultado de um dos dias de validação da etapa 1, com apenas ar ao redor das placas e serpentinas de aquecimento de todos os coletores, é apresentado na Figura 79. Nota-se que os três coletores solares se comportam como o esperado, propiciando o aquecimento da água que entra em cada coletor (temperaturas de saída superiores às de entrada). Observa-se também que as variações da radiação solar incidente (como o período nublado entre 11:00AM e 12:15PM) influenciam rapidamente a temperatura de saída dos coletores, havendo oscilações semelhantes nos perfis apresentados na Figura 79(a) e (b).

Figura 79 – Perfis de (a) radiação e (b) temperatura para o dia 22/7/22, Etapa 1 – Validação da bancada de testes com ar



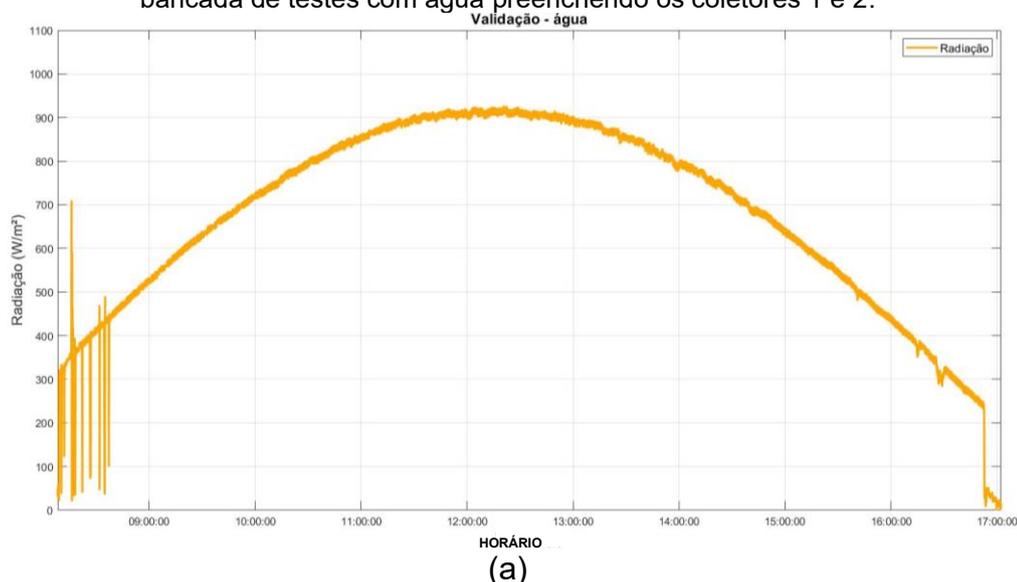
Observa-se que, logo no início do teste, há uma oscilação visível nas temperaturas da água no interior do coletor, com um rápido aumento, seguido de uma brusca queda. Esse comportamento é observado nos três coletores, sendo causado pela transição ao regime de escoamento da água no interior das tubulações do coletor através do efeito termossifão. Essa transição ocorre da seguinte maneira: a água presente nos tubos do coletor solar, inicialmente a uma temperatura uniforme e próxima à ambiente, ganha calor e sofre um rápido aumento de temperatura até que haja uma mudança de densidade suficientemente capaz de suplantar os efeitos da pressão manométrica local, provocando a subida da água agora aquecida até o reservatório térmico (que se encontra, em relação ao chão, a uma altura superior ao

coletor) e, conseqüentemente, a descida da água mais fria presente na região inferior do “boiler”, iniciando-se, assim, o escoamento da água e uma queda brusca na temperatura da água aferida na saída do coletor. Uma vez estabelecido o escoamento da água através dos coletores, o efeito termossifão se mantém atuando enquanto haja calor sendo suficientemente fornecido ao coletor.

### Validação bancada 2 - Etapa 2

Na etapa 2, o coletor 2 (construído apenas com serpentina e sem placa absorvedora), foi preenchido com água todos os dias enquanto os coletores 1 e 3 (com configuração construtiva igual, composta por placa+serpentina absorvedora) foram preenchidos com água em dias alternados. Na Figura 80 observa-se o resultado de um dia de testes com água preenchendo os coletores 1 e 2 e na Figura 81, com água preenchendo os coletores 2 e 3.

Figura 80 – Perfis de (a) radiação e (b) temperatura para o dia 27/7/22, Etapa 2 – Validação da bancada de testes com água preenchendo os coletores 1 e 2.



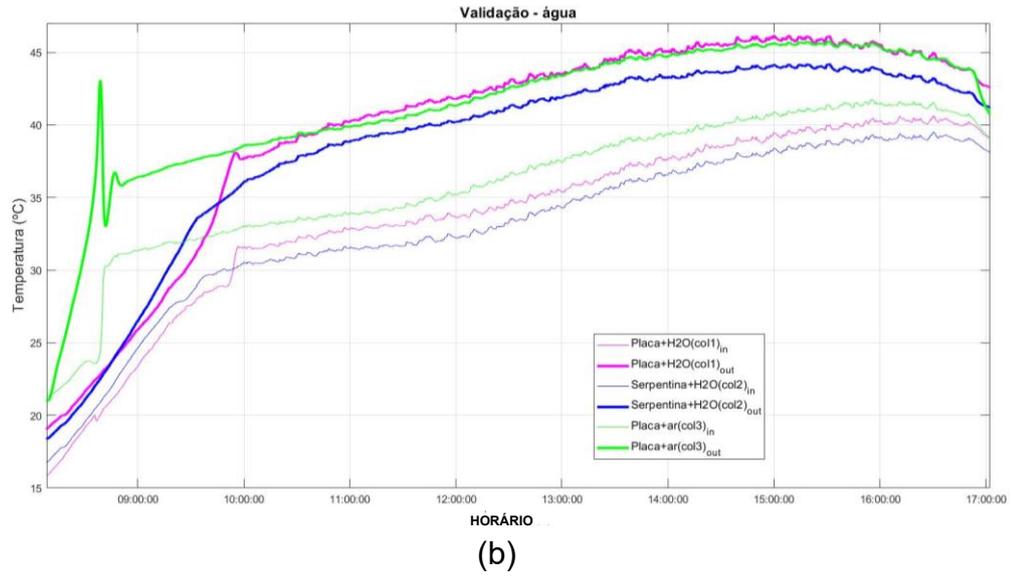
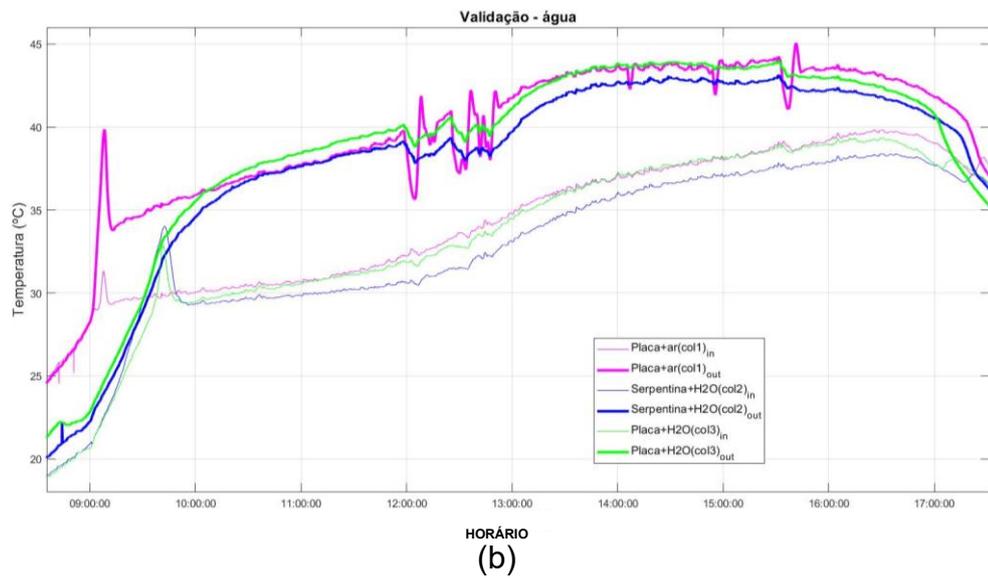
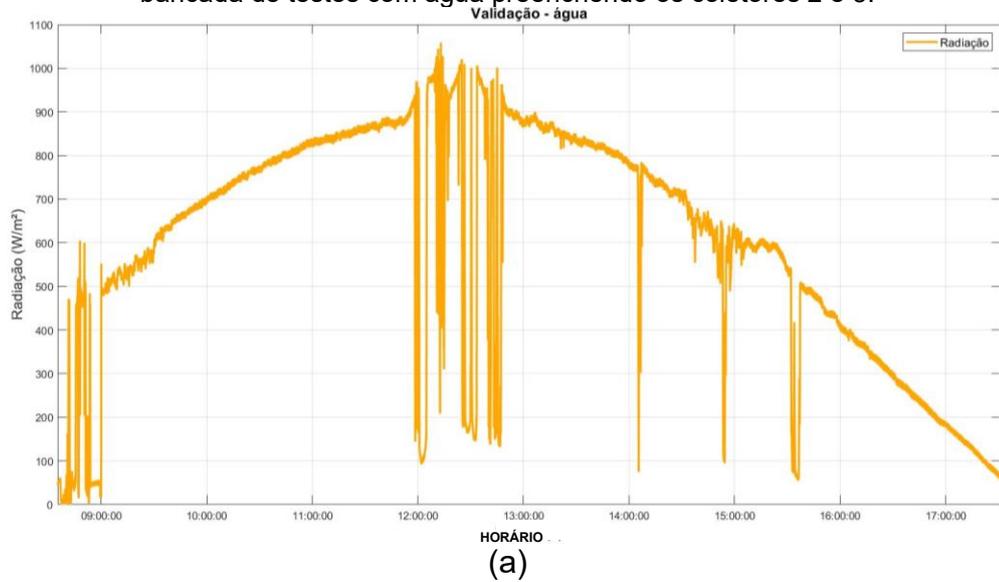


Figura 81 – Perfis de (a) radiação e (b) temperatura para o dia 29/7/22, Etapa 2 – Validação da bancada de testes com água preenchendo os coletores 2 e 3.



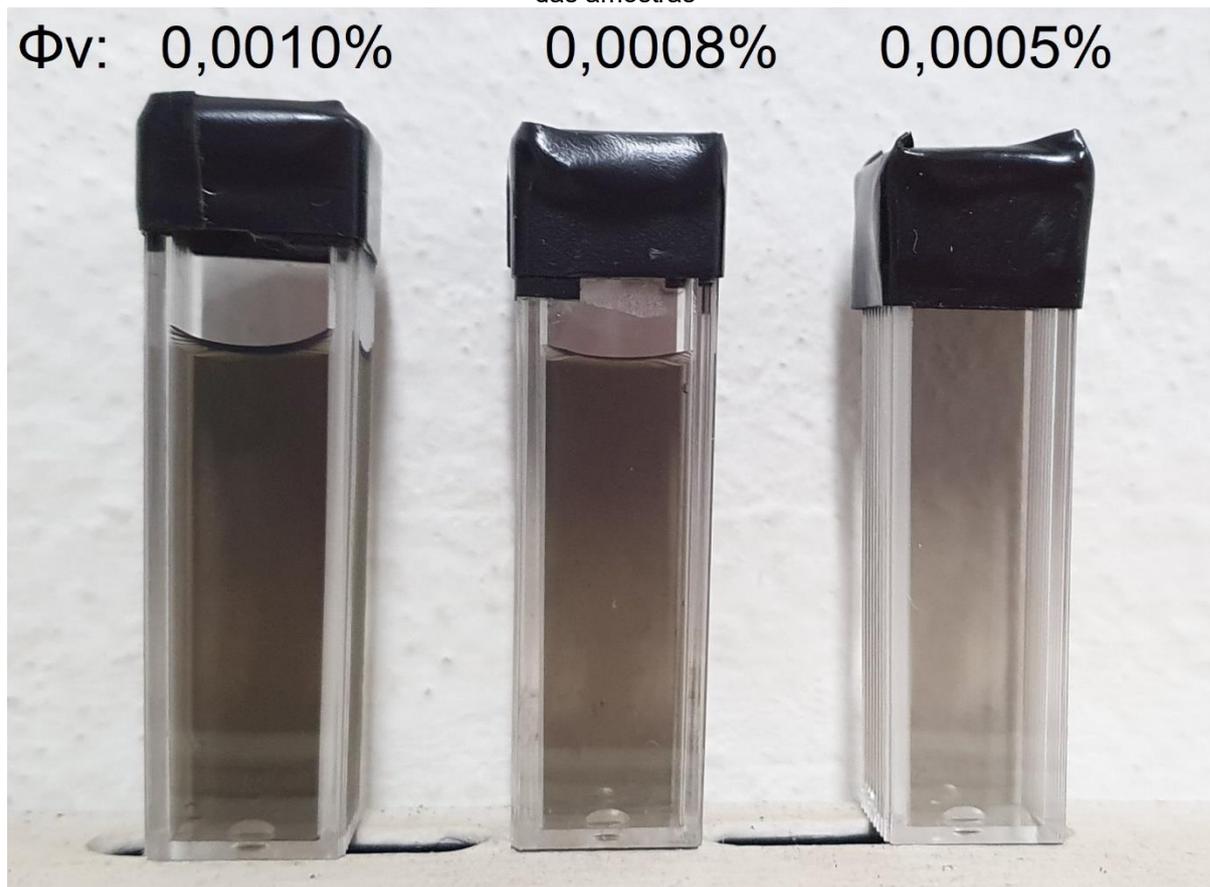
Observa-se na Figura 80(b) e Figura 81(b) que as oscilações de temperatura observadas no início do período de teste características do processo de estabelecimento do escoamento de água no interior dos tubos pelo efeito termossifão se mantém notável no coletor preenchido com ar, sendo muito mais sutil nos coletores preenchidos com água, resultado já esperado considerando sua maior inércia térmica. A variação observada na temperatura de saída dos coletores diante das oscilações na radiação solar incidente seguiu essa mesma tendência, sendo mais lenta nos coletores preenchidos com água. Outra característica que pode ser vista em ambos os dias de teste de validação é a menor temperatura de saída da água no coletor 2, que possui apenas serpentina como elemento de conversão fototérmica.

#### **4.2.2 Coletores solares utilizando nanofluidos**

Após a validação da bancada de testes 2, foram realizados testes experimentais introduzindo nanofluidos ao redor das placas e serpentinas de aquecimento dos coletores solares para avaliar seu desempenho como meio de conversão fototérmica. Para tal, foram produzidas amostras de nanofluido em três concentrações ( $\phi_v=0,0010$ ,  $0,0008$  e  $0,0005\%$ ) com volume mínimo de 3L segundo metodologia descrita na seção 3.1, sendo que, desse total, 2,25L foram utilizados para preencher o interior de cada coletor. Cada concentração foi testada por um período de cinco dias consecutivos, sem reposição, conforme cronograma previamente apresentado na Tabela 9 da Seção 3.6.6.

De cada um dos nanofluidos produzidos, foi retirada uma pequena amostra ( $\pm 3$  ml) que foi adicionada à uma cubeta vedada, como apresentadas na Figura 82, cujo objetivo era acompanhar diariamente a estabilidade dos nanofluidos testados, evitando, assim, a abertura diária dos coletores solares, que foram mantidos vedados do primeiro ao último dia de testes.

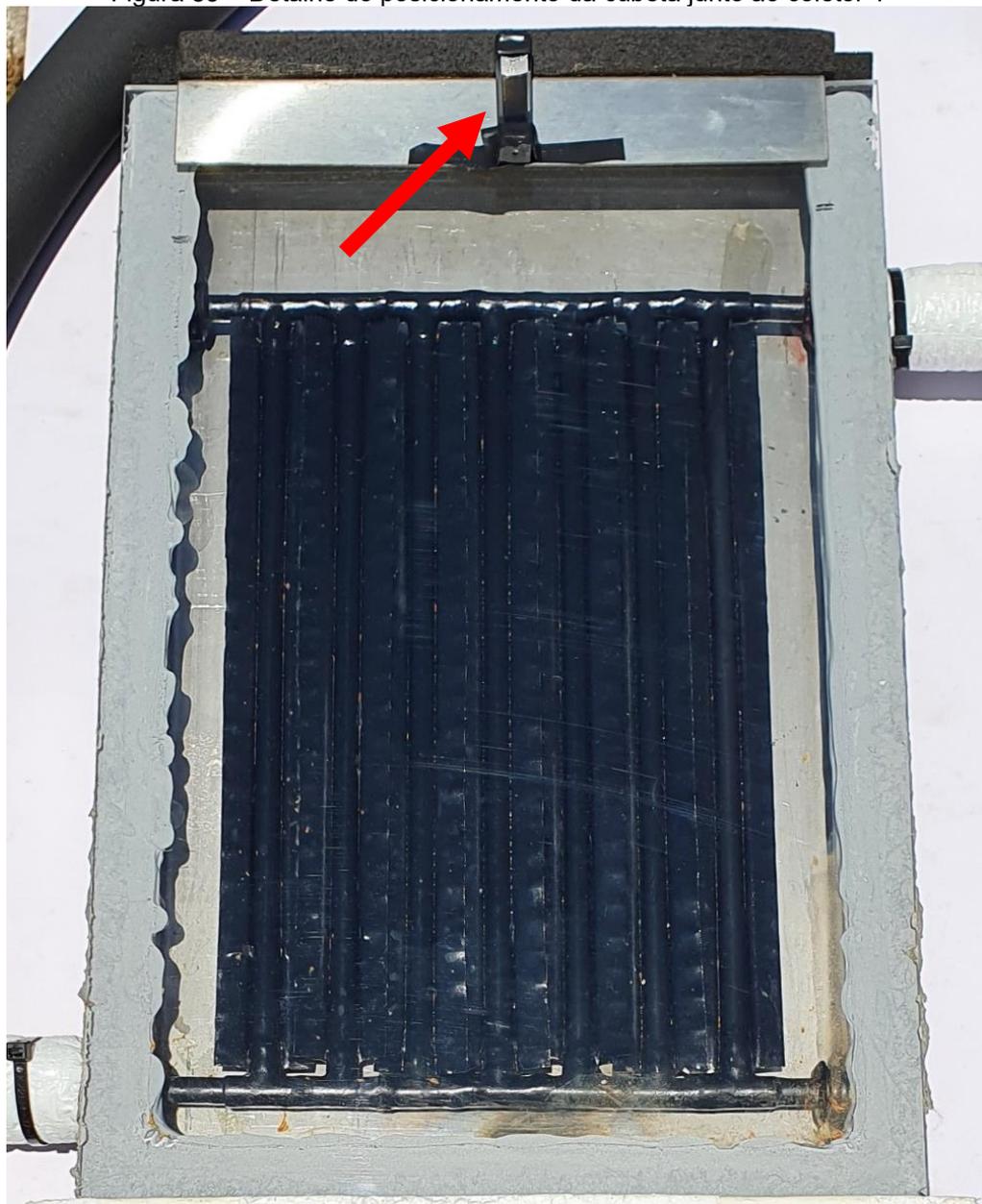
Figura 82 – Foto das amostras de volume reduzido utilizadas para avaliação diária da estabilidade das amostras



Fonte: Autoria própria (2023)

Essas cubetas foram fixadas diariamente junto à parte superior do coletor 1 (seta vermelha na Figura 83) e expostas à radiação solar nas mesmas condições e dias de teste dos coletores solares, sendo a absorvância dessas avaliada pelo método de espectrofotometria ao final de cada um dos cinco dias de teste. A análise diária dos nanofluidos das cubetas foi realizada como complemento à avaliação da estabilidade das amostras de maior volume (2,25L) que foram de fato usadas no preenchimento dos coletores solares, que só foi realizada no início e no final de cada etapa.

Figura 83 – Detalhe do posicionamento da cubeta junto ao coletor 1



Fonte: A autoria própria (2023)

Nas três etapas de testes utilizando nanofluidos (cada etapa testando uma concentração volumétrica diferente) estes foram usados para preencher os coletores solares 2 e 3, propiciando assim a análise do desempenho dos nanofluidos como meio de conversão fototérmica em duas situações: substituição da placa absorvedora (Coletor 2, que possui apenas serpentina de aquecimento) e operando em conjunto com a placa absorvedora (Coletor 3, que possui placa+serpentina absorvedora). Em paralelo, o Coletor 1 foi mantido em sua configuração tradicional e preenchido com ar ao redor da placa+serpentina absorvedoras.

### 4.2.3 Nanofluido de MWCNT-Água, $\Phi_v=0,0010\%$

Os testes na bancada 2 utilizando nanofluidos de MWCNT em água, com concentração volumétrica de 0,0010% foi realizado nos dias 5, 6, 7, 8 e 9/8/22, tendo duração de aproximadamente 9 horas cada.

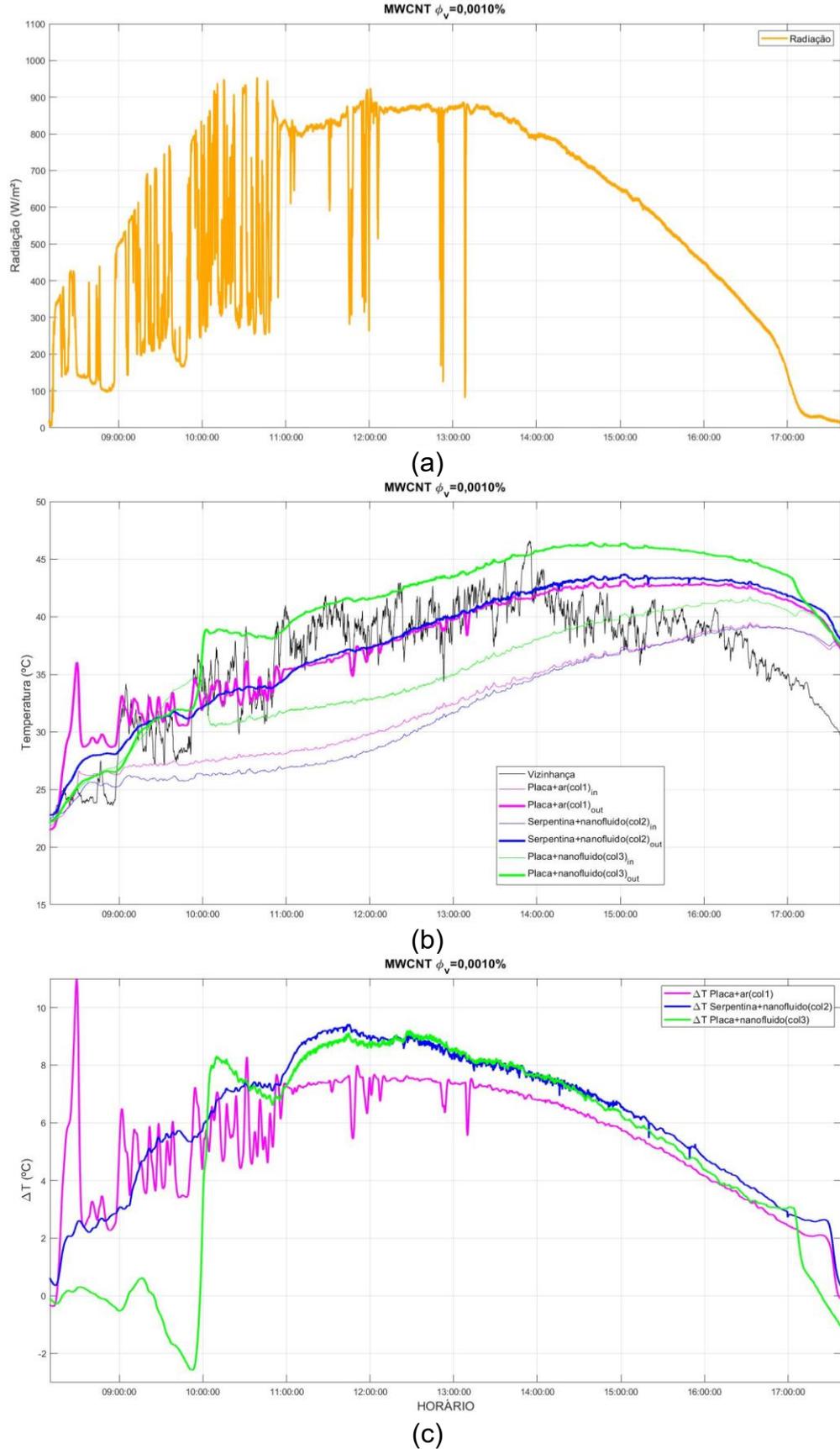
#### Teste na bancada 2, $\Phi_v=0,0010\%$ : dia 1, 5/8/22

A Figura 84 apresenta os perfis de radiação, temperaturas de entrada e saída e variação da temperatura ( $\Delta T$ ) em cada coletor ao longo do primeiro dia de testes (5/8/22).

Nota-se na Figura 84 (a) que o início do teste foi marcado por grandes oscilações da radiação solar incidente, provenientes da presença de várias nuvens (céu parcialmente nublado). Observa-se na Figura 84 (b) que o Coletor 3 (placa+nanofluido) apresentou as maiores temperaturas de entrada (utilizada como estimativa para a temperatura da temperatura da água do reservatório térmico, " $T_{Boiler} \cong T_{ent\_col}$ ") e saída a partir de 10:00 AM, enquanto o Coletor 1 (tradicional, placa+ar) e o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentaram valores semelhantes.

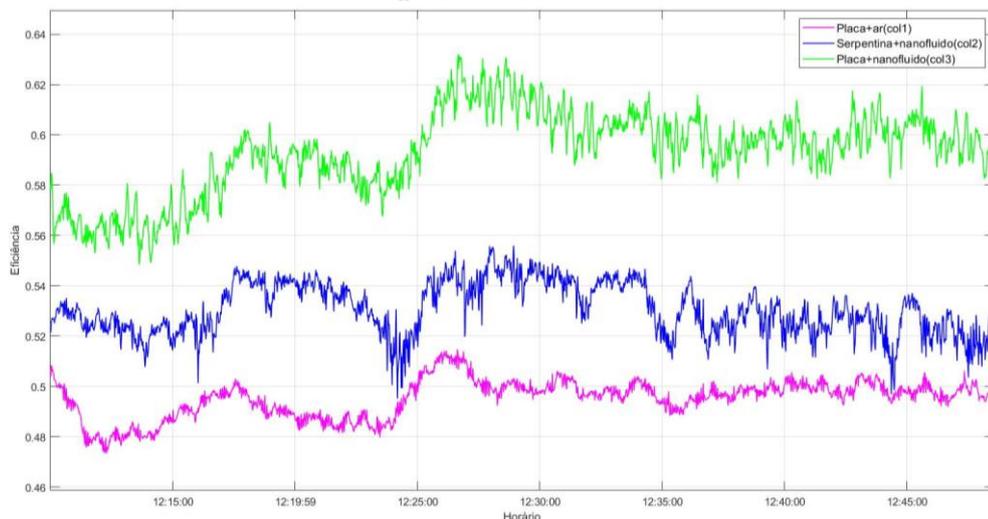
As condições de teste com céu parcialmente nublado resultaram numa variação de temperatura negativa no Coletor 3 (placa+nanofluido) durante quase duas horas no início do teste (Figura 84 (c)), indicando que, durante esse período, o calor recebido pela água presente no interior da serpentina não foi suficiente para estabelecer o efeito termossifão. Nota-se também que, a partir de 11:00 AM, momento em que a radiação solar se torna mais estável, os coletores solares que operam com nanofluidos (Coletores 2 e 3) apresentaram maior variação da temperatura quando comparados ao coletor tradicional (Coletor 1).

Figura 84 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 5/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0010\%$ .



A partir dos dados de temperatura nas entradas e saídas de cada coletor solar e da área de absorção de cada coletor, foi calculada a eficiência de cada um conforme normas e procedimentos estabelecidos na seção 3.8.3. A Figura 85 ilustra um trecho temporal representativo dos resultados do cálculo da eficiência para cada coletor no primeiro dia de testes. Observa-se que os coletores operando com nanofluidos (Coletores 2 e 3) apresentaram, nesse dia, eficiências maiores quando comparadas com o coletor tradicional (Coletor 1), que poderiam ser explicadas por maiores taxas de absorção de calor nos coletores 2 e 3 que resultam nas variações de temperatura ( $\Delta T$ ) significativamente superiores previamente observadas (Figura 84 (c)) e numa maior vazão mássica obtida pelo efeito termossifão. Além disso, ressalta-se que, em dias com ocorrência de passagem de muitas nuvens como o observado, a presença de nanofluidos nos coletores solares modificados favorece a obtenção de valores de eficiência mais altos uma vez que estes possuem maior inércia térmica, mantendo a variação de temperatura da água no interior das serpentinas mesmo em condições de quedas momentâneas da radiação incidente ( $\Delta T_i$  mantida “alta” pela inércia térmica do líquido ao redor da serpentina de aquecimento e  $G_i$  reduzida pela passagem de nuvens resultam em  $\eta_i$  mais alta nos coletores com nanofluidos).

Figura 85 – Eficiência de cada coletor para o dia 5/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi v=0,0010\%$ .



Observou-se no primeiro dia de testes, através de inspeção visual do início até o final do período de exposição à radiação solar (Figura 86), que as amostras de nanofluido testadas nos coletores 2 e 3 não apresentaram sinais de degradação tais como mudança de cor, transparência ou formação de aglomerações visíveis.

Figura 86 – Fotos comparativas da bancada 2 no início e final do dia 5/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0010\%$

**Dia 1, início do teste;  $\Phi_v=0,0010\%$**



**Dia 1, final do teste;  $\Phi_v=0,0010\%$**

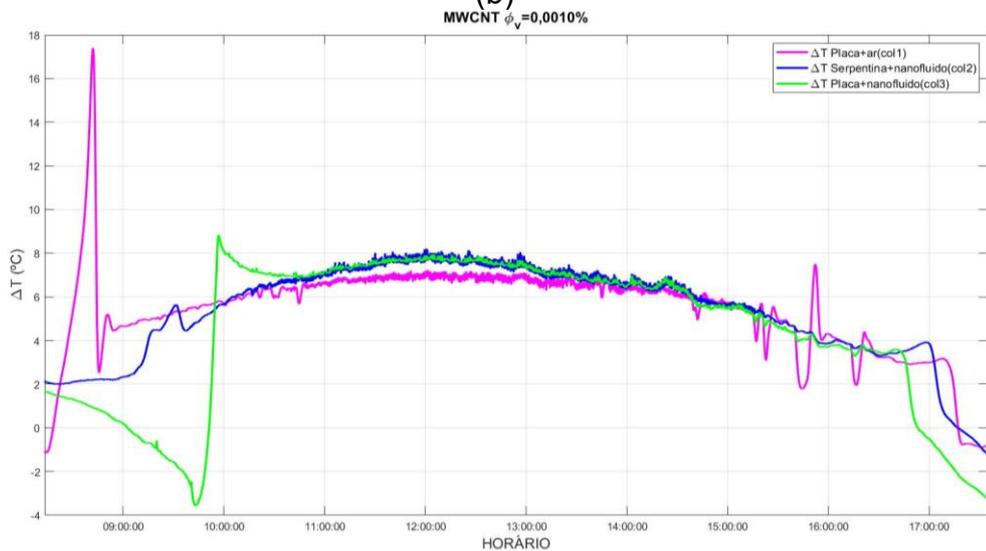
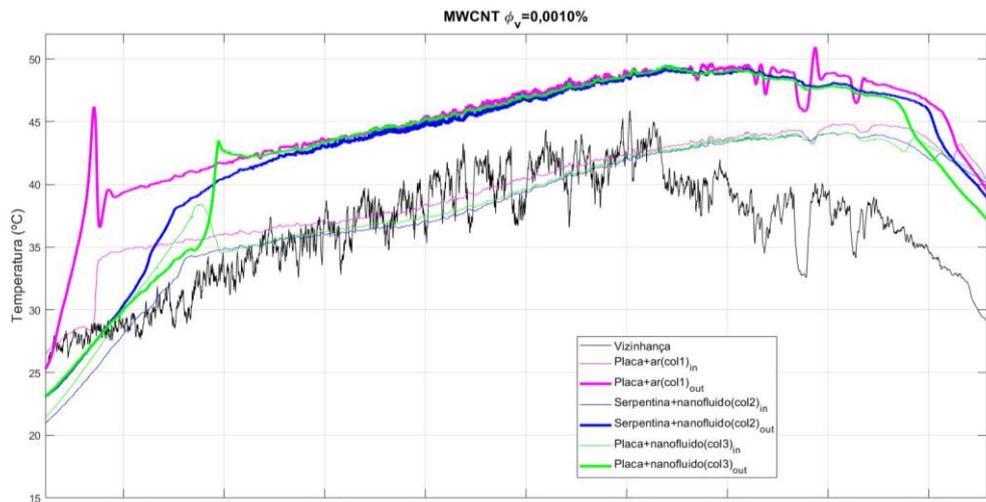
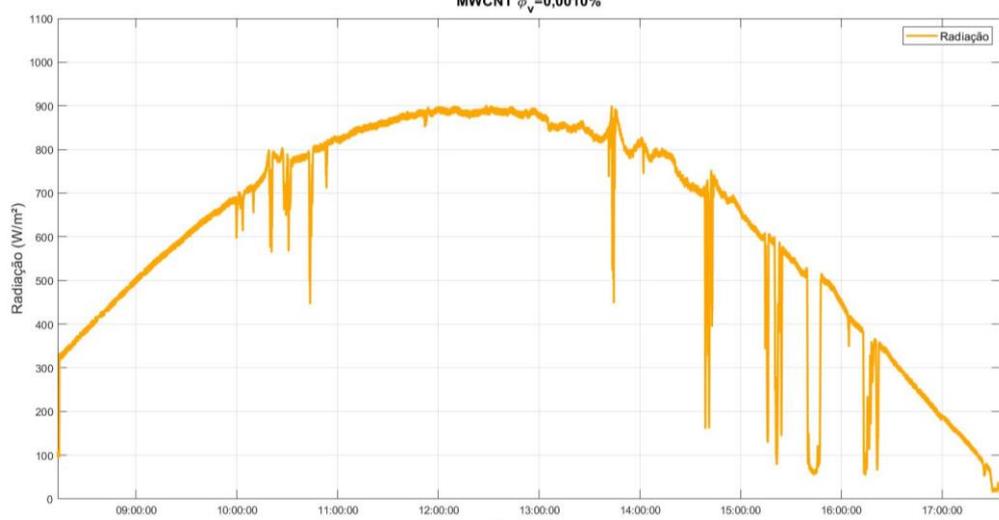


Fonte: A autoria própria (2023)

### **Teste na bancada 2, $\Phi_v=0,0010\%$ : dia 3, 7/8/22**

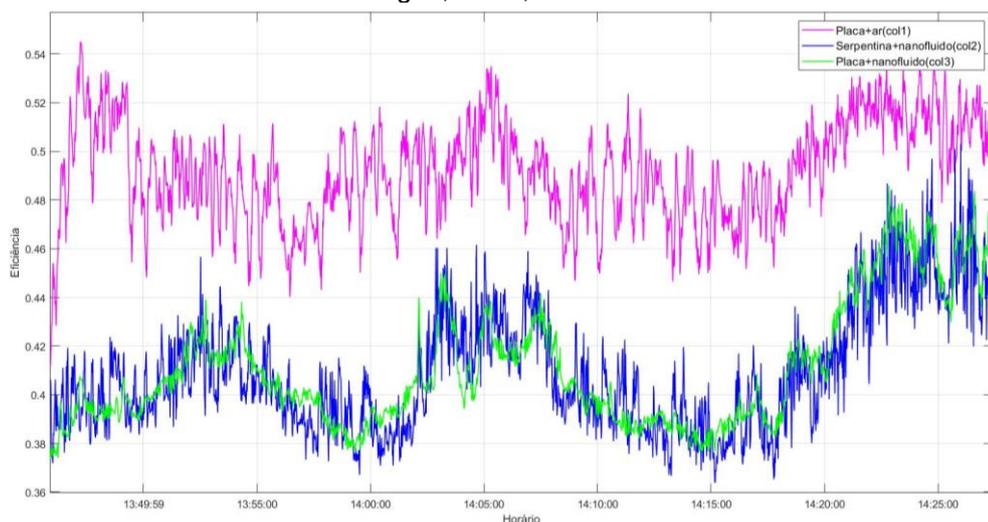
O segundo e terceiro dia de testes ocorreram em condições de céu claro, com nuvens ocasionais. A Figura 87 apresenta os perfis de radiação, temperaturas de entrada e saída e variação da temperatura ( $\Delta T$ ) em cada coletor ao longo do terceiro dia de testes (7/8/22). Observa-se que, de maneira similar ao primeiro dia, a variação de temperatura ( $\Delta T$ ) do coletor 3 (Figura 87 (c)) foi negativa antes das 10:00AM e, a partir de 11:00 AM, os coletores que operam com nanofluidos (coletores 2 e 3) apresentaram resultados discretamente superiores quando comparados ao coletor tradicional (coletor 1). No entanto, as temperaturas máximas alcançadas na entrada (" $T_{Boiler}$ ") e saída de cada um deles foram muito semelhantes durante a maior parte do período de testes.

Figura 87 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 7/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0010\%$ .



A semelhança entre os resultados de temperaturas obtidos pelos coletores operando com nanofluidos e o coletor tradicional se torna mais relevante ao calcular a eficiência dos coletores no dia 7/8/22; como pode ser visto na Figura 88, o coletor tradicional apresentou a maior eficiência, enquanto os demais tiveram desempenho muito semelhante. Esse resultado pode ser explicado matematicamente pela análise dos termos da Equação (21) da Seção 3.8.3 ( $\eta_i = \frac{\dot{m} c_p \Delta T}{A_{col} G}$ ): uma vez que os perfis de variação de temperatura ( $\Delta T$ ) são muito próximos, a taxa de energia útil ( $\dot{m} c_p \Delta T$ ) segue a mesma tendência, no entanto, o preenchimento dos coletores com nanofluidos resultam numa maior área frontal de absorção da radiação solar ( $A_{col}$ ), o que aumenta a taxa de radiação absorvida ( $A_{col} G$ ) dos coletores 2 e 3, assim, a razão entre a taxa de energia útil e a de radiação absorvida resulta em valores de eficiência inferiores para os coletores com nanofluidos.

Figura 88 – Eficiência de cada coletor para o dia 7/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi v=0,0010\%$ .

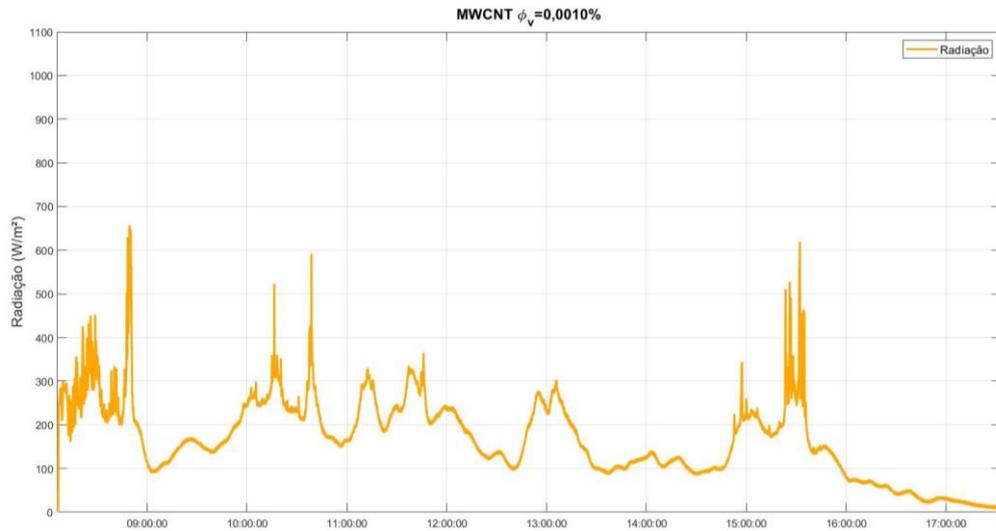


### Teste na bancada 2, $\Phi v=0,0010\%$ : dia 5, 9/8/22

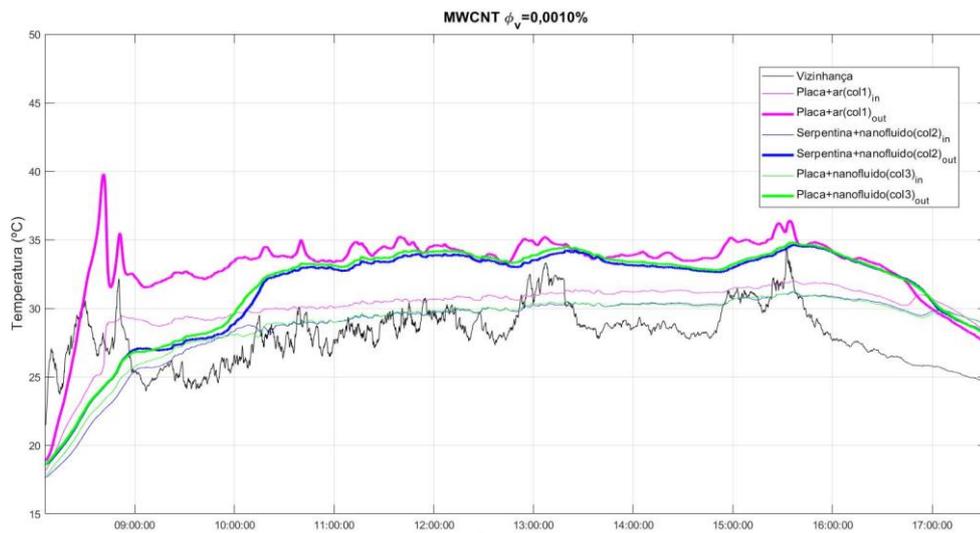
O penúltimo e último dia de testes ocorreram em condições de céu extremamente encoberto por nuvens. A Figura 89 apresenta os perfis de radiação, temperaturas de entrada e saída e variação da temperatura ( $\Delta T$ ) em cada coletor ao longo do último dia de testes (9/8/22). Nota-se que as temperaturas máximas alcançadas na entrada ( $T_{Boiler}$ ) e saída dos três coletores foram muito aquém do obtido em condições de céu claro (6 e 7/8/22) ou parcialmente nublado (5/8/22) e que

a radiação solar incidente ( $<650\text{W/m}^2$ ) não atingiu sequer o mínimo exigido para atender às normas de determinação da eficiência dos coletores, motivo pelo qual esse parâmetro não foi calculado para esses dois dias (8 e 9/8/22).

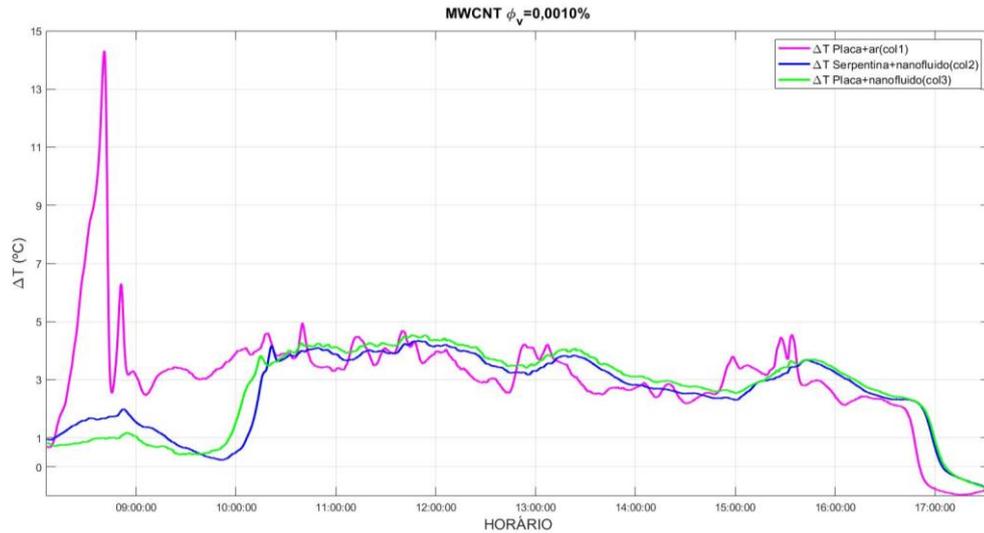
Figura 89 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 9/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_V=0,0010\%$ .



(a)



(b)



(c)

### Comparativo dos testes na bancada 2 com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ )

Os dados coletados e calculados para os cinco dias de teste com nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) foram resumidos através da Tabela 15, em que se destacam os seguintes valores:

- Eficiência instantânea máxima:  $\eta_i$  máx;
- Horário da eficiência instantânea máxima: Horário  $\eta_i$  máx;
- Eficiência média:  $\eta$  média;
- Variação de temperatura máxima e média:  $\Delta T$  máx | méd;
- Horário da máxima variação de temperatura: Horário  $\Delta T$  máx;
- Máxima temperatura de saída dos coletores:  $T_{out\_col}$  máx;
- Máxima temperatura atingida pela água do reservatório térmico:  $T_{Boiler}$ ;
- Radiação incidente média durante o período de testes:  $G$  média;
- Temperatura ambiente mínima, máxima e média, segundo INMET:  $T_{amb}$

Ressalta-se, uma vez mais, que as condições climáticas observadas nos últimos dois dias de testes (8 e 9/8/22) não atingiram os critérios estabelecidos pela norma ABNT NBR 17003 (2021), assim, os respectivos cálculos de eficiência não foram realizados.

Cabe ainda ressaltar que, durante os períodos em que o efeito termossifão não está plenamente estabelecido, quando são analisados os dados de variação de temperatura e eficiência notam-se valores discrepantes e, conseqüentemente, não representativos do comportamento geral de cada coletor, portanto, todos os cálculos

de valores máximos e médios foram realizados desconsiderando esses períodos transitórios.

Tabela 15 – Resumo dos principais parâmetros analisados nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ )

	$\eta_i$ máx	Horário $\eta_i$ máx	$\eta$ média	$\Delta T$	Horário $\Delta T$ máx	$T_{sai\_col}$ máx (°C)	Horário $T_{sai\_col}$ máx	$T_{Boiler}$ ( $T_{ent\_col}$ máx) (°C)	$G$ média (W/m <sup>2</sup> )	$T_{amb}$ (INMET)				
				— méd (°C)						Mín. Máx. Média (°C)				
5/8/22	0,5129	'12:26:04'	0,4763	7,99	'11:50:42'	43,18	'15:02:56'	39,49	721,6	19,1				
				6,37										
	0,5912	'11:38:00'	0,4969	9,43						'11:44:52'	43,72	'15:02:43'	39,32	31,3
			7,41											
			9,22											
	0,6230	'12:26:55'	0,5268	7,23	'12:28:37'	46,49	'14:39:01'	41,71		27,35				
6/8/22	0,5271	'11:52:56'	0,4587	7,20	'11:52:48'	48,37	'13:32:51'	43,13	763,1	18,6				
				6,61										
	0,5386	'11:39:24'	0,3853	8,24						'12:17:56'	47,71	'14:54:22'	42,92	31,4
				7,21										
			8,21											
	0,5557	'11:35:59'	0,4160	7,46	'11:46:24'	48,54	'14:54:55'	43,98		28,52				
7/8/22	0,5452	'13:47:13'	0,4806	7,15	'12:01:18'	50,94	'15:52:29'	44,86	816,9	21				
				6,48										
	0,5149	'12:25:33'	0,4224	8,14						'12:00:33'	49,49	'14:24:44'	44,15	32,2
				6,94										
			7,89											
	0,4950	'12:15:49'	0,4234	6,93	'12:05:19'	49,53	'14:23:16'	44,15		28,01				
8/8/22	-	-	-	6,28	'11:44:48'	46,46	'08:46:51'	37,37	173,2	22,6				
				4,51										
	-	-	-	5,06						'11:01:17'	41,26	'10:52:12'	36,15	26,2
				2,63										
			6,53											
	-	-	-	1,76	'11:00:59'	44,17	'10:47:51'	38,79		23,74				
9/8/22	-	-	-	4,64	'11:39:39'	39,79	'08:41:15'	32,01	286,6	18,8				
				3,26										
	-	-	-	4,33						'11:49:04'	34,63	'15:36:48'	31,19	27,2
				3,50										
			4,53											
	-	-	-	3,74	'11:45:23'	34,81	'15:35:59'	31,26		24,26				

: Col1

: Col2

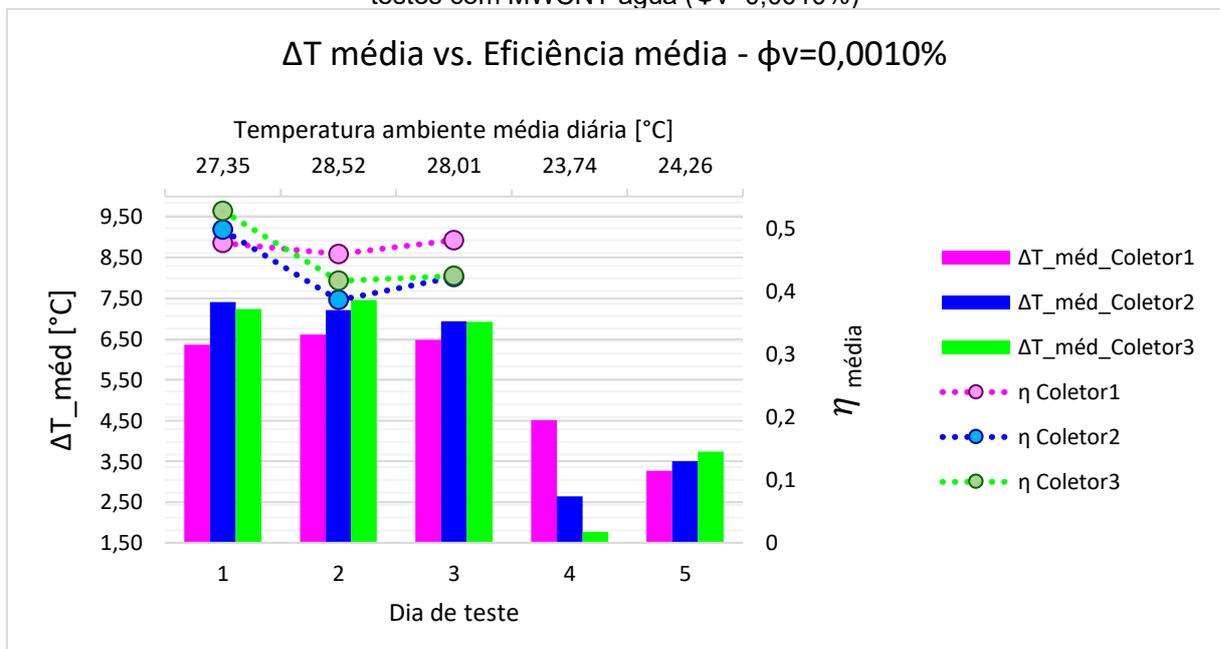
: Col3

Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que os horários de máxima eficiência e máxima variação de temperatura ocorrem, para todos os coletores, em horários próximos do meio-dia solar. O Coletor 3 (placa+nanofluido) apresentou o maior valor de eficiência média no primeiro dia de testes, sendo suplantado pelos resultados do Coletor 1 (placa+ar) nos demais dias. Além disso, apesar de o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentar os maiores valores de variação de temperatura nos dias mais quentes (5,6 e 7/8/22), seus resultados de eficiência média foram os menores dentre os três coletores.

Sabe-se que os valores médios de variação de temperatura e eficiência de cada coletor se relacionam com a proporção de quanto calor está sendo transferido à água do boiler e de quão eficiente está sendo esse processo, desta maneira, destacou-se tais dados na Figura 90. Através dela é possível observar que o Coletor 1 apresentou nos três primeiros dias de teste as menores médias de variação de temperatura e valores de eficiência sem grandes variações, girando em torno de  $6,5^{\circ}\text{C}$  e 0,47, respectivamente. Além disso, é também notável a queda na média da variação da temperatura para todos os coletores em razão das condições de céu encoberto e consequente radiação média incidente muito baixa que ocorreram nos últimos dois dias de teste.

Figura 90 – Comparativo entre a variação de temperatura e a eficiência médias de cada coletor nos testes com MWCNT-água ( $\phi_v=0,0010\%$ )



Fonte: Autoria própria (2023)

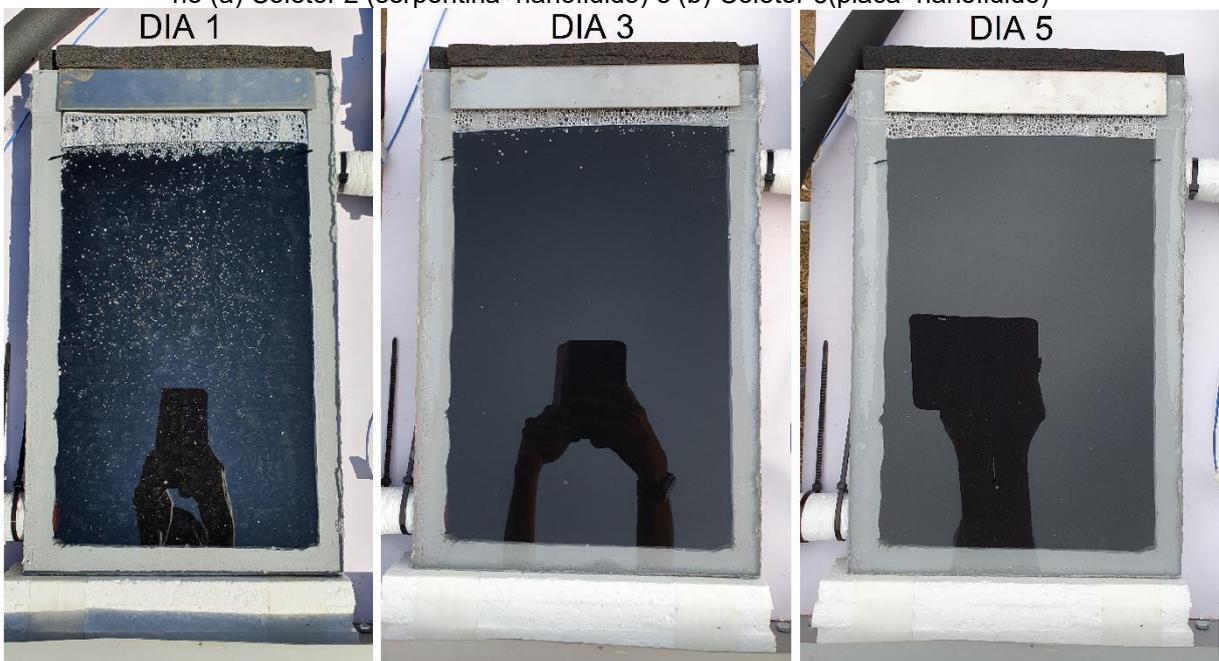
### Estabilidade das amostras MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) testados na bancada 2

Ao longo dos cinco dias de testes com nanofluidos MWCNT-água com concentração volumétrica 0,0010% a estabilidade das amostras foi analisada de três maneiras:

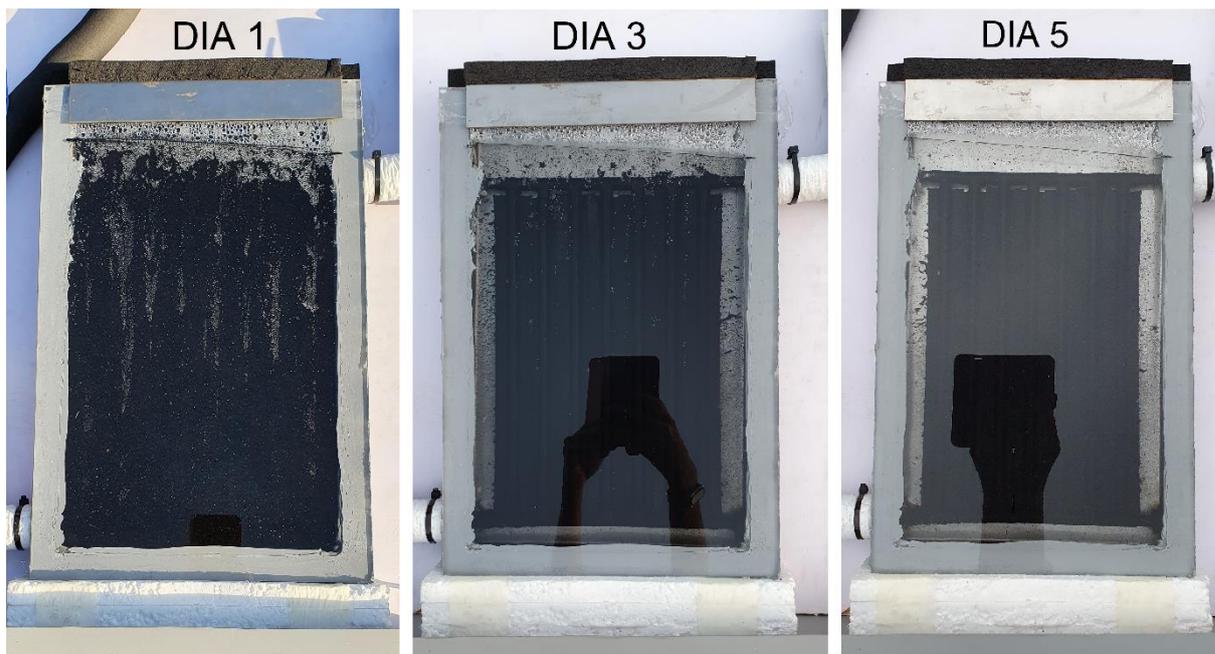
- inspeção visual diária dos nanofluidos no interior dos coletores 2 e 3;
- medição diária da absorbância do nanofluido presente na cubeta fixada junto ao coletor 1;
- medição da absorbância dos nanofluidos usados para preencher os coletores 2 e 3 antes do primeiro e após o quinto e último dia de testes.

Através da inspeção visual dos nanofluidos ao longo dos dias de testes foi possível observar que os nanofluidos presentes no Coletor 2 (Figura 91 (a)) e na cubeta fixada junto ao Coletor 1 não apresentaram mudanças significativas diante da exposição à radiação solar, no entanto, no Coletor 3 a amostra sofreu intensa degradação (Figura 91 (b)), sendo que, no dia 3, a separação entre o fluido base e as nanopartículas já era notável, havendo deposições ao longo de toda a placa absorvedora (Figura 92) e aglomerações de diferentes tamanhos no fundo de todo o coletor (Figura 93).

Figura 91 – Fotos comparativas ao final dos dias 1, 3 e 5 de testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) no (a) Coletor 2 (serpentina+nanofluido) e (b) Coletor 3(placa+nanofluido)



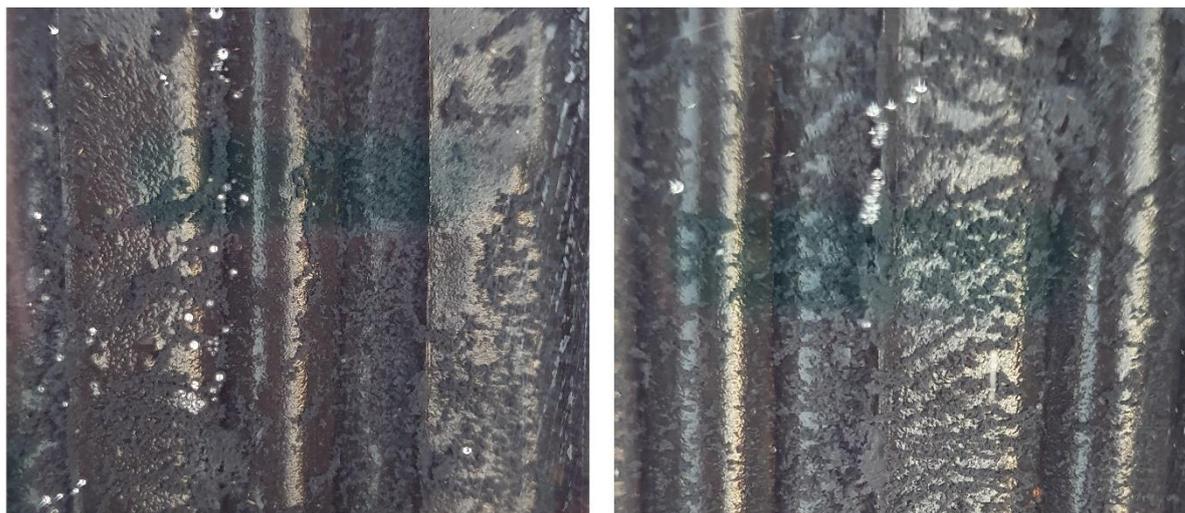
(a)



(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 92 – Detalhes das deposições de nanopartículas na superfície da placa absorvedora do Coletor 3 nos testes com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ )



Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 93 – Detalhes das aglomerações de nanopartículas observadas no Coletor 3 nos testes com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ )



Fonte: Autoria própria (2023)

Além da inspeção visual, a avaliação da estabilidade das amostras a partir da medição da absorvância (método de espectrofotometria) das amostras<sup>11</sup> MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) corroborou o comportamento observado, como apresenta a Figura 94 e a Tabela 16.

<sup>11</sup> (1) amostra diariamente exposta à radiação solar na cubeta fixada junto ao Coletor 1, (2) Amostra sem uso, (3) amostra proveniente do Coletor 2 ao fim dos testes experimentais e (4) amostra proveniente do Coletor 3 ao fim dos testes experimentais.

Figura 94 – Variação de absorbância das amostras de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) testados na bancada 2

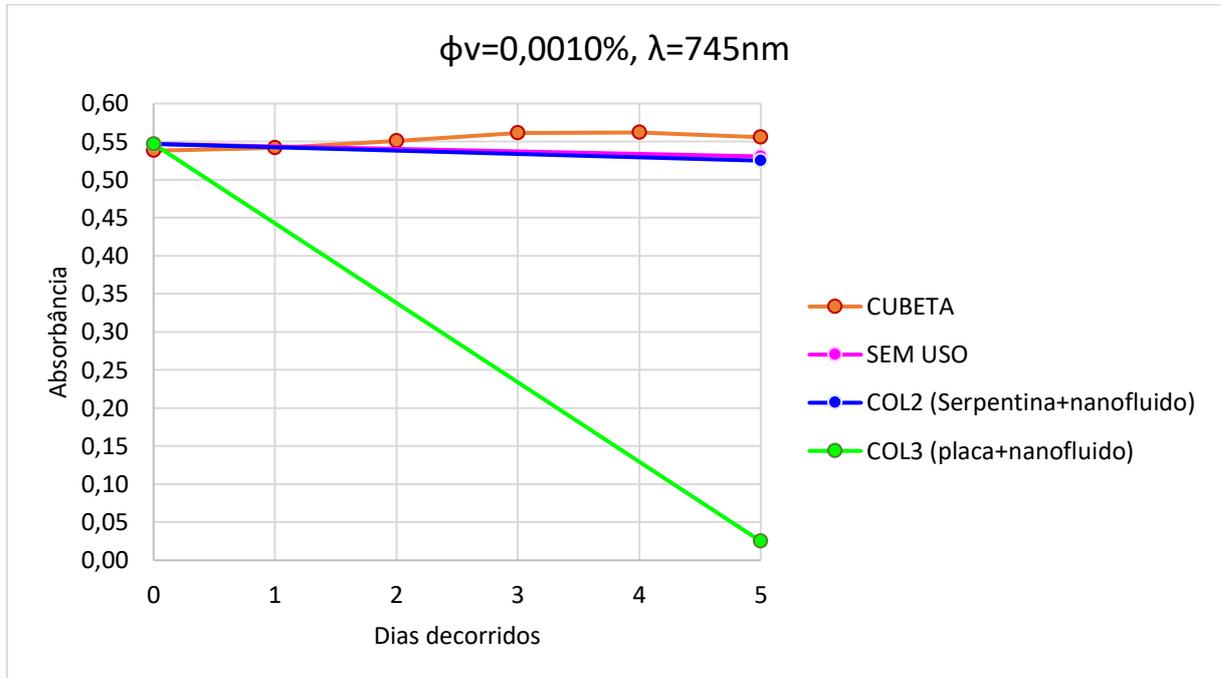


Tabela 16 - Concentração estimada para os nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) testados na bancada 2

Amostra	$\Phi_v$ estimado pela absorbância medida (ppm)					
	Dias decorridos desde a produção					
	0	1	2	3	4	5
CUBETA	10	10,07	10,24	10,42	10,44	10,33
SEM USO	10	-	-	-	-	9,70
COL 2	10	-	-	-	-	9,61
COL 3	10	-	-	-	-	0,67

Fonte: Autoria própria (2023)

A amostra presente na cubeta fixada junto ao Coletor 1 apresentou pequenos aumentos na absorbância (<4%) que podem ser explicadas pela sua exposição diária a condições não controladas de teste, que pode ter ocasionado um pequeno acúmulo de poeira na superfície da cubeta, o que diminui a transmitância do acrílico e aumenta o resultado da medição de absorbância do conjunto cubeta+fluido.

A amostra testada no Coletor 2, que possui serpentina operando em conjunto com o nanofluido, apresentou um comportamento da estabilidade muito semelhante à da amostra sem uso após 5 dias da produção (9,61ppm vs. 9,70ppm, uma diferença inferior à 2%), enquanto a amostra testada no Coletor 3, que possui a placa absorvedora operando em conjunto com o nanofluido, foi a que apresentou pior

estabilidade após os testes experimentais, com uma queda de cerca de 93% na concentração estimada pela absorvância quando comparada à amostra sem uso após 5 dias da produção (0,67ppm vs. 9,70ppm).

De acordo com os resultados obtidos, observa-se que a degradação das amostras de MWCNT-água não pode ser atribuída, isoladamente, à exposição do nanofluido à radiação solar e seu consequente aquecimento, pois, no caso da amostra presente na cubeta fixada junto ao Coletor 1 e das amostras anteriormente testadas na bancada 1, a perda de estabilidade ocorreu de forma semelhante à das amostras não expostas à radiação.

#### **4.2.4 Nanofluido de MWCNT-Água, $\Phi_v=0,0008\%$**

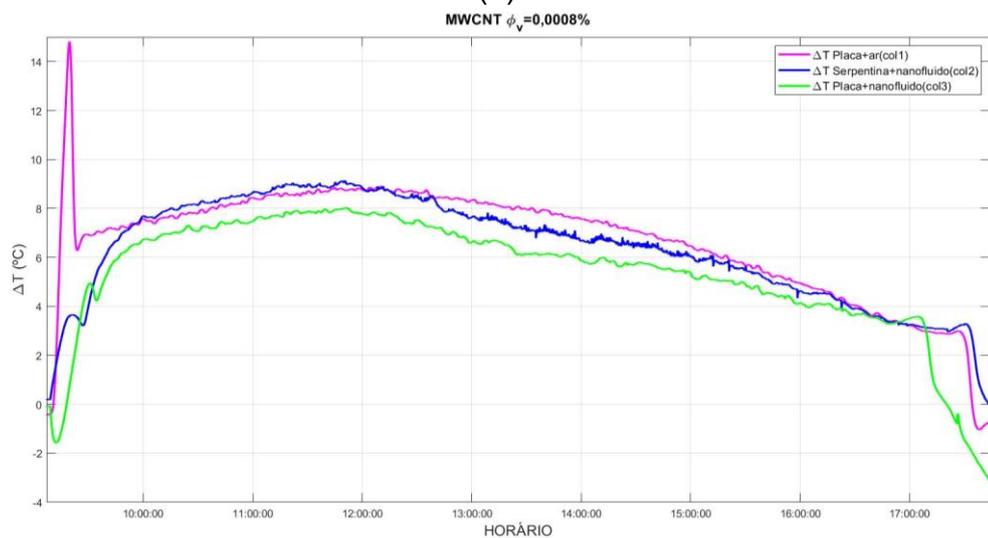
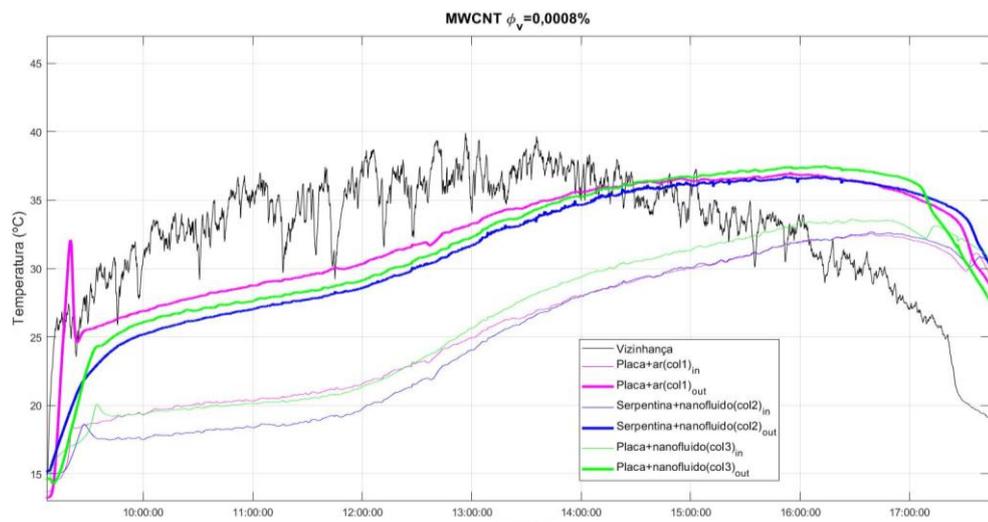
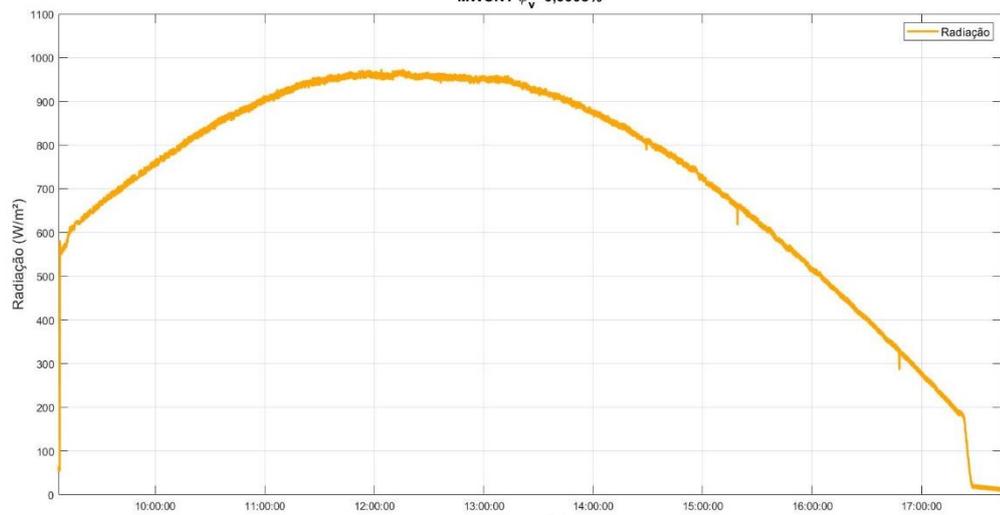
Os testes na bancada 2 utilizando nanofluidos de MWCNT em água, com concentração volumétrica de 0,0008% foi realizado nos dias 11, 12, 13, 14 e 15/8/22, tendo duração de aproximadamente 9 horas cada.

##### **Teste na bancada 2, $\Phi_v=0,0008\%$ : dia 1, 11/8/22**

A Figura 95 apresenta os perfis de radiação, temperaturas de entrada e saída e variação da temperatura ( $\Delta T$ ) em cada coletor ao longo do primeiro dia de testes (11/8/22).

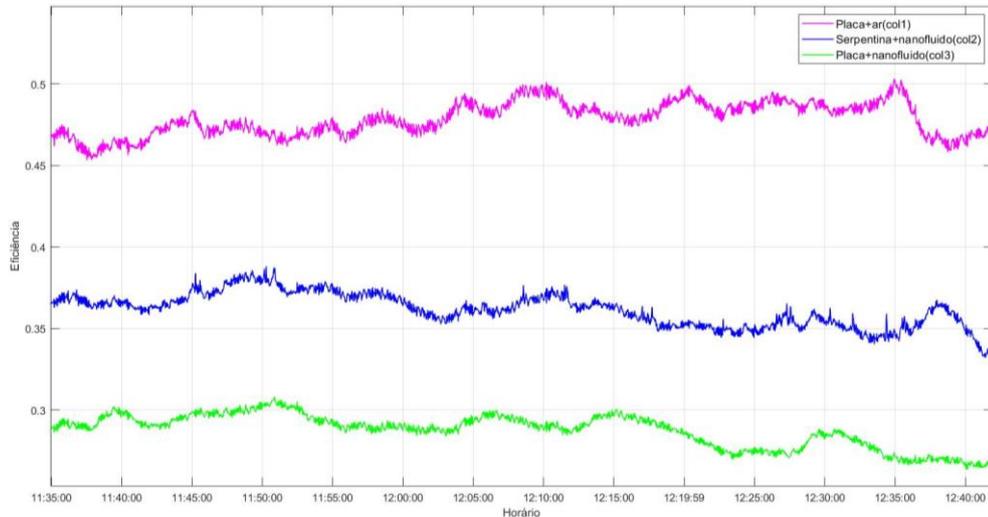
Nota-se na Figura 95 (b) que as temperaturas máximas de saída foram semelhantes para os três coletores e que o Coletor 3 (placa+nanofluido) apresentou as maiores temperaturas de entrada (" $T_{ent\_col} \cong T_{Boiler}$ ") a partir de 12:30 PM, enquanto o Coletor 1 (tradicional, placa+ar) e o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentaram valores semelhantes a partir de 13:30 PM. Observa-se também através da Figura 95 (c) que o Coletor 1 apresentou as maiores variações de temperatura ao longo de quase todo o dia, enquanto o Coletor 3, as menores.

Figura 95 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 11/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0008\%$ .



A partir dos dados de temperatura foi calculada a eficiência de cada um conforme normas e procedimentos estabelecidos na seção 3.8.3. A Figura 96 ilustra um trecho temporal representativo dos resultados do cálculo da eficiência para cada coletor nesse primeiro dia de testes. Diferentemente do observado no primeiro dia de testes com nanofluidos de maior concentração ( $\Phi_v=0,0010\%$ ), observa-se que os coletores operando com nanofluidos (Coletores 2 e 3) apresentaram eficiências menores quando comparadas com o coletor tradicional (Coletor 1), um resultado coerente com as menores variações de temperatura obtidas pelos coletores operando com nanofluidos e sua maior área de absorção de radiação.

Figura 96 – Eficiência de cada coletor para o dia 11/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0008\%$ .



### Teste na bancada 2, $\Phi_v=0,0008\%$ : dia 2, 12/8/22

Ao longo do segundo dia de testes com os nanofluidos de concentração 0,0008%, ocorreu uma visível perda de estabilidade do nanofluido presente no Coletor 3 (Figura 97), semelhante a já observada anteriormente nos testes com nanofluido mais concentrado ( $\Phi_v=0,0010\%$ ), enquanto o nanofluido presente no Coletor 2 não sofreu alterações sob inspeção visual.

Figura 97 – Foto do Coletor 3 (placa+nanofluido) no segundo dia de testes com nanofluidos MWCNT-Água ( $\Phi_v=0,0008\%$ )

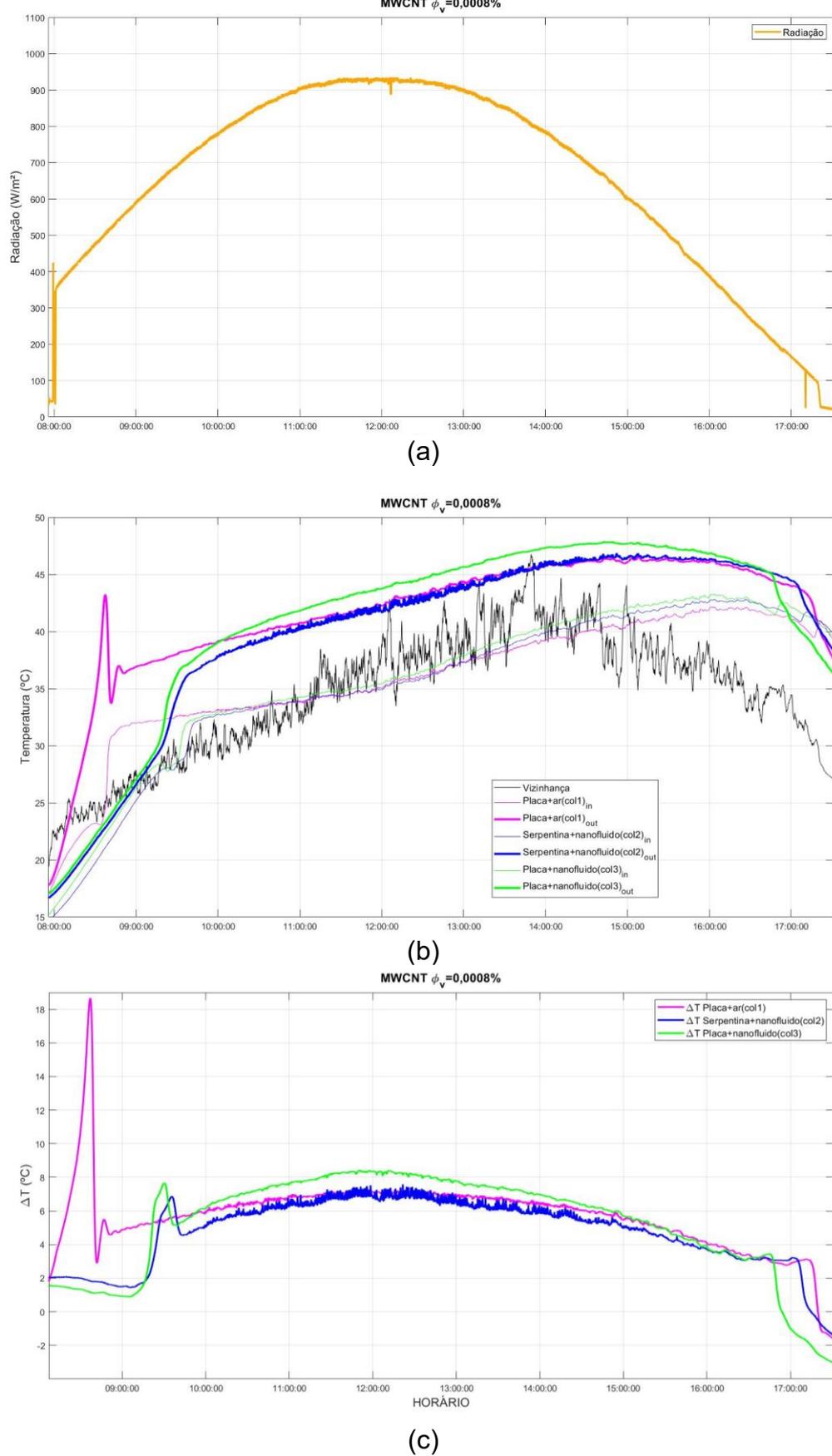


Fonte: Autoria própria (2023)

#### **Teste na bancada 2, $\Phi_v=0,0008\%$ : dia 5, 15/8/22**

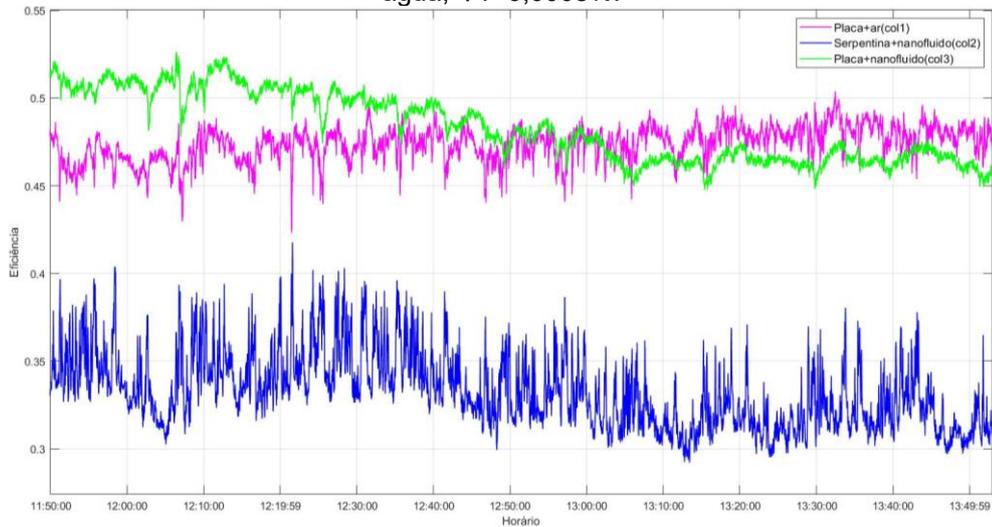
O último dia de testes (15/8/22) apresentou padrões semelhantes e representativos dos demais dias (12, 13 e 14/8/22) em termos de radiação, variações de temperatura e eficiência. Assim, a Figura 98 apresenta os perfis de radiação, temperaturas de entrada e saída e variação da temperatura ( $\Delta T$ ) em cada coletor ao longo desse dia. Observa-se na Figura 98 (a) e (b) que o Coletor 3, após a degradação da amostra de nanofluido no segundo dia de testes, apresentou resultados superiores de temperatura de entrada e saída e variação da temperatura, indicando que a deposição de nanopartículas sobre a superfície da placa possa ser responsável por um aumento na absorção de calor do coletor.

Figura 98 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 15/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0008\%$ .



Além disso, ao avaliarmos a eficiência dos coletores, conforme Figura 99, nota-se que o Coletor 3, que no primeiro dia apresentou a eficiência média mais baixa, passou a apresentar valores de eficiência mais próximas ao do Coletor 1, exibindo, inclusive, o maior valor de eficiência instantânea observado dentre os três coletores.

Figura 99 – Eficiência de cada coletor para o dia 15/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0008\%$ .



Fonte: Autoria própria (2023)

O Coletor 2, por sua vez, quando comparado ao Coletor 1, apresentou o mesmo comportamento desde o primeiro dia, figurando com menores valores de variação de temperatura e eficiência, e maior valor diário de temperatura atingida pela água do boiler ( $T_{Boiler} \cong T_{ent\_col}$ ).

### **Comparativo dos testes na bancada 2 com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ )**

Os dados coletados e calculados para os cinco dias de teste com nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) foram resumidos na Tabela 17. Destaca-se que todos os cálculos de valores máximos e médios foram realizados desconsiderando os períodos transitórios em que o efeito termossifão não está plenamente estabelecido.

Tabela 17 - Resumo dos principais parâmetros analisados nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ )

	$\eta_i$ máx	Horário $\eta_i$ máx	$\eta$ média	$\Delta T$	Horário $\Delta T$ máx	$T_{sai\_col}$ máx (°C)	Horário $T_{sai\_col}$ máx	$T_{Boiler}$ ( $T_{ent\_col}$ máx) (°C)	$G$ média (W/m <sup>2</sup> )	$T_{amb}$ (INMET)
				———— méd (°C)						Mín. Máx. Média (°C)
11/8/22	0,5033	'12:34:56'	0,4298	$\frac{8,80}{7,26}$	'12:10:23'	37,48	'15:54:40'	33,09	808,3	7,6
	0,3881	'11:50:17'	0,3139	$\frac{9,15}{7,15}$	'11:50:09'	37,38	'15:51:41'	33,27		23,7
	0,3079	'11:50:51'	0,2477	$\frac{7,98}{6,24}$	'11:50:52'	38,11	'16:13:41'	34,22		18,8
12/8/22	0,5050	'13:32:57'	0,4167	$\frac{8,01}{6,31}$	'12:01:14'	42,06	'15:27:55'	37,70	810,8	12,8
	0,3471	'13:30:44'	0,2718	$\frac{7,66}{5,75}$	'12:07:43'	42,29	'15:29:06'	38,42		27,3
	0,5323	'12:17:39'	0,3639	$\frac{9,32}{6,70}$	'12:17:32'	43,45	'15:11:54'	39,05		22,58
13/8/22	0,5148	'14:31:31'	0,4501	$\frac{7,55}{6,38}$	'12:22:18'	44,96	'15:40:36'	40,73	760,6	15,6
	0,4066	'12:40:10'	0,2960	$\frac{7,76}{5,86}$	'11:43:18'	45,43	'15:47:44'	41,61		29,8
	0,5246	'11:48:06'	0,4236	$\frac{8,73}{6,96}$	'11:53:26'	46,66	'14:31:41'	42,34		25,12
14/8/22	0,5323	'13:48:38'	0,4570	$\frac{7,41}{6,28}$	'11:53:07'	46,75	'14:47:03'	42,52	763,8	16,9
	0,4339	'12:40:35'	0,2959	$\frac{7,69}{5,72}$	'12:41:50'	47,12	'14:46:57'	43,34		28,8
	0,5377	'12:43:18'	0,4192	$\frac{8,46}{6,77}$	'11:53:34'	48,31	'14:46:50'	43,99		25,1
15/8/22	0,5234	'14:54:18'	0,4490	$\frac{7,28}{6,23}$	'11:50:39'	46,92	'15:07:45'	42,57	769,7	16,5
	0,4177	'12:21:36'	0,3004	$\frac{7,58}{5,77}$	'12:21:36'	47,40	'14:52:11'	43,29		29,4
	0,5263	'12:06:28'	0,4197	$\frac{8,43}{6,78}$	'11:50:28'	48,48	'14:48:48'	43,79		25,16

: Col1

: Col2

: Col3

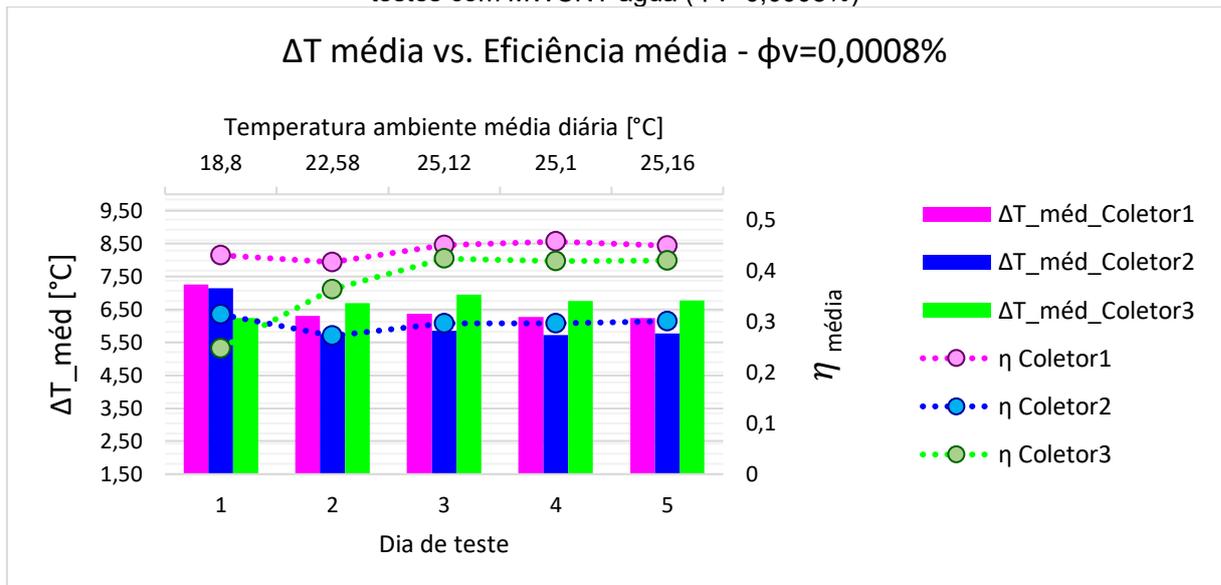
Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que as máximas variações de temperatura ocorreram em horários próximos ao meio-dia solar para todos os coletores. O Coletor 3 apresentou os menores valores de eficiência e variações de temperatura no primeiro dia de testes, no entanto, após a degradação do nanofluido presente em seu interior no segundo dia

de testes, passou a apresentar as maiores variações de temperatura e eficiências máximas dentre os três coletores. Ao avaliarmos a eficiência média, o Coletor 1 seguiu, desde o primeiro dia, exibindo o melhor desempenho, ao passo que obteve as menores temperaturas de água do boiler. Além disso, o Coletor 2 apresentou resultados de variação de temperatura média e eficiência média e máxima substancialmente inferiores aos obtidos pelo Coletor 1 em todos os dias de teste.

Os dados de variação de temperatura e eficiência médios foram destacados na Figura 100. A degradação da amostra de nanofluido presente no Coletor 3 ocorrida ao longo do segundo dia de testes coincide com o aumento da variação da temperatura e eficiência médias, o que novamente corroboraria a influência da deposição de nanopartículas na superfície da placa sobre esses parâmetros. A eficiência média e a variação da temperatura observadas no Coletor 1 mantiveram valores similares ao longo dos cinco dias de teste, variando em torno de 0,44 e 6,5°C, respectivamente. Destaca-se ainda que o Coletor 2 obteve, em média, o pior desempenho dentre os três coletores testados.

Figura 100 - Comparativo entre a variação de temperatura e a eficiência médias de cada coletor nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ )



Fonte: Autoria própria (2023)

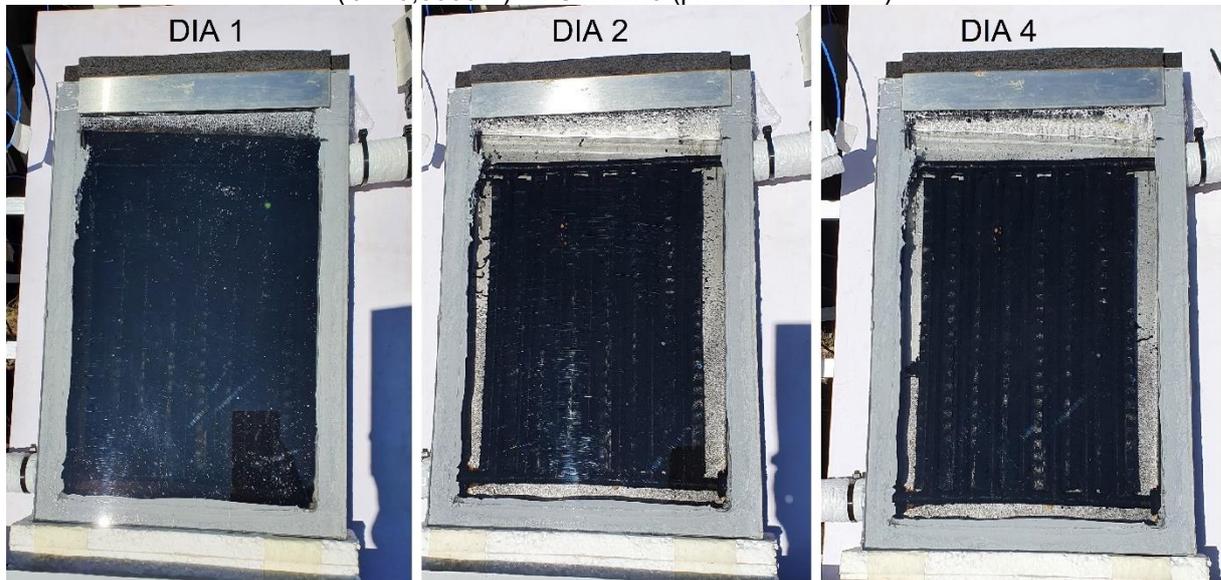
### Estabilidade das amostras MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) testados na bancada 2

De maneira semelhante ao procedimento realizado com as amostras de nanofluidos de MWCNT-água mais concentrados ( $\Phi_v=0,0010\%$ ), as amostras com

concentração volumétrica 0,0008% tiveram a estabilidade analisada através da inspeção visual diária dos coletores 2 e 3, da medição diária da absorvância do nanofluido presente na cubeta fixada junto ao coletor 1 e da medição da absorvância dos nanofluidos dos coletores 2 e 3 antes do primeiro e último dia de testes.

Através da inspeção visual dos nanofluidos ao longo dos dias de testes foi possível observar que, assim como o ocorrido nos testes com nanofluido mais concentrado ( $\Phi_v=0,0010\%$ ), apenas o nanofluido presente no Coletor 3 apresentou sinais visíveis de degradação, como ilustra a Figura 101. No entanto, a degradação da amostra de concentração 0,0008% foi visualizada mais cedo, ocorrendo de forma notável a partir do segundo dia de testes, em que aglomerações de diferentes tamanhos podiam ser visualizadas e havia intensa deposição de nanopartículas ao longo de toda a placa absorvedora.

Figura 101 - Fotos comparativas ao final dos dias 1, 2 e 4 de testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) no Coletor 3 (placa+nanofluido)



Fonte: Aatoria própria (2023)

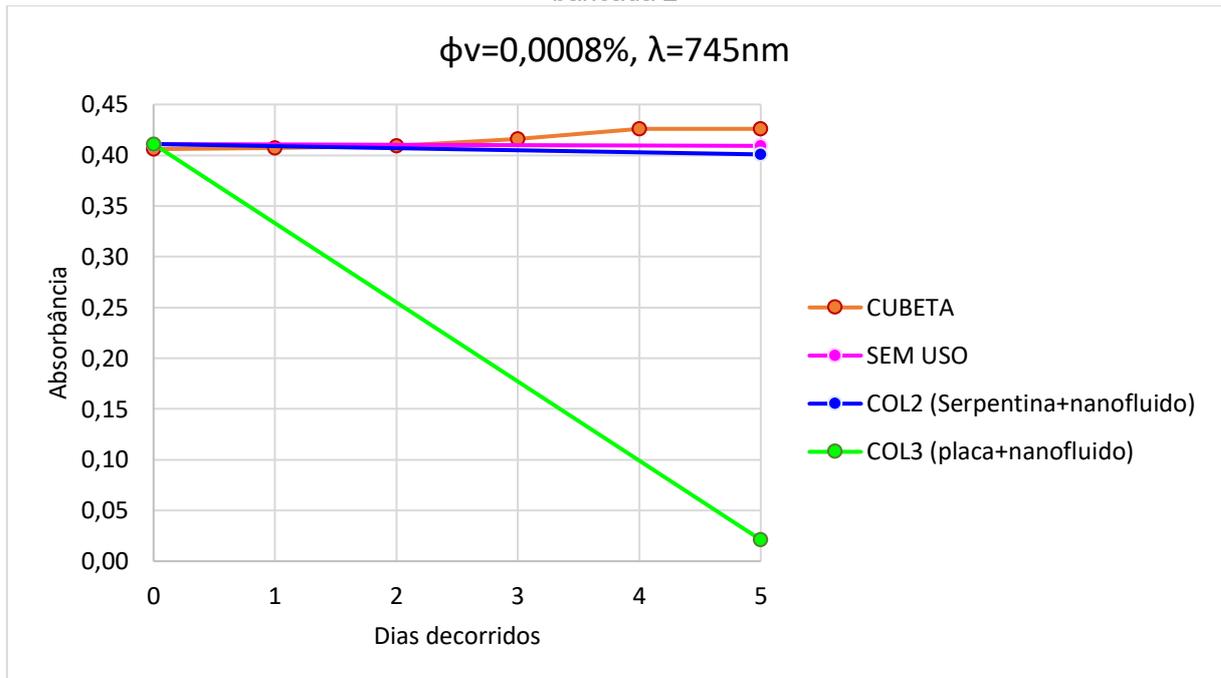
Figura 102 – Detalhes das aglomerações e deposição de nanopartículas no Coletor 3 ao fim do segundo dia de testes (12/8/22) com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ )



Fonte: Autoria própria (2023)

Corroborando o observado através da inspeção visual, a Figura 103 ilustra o resultado das medições de absorvância das amostras MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) testadas, sendo demonstrada boa estabilidade da amostra testada no Coletor 2 e na cubeta fixada junto ao Coletor 1, ao passo que a testada no Coletor 3 apresentou resultado tendendo a zero (equivalente a água pura).

Figura 103 – Variação de absorbância das amostras de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) testados na bancada 2



Fonte: Autoria própria (2023)

Ao avaliar a concentração estimada das amostras ao longo do tempo, conforme Tabela 18, nota-se novamente um pequeno aumento (<5%) para a amostra presente na cubeta fixada junto ao Coletor 1, explicável pela deposição de poeira em sua superfície. Além disso, a amostra testada no Coletor 2 obteve resultados semelhantes ao da amostra sem uso (7,81ppm vs. 7,96ppm, uma diferença inferior a 2%), enquanto a testada no Coletor 3 apresentou a pior estabilidade após os testes experimentais, com uma concentração estimada 92% menor que a da amostra não usada (0,64ppm vs. 7,96ppm).

Tabela 18 - Concentração estimada para os nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) testados na bancada 2

Amostra	$\Phi_v$ estimado pela absorbância medida (ppm)					
	Dias decorridos desde a produção					
	0	1	2	3	4	5
CUBETA	8	8,02	8,06	8,19	8,38	8,38
SEM USO	8	-	-	-	-	7,96
COL 2	8	-	-	-	-	7,81
COL 3	8	-	-	-	-	0,64

Fonte: Autoria própria (2023)

#### 4.2.5 Nanofluido de MWCNT-Água, $\Phi_v=0,0005\%$

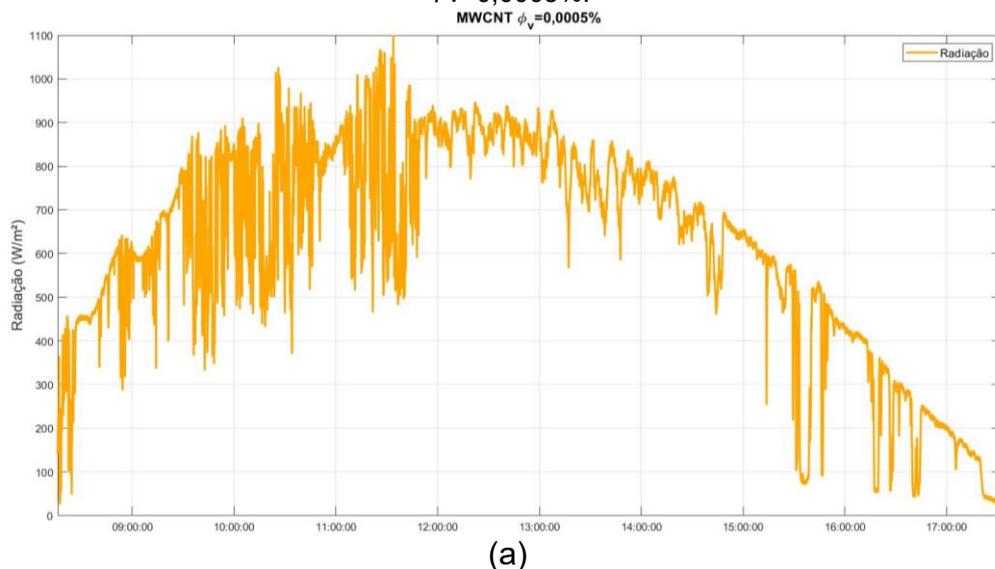
Os testes na bancada 2 utilizando nanofluidos de MWCNT em água, com concentração volumétrica de 0,0008% foram realizados nos dias 16, 17, 18, 19 e 20/8/22, tendo duração de aproximadamente 9 horas cada.

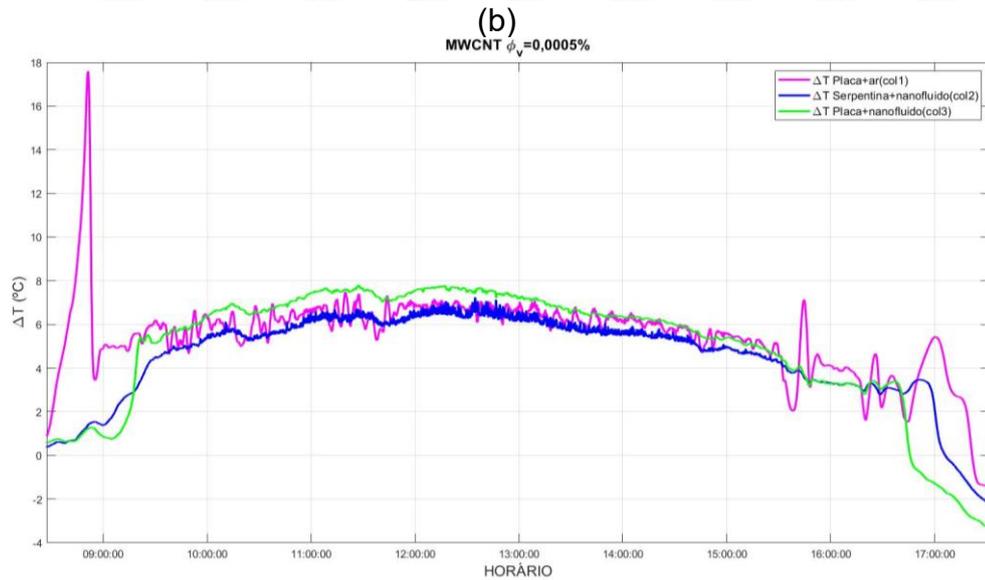
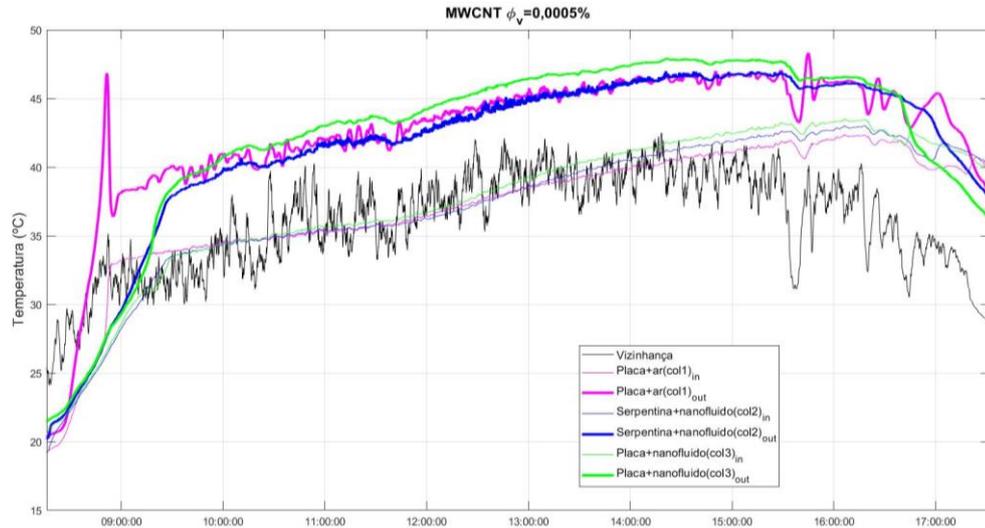
##### Teste na bancada 2, $\Phi_v=0,0005\%$ : dia 1, 11/8/22

A Figura 104 apresenta os perfis de radiação, temperaturas de entrada e saída e variação da temperatura ( $\Delta T$ ) em cada coletor ao longo do primeiro dia de testes (16/8/22).

Observa-se através da Figura 104 (a) e (c) que as oscilações na radiação incidente em razão da presença de nuvens resultaram em um perfil de variação de temperatura do Coletor 1 (tradicional, placa+ar) também oscilante (Figura 104 (c)). Nota-se que o Coletor 3 (placa+nanofluido) foi o que sofreu menor influência da variação na radiação incidente ao longo do dia, além disso, apresentou as maiores temperaturas de saída, temperatura de água do reservatório térmico ( $T_{Boiler} \cong T_{ent.col}$ ) e maior variação de temperatura ao longo de quase todo o dia. Já o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentou, em média, os menores valores de variação de temperatura dentre os três.

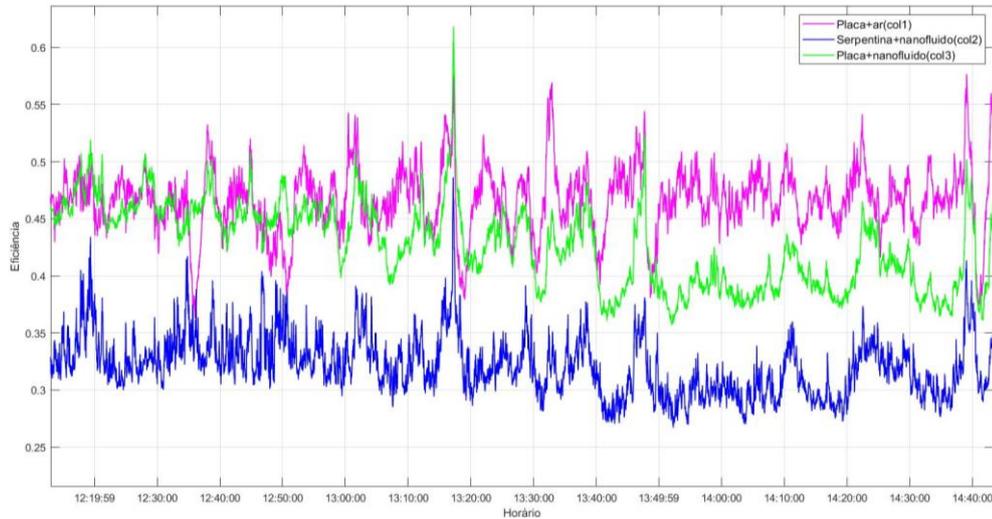
Figura 104 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 16/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0005\%$ .





Ao calcular a eficiência de cada coletor (conforme normas e procedimentos estabelecidos na seção 3.8.3) nota-se, através da Figura 105, que os coletores operando com nanofluidos (Coletor 2 e 3) apresentaram menores valores de eficiência quando comparados ao coletor tradicional (Coletor 1), sendo que o Coletor 2 apresentou o pior desempenho dentre os três.

Figura 105 – Eficiência de cada coletor para o dia 16/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0005\%$ .



De forma semelhante ao já observado nos testes com nanofluidos de concentração mais alta ( $\Phi_v=0,0010\%$  e  $\Phi_v=0,0008\%$ ), o nanofluido presente no interior do Coletor 3 (placa+nanofluido) sofreu intensa degradação, sendo o processo visível já ao longo do primeiro dia de testes, como ilustra a Figura 106.

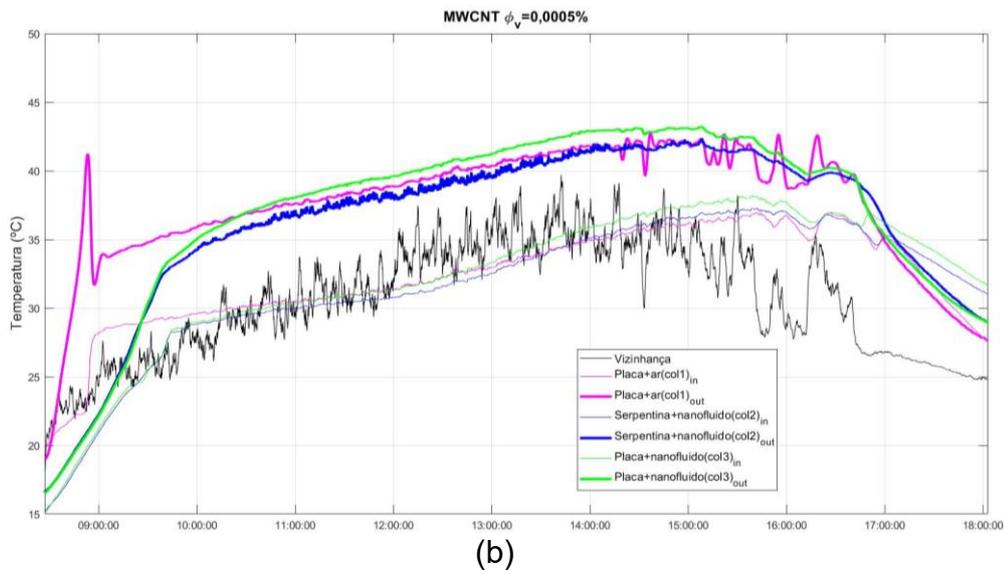
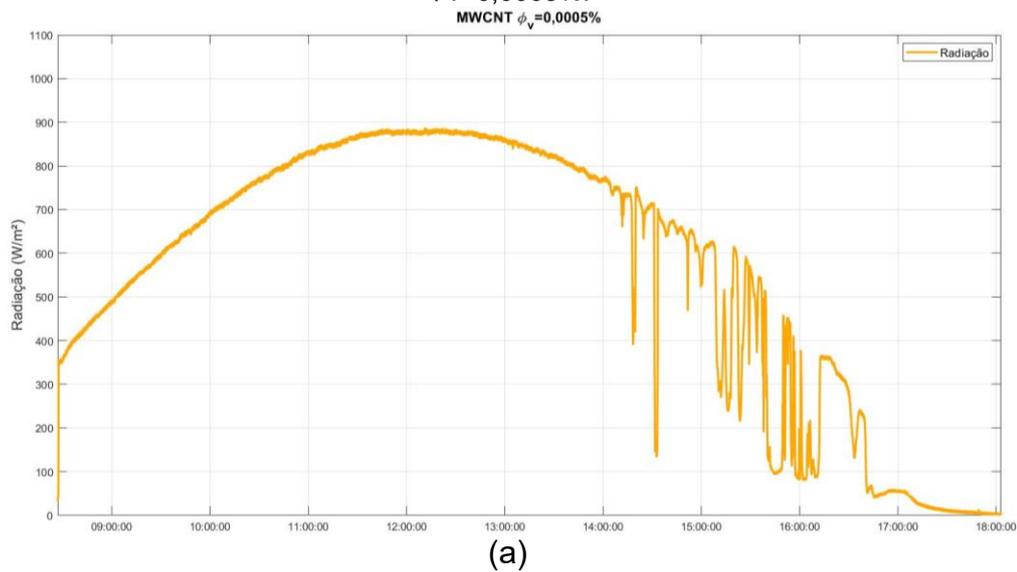
Figura 106 – Fotos comparativas ao longo do primeiro dia de testes (16/8/22) com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) no Coletor 3 (placa+nanofluido)

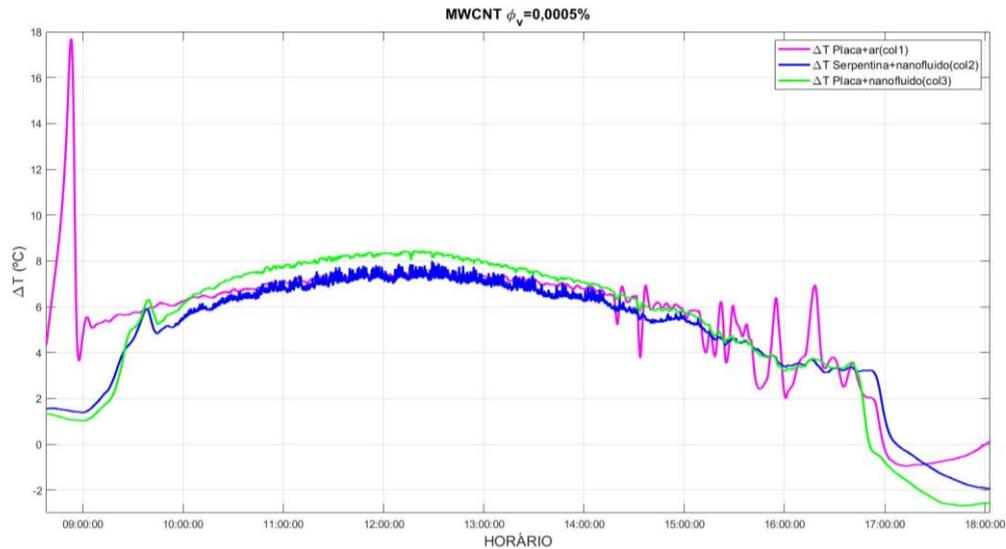


### Teste na bancada 2, $\Phi_v=0,0005\%$ : dia 5, 20/8/22

O último dia de testes (20/8/22) apresentou padrões de variação de temperatura e eficiência semelhantes aos demais dias (16, 17, 18 e 19/8/22), apenas apresentando maior estabilidade na radiação incidente no início do teste quando comparado ao primeiro dia (16/8/22).

Figura 107 – Perfis de (a) radiação, (b) temperaturas de entrada e saída e (c) variação da temperatura em cada coletor solar para o dia 20/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0005\%$ .

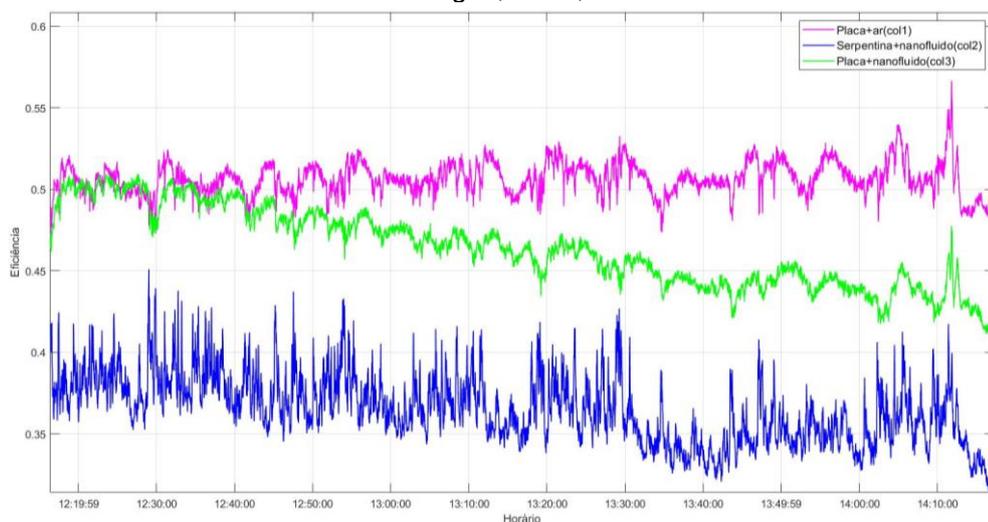




(c)

Ao avaliar a eficiência de cada coletor nota-se, através da Figura 108, que o comportamento de cada um dos coletores foi o mesmo já observado anteriormente desde o primeiro dia de testes, tendo o Coletor 1 apresentado os melhores resultados, seguido do Coletor 3 com valores intermediários e, por último, o Coletor 2 com os menores valores de eficiência.

Figura 108 – Eficiência de cada coletor para o dia 20/8/22 - Etapa de testes com nanofluidos MWCNT-água,  $\Phi_v=0,0005\%$ .



A degradação da amostra presente no Coletor 3 (placa+nanofluido) ocorreu de forma bem mais rápida que o observado nos dias de teste com nanofluidos de concentrações mais altas ( $\Phi_v=0,0010\%$  e  $\Phi_v=0,0008\%$ ), não tendo havido diferenças

notáveis de comportamento dos parâmetros analisados entre os cinco dias de teste que pudessem ser associadas à perda de estabilidade do nanofluido.

### Comparativo dos testes na bancada 2 com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ )

Os dados coletados e calculados para os cinco dias de teste com nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) foram resumidos na Tabela 19.

Tabela 19 - Resumo dos principais parâmetros analisados nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ )

	$\eta_i$ máx	Horário $\eta_i$ máx	$\eta$ média	$\Delta T$ máx — méd (°C)	Horário $\Delta T$ máx	$T_{sai\_col}$ máx (°C)	Horário $T_{sai\_col}$ máx	$T_{Boiler}$ ( $T_{ent\_col}$ máx) (°C)	$G$ média (W/m <sup>2</sup> )	$T_{amb}$ (INMET) Mín. Máx. Média (°C)
16/8/22	0,5766	'14:39:05'	0,4612	7,16 6,14	'12:11:09'	47,40	'15:44:59'	42,77	755,5	19,6
	0,4341	'12:19:23'	0,3134	7,24 5,72	'12:34:39'	47,52	'14:21:01'	43,49		31,1
	0,5236	'13:47:45'	0,4117	7,78 6,50	'12:16:59'	48,53	'14:21:05'	44,04		27,22
17/8/22	0,5489	'12:13:14'	0,4605	7,38 6,51	'11:44:25'	51,53	'16:44:21'	44,65	816,2	21,7
	0,4621	'12:17:01'	0,3317	7,49 6,33	'11:26:25'	49,56	'14:31:53'	44,02		32,5
	0,5420	'12:15:56'	0,4353	8,05 7,16	'11:28:07'	50,33	'14:33:02'	44,66		28,68
18/8/22	0,5545	'14:17:50'	0,4728	7,36 6,22	'12:21:07'	48,30	'14:11:03'	43,91	755,6	20,9
	0,4594	'12:14:06'	0,3406	7,75 5,98	'12:14:06'	49,00	'14:48:46'	44,36		32,1
	0,4973	'11:45:21'	0,4082	8,05 6,51	'11:45:30'	49,53	'14:35:13'	44,79		28,11
19/8/22	0,5147	'13:54:09'	0,4814	7,43 6,98	'11:48:59'	46,43	'09:35:22'	38,64	847,4	14,6
	0,4112	'13:05:53'	0,3432	7,29 6,69	'13:05:53'	43,40	'15:10:00'	38,61		24,5
	0,4702	'13:19:22'	0,4414	7,72 7,51	'12:09:28'	44,30	'14:32:08'	39,15		20,36
20/8/22	0,5397	'14:04:59'	0,4770	7,60 7,06	'12:18:48'	43,18	'14:36:52'	37,42	823,5	14,8
	0,4510	'12:29:01'	0,3441	7,99 6,83	'12:29:01'	42,97	'15:08:15'	37,80		27,8
	0,5094	'12:27:39'	0,4457	8,45 7,68	'12:18:44'	43,87	'15:07:57'	38,79		23,39

: Col1

: Col2

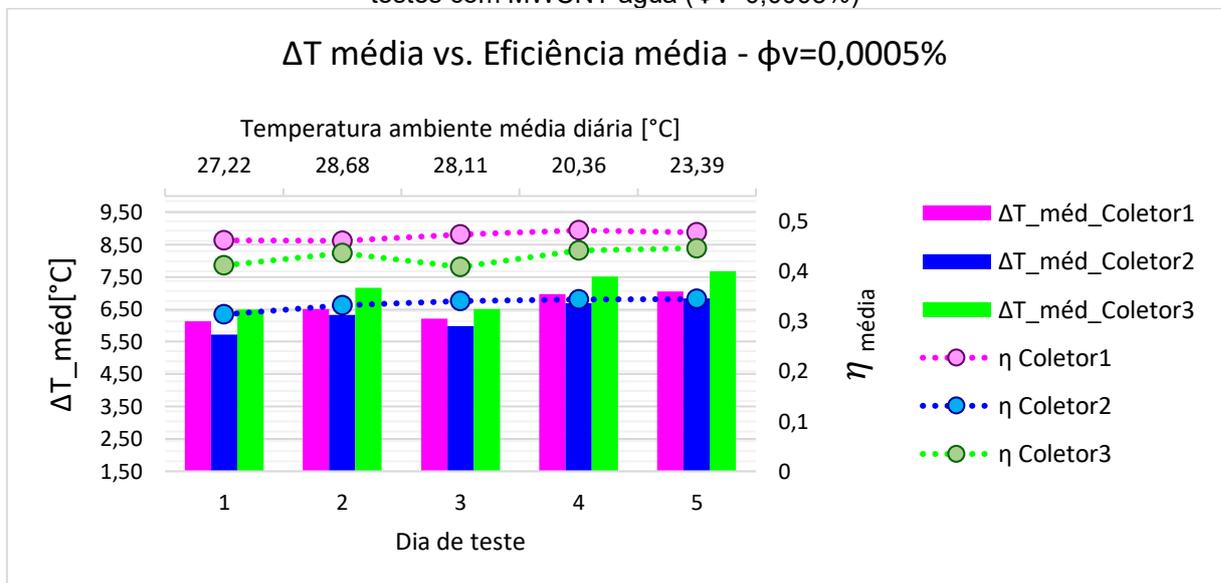
: Col3

Novamente, os períodos transitórios em que o efeito termossifão não está plenamente estabelecido foram desconsiderados nos cálculos.

Observa-se que os pontos de máxima variação de temperatura dos coletores operando com nanofluidos foram superiores aos do Coletor 1, sendo do Coletor 3 os melhores resultados.

Como ilustra a Figura 109, o Coletor 2 apresentou as menores médias de variações de temperatura, enquanto o Coletor 3, as maiores, por outro lado, analisando os valores de eficiência máxima e média nota-se que, em todos os dias de teste o Coletor 1 foi o com melhores resultados, seguido do Coletor 3 e, por último, o Coletor 2. Avaliando o Coletor 1, notam-se valores de eficiência média estáveis ao longo dos cinco dias de teste, variando em torno de 0,47.

Figura 109 - Comparativo entre a variação de temperatura e a eficiência médias de cada coletor nos testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ )



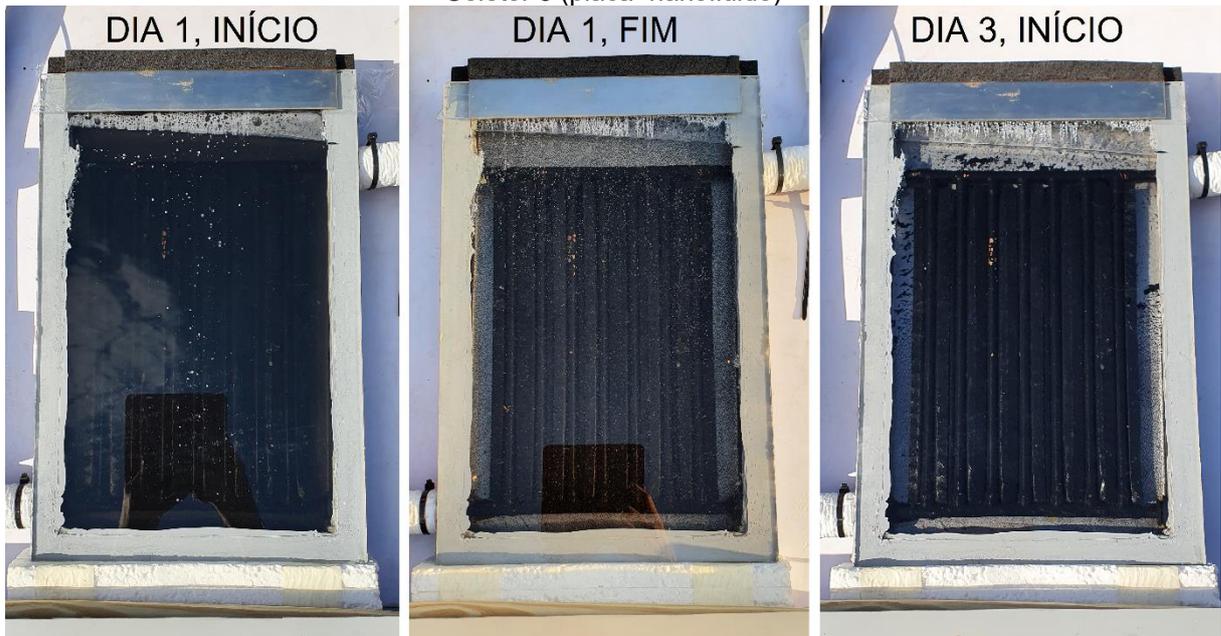
Fonte: Autoria própria (2023)

### **Estabilidade das amostras MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) testados na bancada 2**

A estabilidade das amostras foi avaliada através do mesmo procedimento anteriormente adotado para as amostras de MWCNT-água mais concentradas ( $\Phi_v=0,0010\%$  e  $\Phi_v=0,0008\%$ ): inspeção visual diária dos coletores 2 e 3, medição diária da absorvância do nanofluido presente na cubeta fixada junto ao Coletor 1 e medição da absorvância dos nanofluidos dos coletores 2 e 3 antes do primeiro e último dia de testes.

A inspeção visual das amostras revelou uma boa estabilidade do nanofluido presente no Coletor 2, em contrapartida, o Coletor 3 apresentou o mesmo padrão de degradação da amostra já observado nas etapas anteriores utilizando os nanofluidos mais concentrados. Nessa etapa, a perda de estabilidade foi notada ainda mais rapidamente, sendo visível já ao final do primeiro dia de testes, como ilustra a Figura 110.

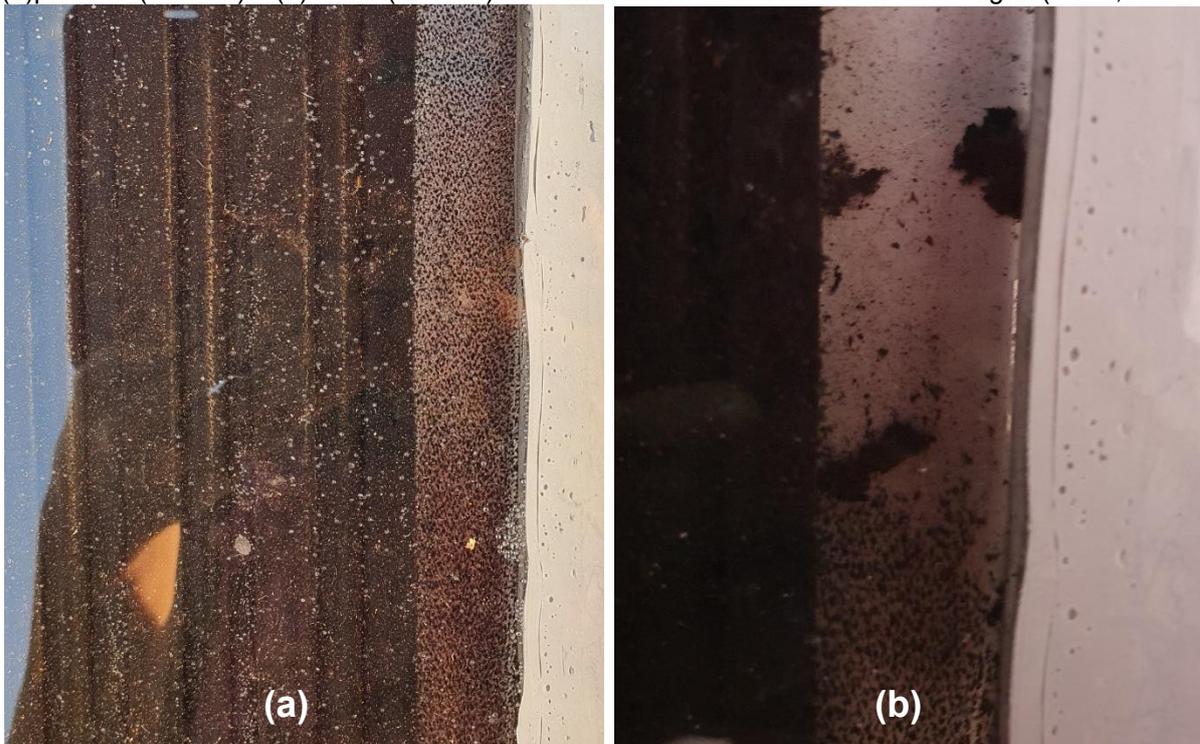
Figura 110 - Fotos comparativas ao longo de três dias de testes com MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) no Coletor 3 (placa+nanofluido)



Fonte: Autoria própria (2023)

Nota-se, através da Figura 111, o detalhe das aglomerações e deposições de nanopartículas que eram visíveis desde o final do primeiro dia de testes (Figura 111(a)) e se tornaram maiores ao final dos cinco dias de teste (Figura 111(b)).

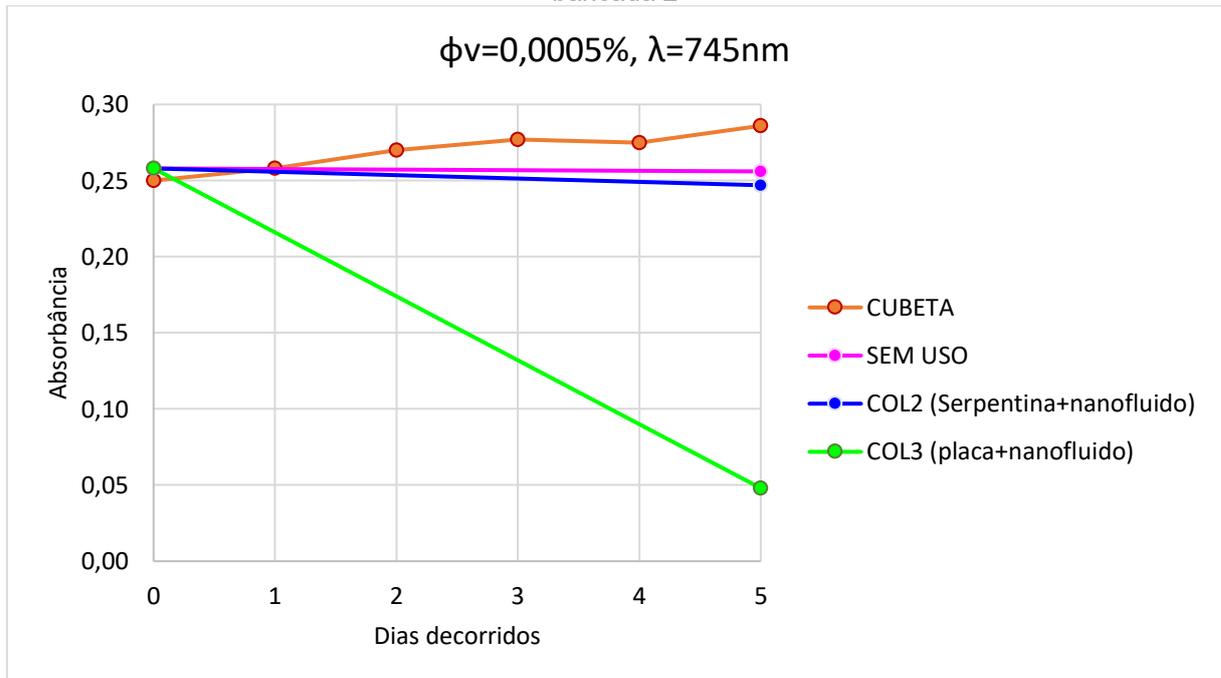
Figura 111 - Detalhes das aglomerações e deposição de nanopartículas no Coletor 3 ao final do (a) primeiro (16/8/22) e (b) último (20/8/22) dia de testes com nanofluidos MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ )



Fonte: Autoria própria (2023)

O resultado das medições de absorvância das amostras mais uma vez corroborou a inspeção visual. A Figura 112 apresenta o resultado para as amostras MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) avaliadas. Nota-se boa estabilidade da amostra testada no Coletor 2, enquanto a testada no Coletor 3 demonstrou uma grande perda de estabilidade.

Figura 112 – Variação de absorbância das amostras de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) testados na bancada 2



Fonte: Autoria própria (2023)

A concentração estimada das amostras ao longo do tempo, como apresentado na Tabela 20, demonstra que a cubeta fixada junto ao Coletor 1 apresentou um aumento na absorbância de quase 14% no quinto dia de testes, sugerindo que, além da influência da poeira superficial depositada na cubeta, essa amostra possa ter sofrido degradação ao ser exposta à radiação solar. Avaliando a amostra proveniente do Coletor 2, observa-se resultados semelhantes ao da amostra sem uso (4,80ppm vs. 4,96ppm), com uma diferença inferior a 4%, enquanto a do Coletor 3 exibiu uma concentração estimada 77% menor que a da amostra não usada (1,12ppm vs. 4,96ppm).

Tabela 20 - Concentração estimada para os nanofluidos de MWCNT-água ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) testados na bancada 2

Amostra	$\Phi_v$ estimado pela absorbância medida (ppm)					
	Dias decorridos desde a produção					
	0	1	2	3	4	5
CUBETA	5	5,15	5,38	5,51	5,48	5,69
SEM USO	5	-	-	-	-	4,96
COL 2	5	-	-	-	-	4,80
COL 3	5	-	-	-	-	1,12

Fonte: Autoria própria (2023)

#### 4.2.6 Comparativo entre diferentes nanofluidos MWCNT-Água ( $\Phi_v=0,0010\%$ , $\Phi_v=0,0008\%$ e $\Phi_v=0,0005\%$ )

##### Médias de variação de temperatura e eficiências

Após a análise individual dos resultados de cada uma das três etapas de testes com nanofluidos MWCNT-Água de diferentes concentrações volumétricas na bancada 2 e tendo por objetivo avaliar comparativamente o comportamento de cada concentração testada, foi realizado o cálculo das médias de variação de temperatura e eficiências considerando todos os dias de teste de cada etapa.

Cabe lembrar que, na primeira etapa de testes ( $\Phi_v=0,0010\%$ ), apenas os três primeiros dias de teste apresentaram condições de teste que satisfizessem a norma ABNT NBR 17003 (2021), sendo assim, apenas os dias 5, 6 e 7/8/22 foram computados no cálculo das médias do nanofluido com concentração volumétrica 0,0010%. Nas demais etapas, foram computados todos os cinco dias, sendo eles: dias 11, 12, 13, 14 e 15/8/22, do nanofluido com concentração volumétrica 0,0008%; dias 16, 17, 18, 19 e 20/8/22, do nanofluido com concentração volumétrica 0,0005%.

Os valores obtidos nos cálculos das médias das variações de temperatura e eficiências médias para cada etapa de testes na bancada 2 são apresentados na Tabela 21. Além disso, a Figura 113 ilustra os valores calculados, além da média da temperatura ambiente e da radiação incidente nos dias de teste avaliados.

Tabela 21 - Variações de temperatura e eficiências médias de cada etapa de testes na bancada 2 ( $\Phi_v=0,0010\%$ ,  $\Phi_v=0,0008\%$  e  $\Phi_v=0,0005\%$ )

$\phi_v$	$\eta$ média	$\Delta T$ méd (°C)
0,0010%	0,4719 ± 0,0116	6,49 ± 0,12
	0,4348 ± 0,0568	7,19 ± 0,24
	0,4554 ± 0,0620	7,21 ± 0,27
0,0008%	0,4405 ± 0,0167	6,49 ± 0,43
	0,2956 ± 0,0152	6,05 ± 0,61
	0,3748 ± 0,0752	6,69 ± 0,27
0,0005%	0,4706 ± 0,0094	6,58 ± 0,42
	0,3346 ± 0,0128	6,31 ± 0,47
	0,4284 ± 0,0173	7,07 ± 0,55

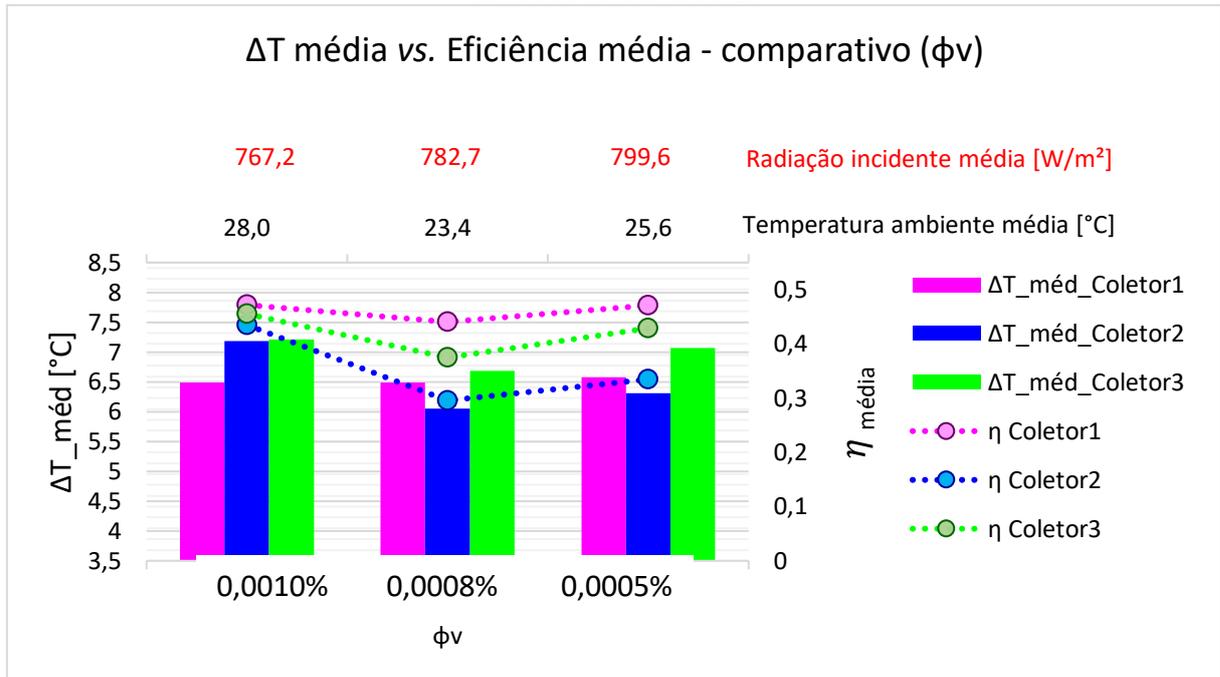
 : Col1

 : Col2

 : Col3

Fonte: Autoria própria (2023)

Figura 113 - Comparativo das variações de temperatura, eficiências médias, radiação incidente e temperatura ambiente médias para as diferentes concentrações de nanofluidos de MWCNT-água testados na bancada 2.



Fonte: Autoria própria (2023)

Observa-se que o Coletor 1 (placa+ar) apresentou valores de variação de temperatura média muito similares ao longo das três etapas de testes, em torno de  $6,5^{\circ}C$ , enquanto a eficiência média apresentou valores próximos a 0,47 na primeira e terceira etapas de testes e uma pequena queda na segunda etapa, registrando média de 0,44, queda essa que se correlaciona com as baixas temperaturas observadas nesse período de testes, que resulta em menores vazões mássicas pelo efeito termossifão (a vazão mássica, conforme exposto na Seção 3.8.1, é função da temperatura nos pontos de entrada e saída de água no coletor).

O Coletor 2 (serpentina+nanofluido), por sua vez, apresentou a pior eficiência nas três etapas de testes, obtendo também as médias de variação de temperatura mais baixa quando testado com nanofluidos de concentrações 0,0008% e 0,0005%.

Analisando o desempenho do Coletor 3 (placa+nanofluido) nota-se que esse apresentou valores de eficiência intermediárias, mas ainda sendo menores que as do coletor tradicional (Coletor 1).

Nota-se também que, comparando-se as três etapas de teste, o Coletor 2 e Coletor 3 apresentaram os piores desempenhos quando testados com nanofluido de concentração 0,0008%. Esse resultado é uma evidência de que as parcelas de contribuição do nanofluido como meio de conversão fototérmica e como fluido de

transferência de calor por convecção são dependentes da quantidade de nanopartículas presentes no fluido base, no entanto, sofrem influência da concentração em proporções diferentes em cada um dos dois processos (radiação vs. convecção), dessa maneira, o resultado da combinação desses efeitos apresentou o pior desempenho na concentração intermediária ensaiada ( $\Phi_v=0,0008\%$ ).

Ressalta-se que, dos parâmetros analisados até aqui neste trabalho, a eficiência é o único que considera a maior área de absorção de radiação resultante do preenchimento da cavidade do coletor com nanofluidos, assim, apesar da menor eficiência demonstrada, ao se observar médias das variações de temperatura superiores para os coletores operando com nanofluidos, seria possível supor que esses fossem responsáveis por uma maior troca de calor ao longo do dia todo, para avaliar tal hipótese, calcula-se o acumulado de toda a energia útil transferida à água do reservatório ao longo de um dia de testes. Assim, sabendo que a taxa de energia útil instantânea “ $E_i$ ” transferida em um instante de tempo “ $i$ ”, é expressa por:

$$\dot{E}_i(t) = \dot{m}_i c_p \Delta T_i \quad (23)$$

Ainda, considerando que a energia útil instantânea transferida num intervalo de tempo “ $\Delta t$ ” seria dada por:

$$E_i(t) = (\dot{m}_i c_p \Delta T_i) \times \Delta t \quad (24)$$

Considerando também que o intervalo de tempo analisado seja o da taxa de aquisição de dados, ou seja,  $\Delta t = 1s$ , o acumulado da energia útil ( $E_{total}$ ) transferida até um instante de tempo “ $t$ ” poderia ser obtida pelo somatório dessa variável, como se segue:

$$E_{total}(t) = \sum_{i=0}^t (\dot{m}_i c_p \Delta T_i) \times 1 \quad (25)$$

Por último, considerando-se a área de absorção de cada coletor ( $A_{col}$ ), obter-se-ia o acumulado da energia útil específica (energia/área) até um instante de tempo “ $t$ ”:

$$E_{total\,específica}(t) = \sum_{i=0}^t \frac{\dot{m}_i c_p \Delta T_i}{A_{col}} \quad (26)$$

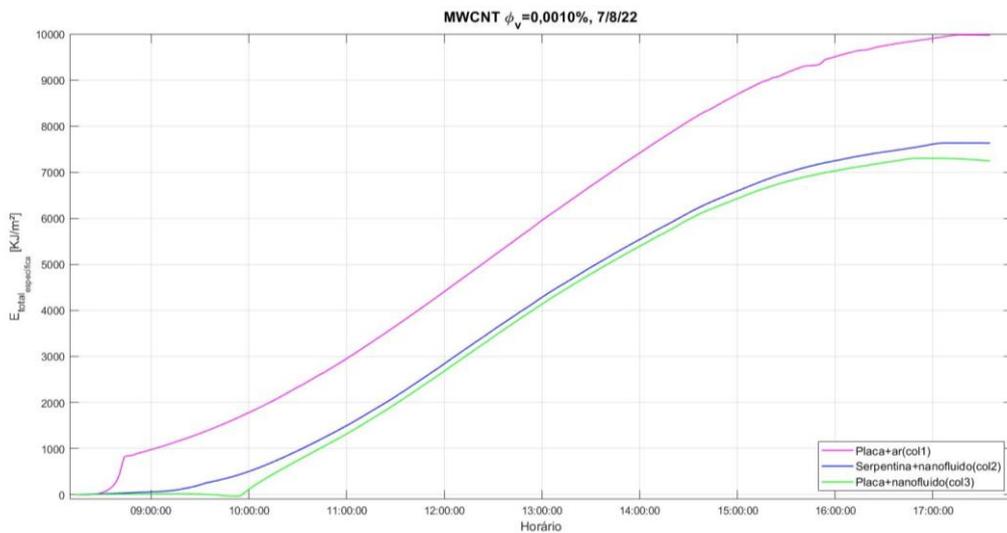
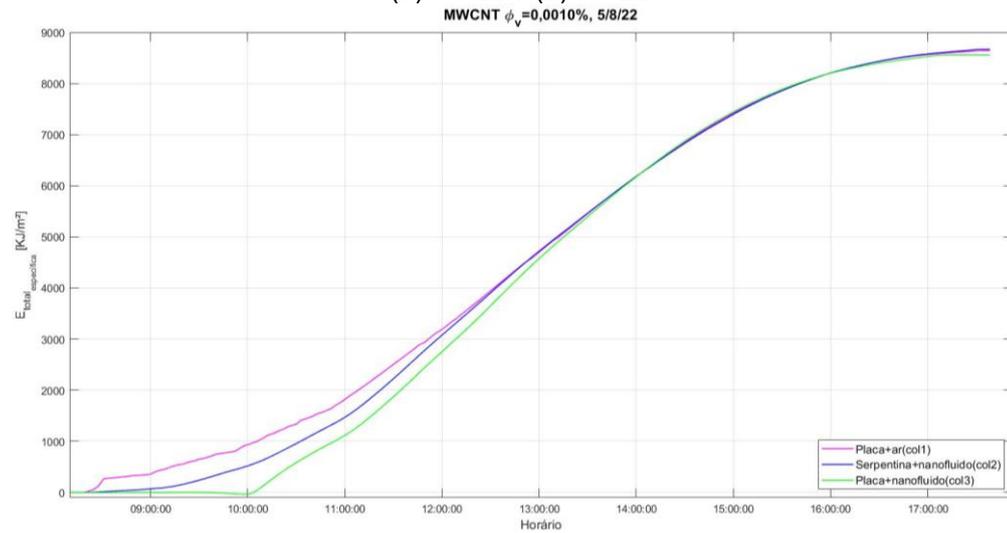
Avaliando, então, os dados de variação de temperatura entre a entrada e saída dos coletores nos testes realizados na bancada 2 tendo por base a Equação (26), obtém-se resultados como apresentam a Figura 114, Figura 115 e Figura 116, para as fases de testes com nanofluidos de concentrações volumétricas 0,0010%, 0,0008% e 0,0005%, respectivamente.

Nota-se que, em todos os dias de teste, o Coletor 1 (placa+ar) foi o que apresentou ganhos de calor mais rápidos dentre os três testados, demonstrando a influência negativa da maior inércia térmica inerente ao preenchimento do interior do Coletores 2 (serpentina+nanofluido) e Coletor 3 (placa+nanofluido) com um líquido, ou seja, para que a água proveniente do boiler que circula pelas serpentinas de aquecimento experimente uma variação de temperatura positiva, é necessário que, antes, o fluido de preenchimento do coletor também tenha sido aquecido pela radiação incidente.

Destaca-se ainda que, nessa análise, o primeiro dia de testes com nanofluidos de concentração  $\Phi_v=0,0010\%$  (5/8/22, Figura 114(a)) foi o único dentre todos a apresentar um resultado equiparado de energia total específica comparando-se o coletor tradicional (Coletor 1) e os coletores modificados para uso com nanofluidos (Coletor 2 e Coletor 3), enquanto em todos os demais dias de teste os coletores modificados apresentaram resultados inferiores ao do coletor tradicional.

A Figura 114(b) ilustra o resultado do terceiro dia de testes com nanofluidos de concentração  $\Phi_v=0,0010\%$  como meio de conversão fototérmica. O resultado obtido apresentou padrões semelhantes aos demais dias de teste, em que os coletores modificados (Coletor 2 e Coletor 3) apresentaram resultados próximos entre si e substancialmente inferiores ao do coletor tradicional (Coletor 1).

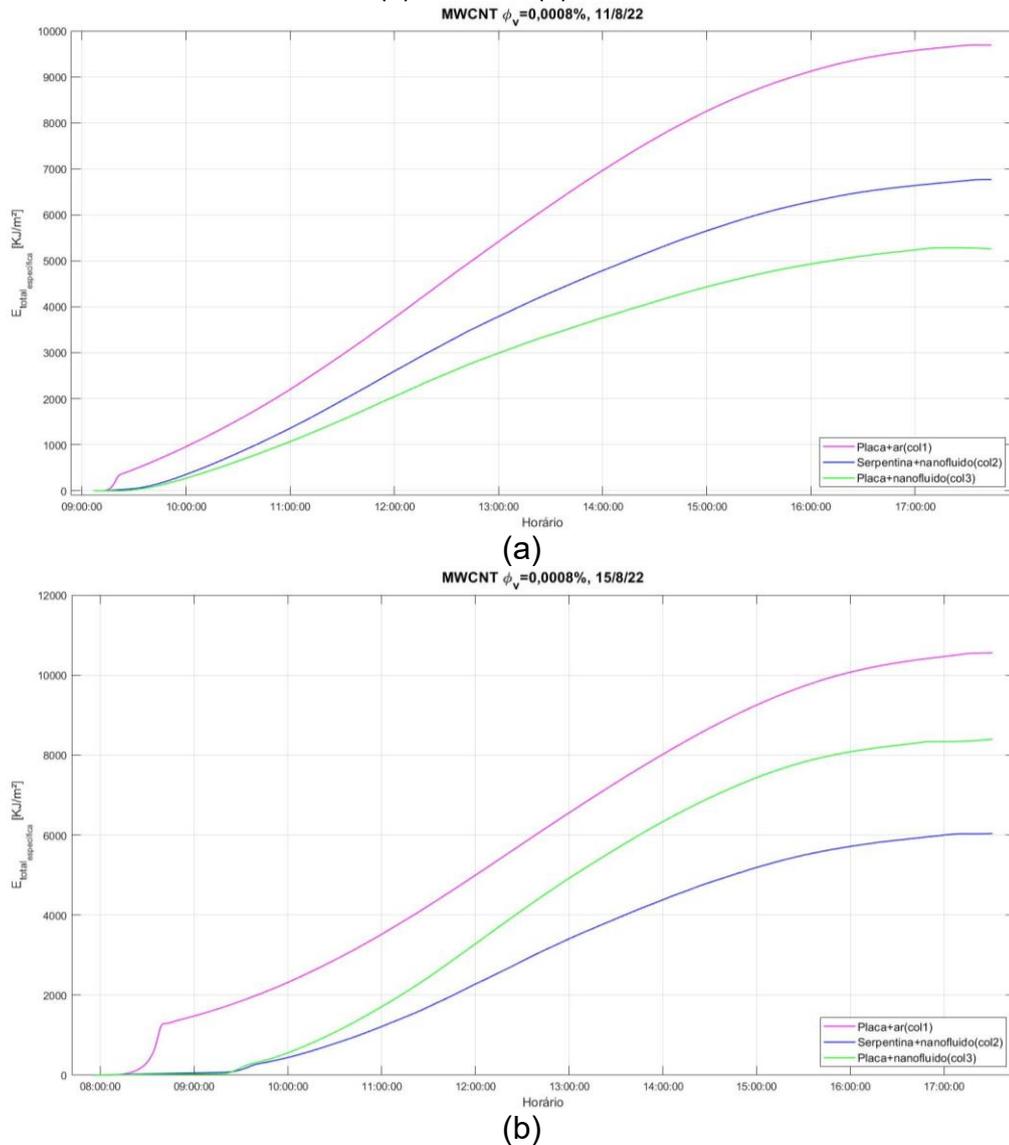
Figura 114 – Energia total específica em dias de testes com nanofluidos MWCNT-água  $\Phi_v=0,0010\%$  (a) 5/8/22 e (b) 7/8/22



Fonte: Autoria própria (2023)

O resultado obtido para a energia total específica no primeiro dia de testes com nanofluidos de concentração  $\Phi_v=0,0008\%$ , apresentado na Figura 115(a), demonstra que o ganho de calor ocorre de forma diferente para cada coletor, sendo possível observar, inclusive, uma perda de calor ( $E_{total\_especifica}$  negativa) no caso do Coletor 3 por quase duas horas do início dos testes, sendo tal comportamento explicado pelos períodos de variação de temperatura negativa previamente expostos na Seção 4.2.3.

Figura 115 – Energia total específica em dias de testes com nanofluidos MWCNT-água  $\Phi_v=0,0008\%$   
(a) 11/8/22 e (b) 15/8/22



Fonte: Autoria própria (2023)

Semelhantemente ao observado anteriormente com nanofluido de maior concentração no Coletor 3, a energia total específica no primeiro dia de testes com nanofluidos de concentração  $\Phi_v=0,0008\%$ , apresentado na Figura 115(a), demonstra uma perda de calor ( $E_{total\_especifica}$  negativa) no Coletor 3 no início dos testes.

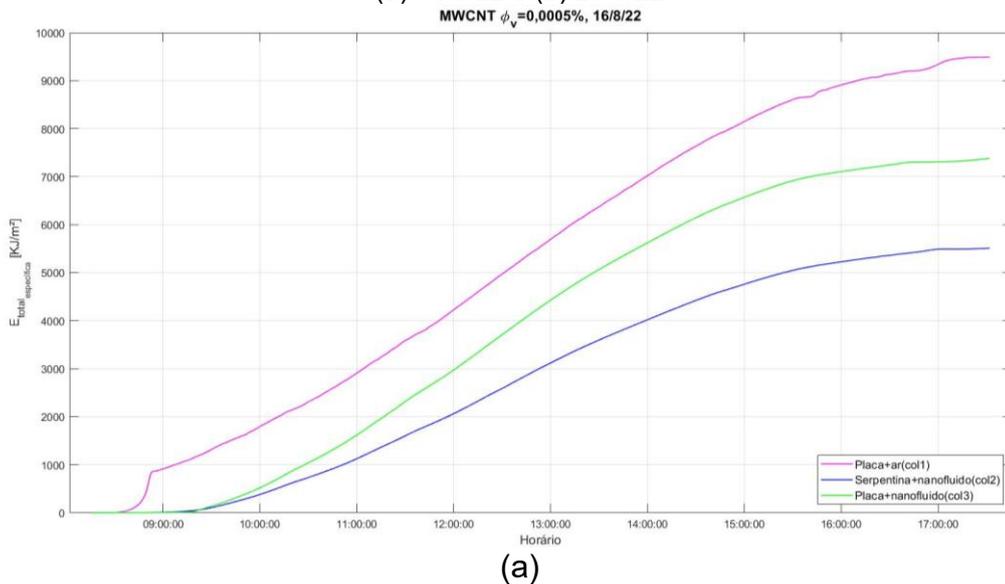
Nessa segunda etapa de testes, os valores de energia total específica obtidos pelos coletores modificados testados não foram semelhantes, além disso, apenas no primeiro dia de testes (Figura 115(a), 11/8/22) o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentou resultados superiores ao Coletor 3 (placa+nanofluido), corroborando o comportamento da média de variação da temperatura previamente observado (Tabela

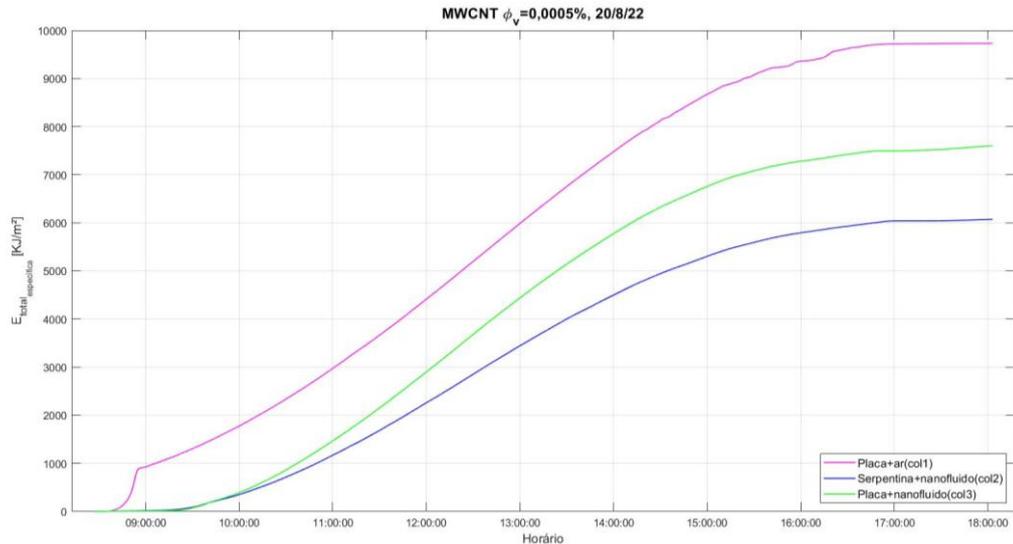
17 e Figura 100, da Seção 4.2.4), sendo que, nos demais dias, o comportamento observado seguiu o padrão exposto na Figura 115(b).

Cabe lembrar que, no segundo dia de testes, a degradação da amostra presente no interior do Coletor 3 era visível e que, conforme discutido na Seção 4.2.4, a deposição de nanopartículas sobre a superfície da placa possa ser responsável por um aumento na absorção de calor do coletor, resultando em maiores médias de variação da temperatura e na maior energia total específica observadas a partir do segundo dia de testes.

Ressalta-se que o resultado do último dia de testes exposto na Figura 115(b) foi representativo dos demais dias de testes com nanofluidos de concentração  $\Phi_v=0,0008\%$  (12, 13 e 14/8/22), nos quais o Coletor 3 apresentou resultados superiores ao Coletor 2.

Figura 116 – Energia total específica em dias de testes com nanofluidos MWCNT-água  $\Phi_v=0,0005\%$  (a) 16/8/22 e (b) 20/8/22





(b)

Fonte: Autoria própria (2023)

Os resultados de energia total específica obtidos para os nanofluidos de menor concentração ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) apresentados na Figura 116 (a) e (b) demonstram um padrão que se manteve semelhante do primeiro (16/8/22) ao último dia (20/8/22) de testes, sendo o Coletor 1 (placa+ar) o com melhores resultados, seguido do Coletor 3 (placa+nanofluido) e, por último, o Coletor 2 (serpentina+nanofluido).

É importante destacar que, nessa terceira etapa de testes (amostras de nanofluido com  $\Phi_v=0,0005\%$ ), o nanofluido presente no interior do Coletor 3 apresentou sinais de degradação desde o primeiro dia em que foi testado, o que justificaria a semelhança entre os resultados obtidos nos cinco dias de teste.

Por fim, através da análise conjunta dos resultados de energia total específica em paralelo aos das médias das variações de temperatura e eficiências médias para todas as etapas de testes na bancada 2, nota-se que, apesar dos resultados superiores de média de variação de temperatura observados na Figura 113 para ambos os coletores modificados (Coletor 2 e 3) na primeira etapa de testes (amostras de nanofluido com  $\Phi_v=0,0010\%$ ) e para o Coletor 3 na segunda ( $\Phi_v=0,0008\%$ ) e terceira etapas ( $\Phi_v=0,0005\%$ ), a energia total específica demonstrou que os coletores modificados conseguiram atingir, no melhor cenário (o primeiro dia de testes com nanofluidos de concentração  $\Phi_v=0,0010\%$ , em 5/8/22), resultados semelhantes aos do coletor tradicional. Desta maneira, divergindo da hipótese inicial, o uso de nanofluidos nos coletores solares de placa plana modificados para absorção direta resultou em uma eficiência média menor e um ganho de energia total que, no máximo,

se equiparou ao do modelo tradicional ao se considerar a área maior de absorção proporcionada pelo preenchimento dos coletores com nanofluidos.

### Estabilidade das amostras MWCNT-água testados na bancada 2

A avaliação comparativa da estabilidade das amostras testadas nas três etapas foi realizada e resumida na Tabela 22. Nota-se que cada concentração de nanofluido teve um comportamento de degradação diferente diante da exposição solar e uso em cada coletor.

Tabela 22 – Variação percentual da concentração volumétrica estimada pela absorbância em cada etapa de testes ( $\Phi_v=0,0010\%$ ,  $\Phi_v=0,0008\%$  e  $\Phi_v=0,0005\%$ )

Amostras avaliadas	Variação da concentração volumétrica estimada pela absorbância		
	Concentração volumétrica MWCNT-Água		
	$\Phi_v=0,0010\%$	$\Phi_v=0,0008\%$	$\Phi_v=0,0005\%$
CUBETA Dia 5 vs. Dia 1	+3,27%	+4,78%	+13,70%
COL 2 (Dia 5) vs. SEM USO (Dia 5)	-1,00%	-1,91%	-3,30%
COL 3 (Dia 5) vs. SEM USO (Dia 5)	-93,06%	-92,01%	-77,40%

Fonte: Autoria própria (2023)

No caso das amostras expostas à radiação na cubeta fixada junto ao Coletor 1 o nanofluido de menor concentração volumétrica testado ( $\Phi_v=0,0005\%$ ) foi o que apresentou maior variação percentual na absorbância medida entre o primeiro e último dia de testes, com um aumento na absorbância de quase 14%, demonstrando que, para essa amostra, a exposição à radiação de forma isolada teve um importante papel na degradação da amostra.

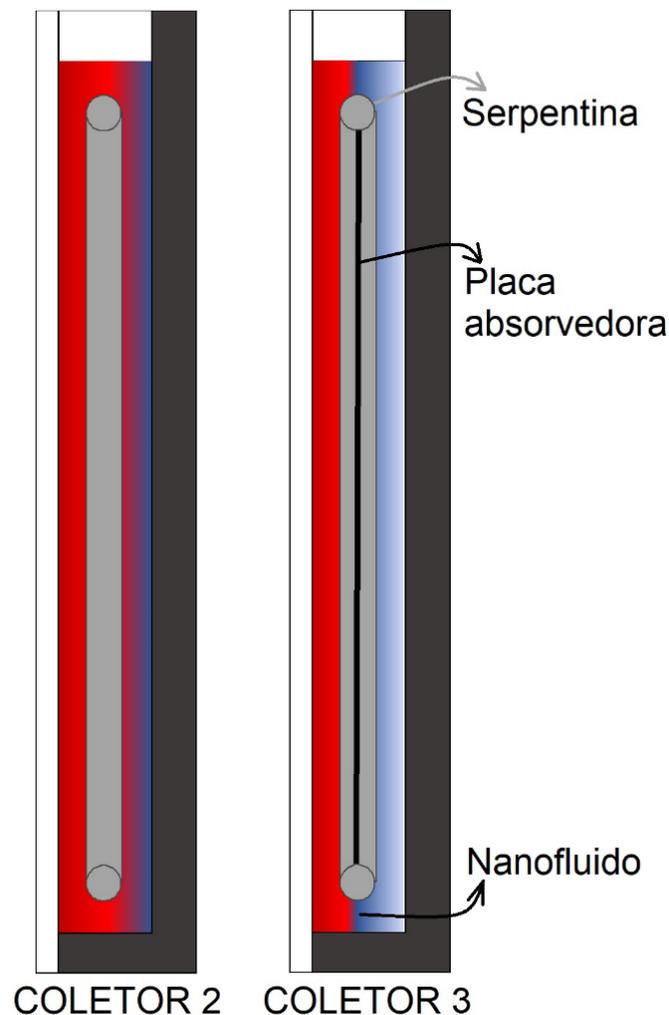
Na avaliação da estabilidade das amostras testadas no Coletor 2, o nanofluido que teve maior variação da absorbância ao se comparar o nanofluido testado por cinco dias e o não utilizado após o mesmo período foi o de menor concentração ( $\Phi_v=0,0005\%$ ), com uma queda na absorbância de 3,30%.

Ao avaliarmos as amostras testadas no Coletor 3, o comportamento de degradação das amostras seguiu um padrão diferente do descrito anteriormente, nesse caso, a amostra de maior concentração testada ( $\Phi_v=0,0010\%$ ) foi a que

apresentou a maior variação de absorvência na comparação entre o nanofluido testado por cinco dias e o sem uso após o mesmo período.

O resultado observado poderia se justificar pela característica construtiva do Coletor 3 ser diferente da do Coletor 2, em que, no primeiro, a presença da placa absorvedora gera uma separação do nanofluido entre uma camada exposta diretamente à radiação (que, conseqüentemente, estará mais aquecida) e uma camada não exposta (camada de líquido presente atrás da face posterior da placa absorvedora, conseqüentemente mais fria); tal característica construtiva, como mostra a Figura 117, gera uma estratificação da temperatura do nanofluido dentro da estrutura do Coletor 3 que é diferente da ocorrida no Coletor 2, onde praticamente todo o fluido está exposto à radiação solar (exceto nas estreitas regiões de sombra criadas pela serpentina).

Figura 117 – Diferenças construtivas entre coletores modificados: comparativo da vista em corte transversal do Coletor 2 e Coletor 3



Ressalta-se ainda que, somado a essa diferença construtiva, é sabido que, quanto maior a concentração de nanopartículas presentes no fluido base, mais superficialmente a radiação é absorvida e mais aquecida estará a camada de fluido imediatamente adjacente ao acrílico, aumentando, assim, a estratificação na temperatura observada no Coletor 3 devido à presença da placa absorvedora; em resumo, avaliando essas duas características, torna-se plausível a hipótese de que o gradiente de temperatura criado pela presença da placa absorvedora no Coletor 3 seja responsável pela intensa degradação das amostras em seu interior e que essa perda de estabilidade ocorreria de forma tão mais intensa quanto maior seja o gradiente de temperatura experimentado pelo nanofluido (um resultado esperado em amostras de maior concentração volumétrica, como a de  $\Phi_v=0,0010\%$  testada).

## CAPÍTULO V

### 5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou experimentalmente o uso de nanofluidos em coletores solares que reproduzissem os efeitos de um coletor solar de absorção direta utilizando nanofluidos como meio de conversão fototérmica e compará-los a um coletor de placa plana tradicional. A avaliação foi precedida de testes experimentais que embasaram a escolha do tipo de nanopartícula e da concentração volumétrica a ser empregada no processo.

A primeira etapa foi realizada em uma bancada experimental projetada para expor os nanofluidos à radiação solar em uma célula de teste transparente e investigar parâmetros de absorção e conservação de energia do processo a partir dos dados de temperatura coletados. A segunda bancada, por sua vez, foi constituída por três coletores solares para aquecimento de água que foram testados simultaneamente, um tradicional de placa plana, um cuja placa de aquecimento foi removida e adicionado nanofluido ao redor da serpentina de aquecimento, e o terceiro, mantida a placa absorvedora e adicionado nanofluido. Nessa segunda etapa, os dados de temperatura de entrada e saída da água nos coletores foram adquiridos e o desempenho dos coletores avaliado por meio deles. As conclusões obtidas a partir dessas etapas são apresentadas a seguir.

A avaliação da estabilidade de curto prazo das amostras de nanofluidos de grafeno, ZnO-Ag, ouro e MWCNT em água imediatamente após a produção e após a exposição à radiação solar na bancada 1 indicaram a perda de estabilidade de todas as amostras de grafeno e ZnO-Ag logo após um dia de testes, inviabilizando investigações mais aprofundadas dessas amostras, e a aparente estabilidade dos nanofluidos de ouro e MWCNT.

Na avaliação da estabilidade de longo prazo das amostras de ouro, as amostras menos concentradas ( $\phi \leq 0,0008\%$ ) usadas (5 dias de exposição solar na bancada 1)

sofreram menor degradação ao longo das primeiras semanas pós-produção quando comparadas às amostras novas (não usadas nos testes), no entanto, após 166 dias de avaliação todas essas apresentaram concentração estimada próxima de zero (equivalente a água pura); o nanofluido mais concentrado ( $\phi_v=0,0050\%$ ) não usado nos testes experimentais apresentou a melhor estabilidade, com uma diminuição da concentração estimada de 55% em relação à concentração inicial.

Na avaliação de estabilidade de longo prazo das amostras de MWCNT, os resultados obtidos para os nanofluidos até a concentração volumétrica 0,001% se mostraram melhores que os obtidos pelos de ouro, mantendo-se significativamente estável por mais que o dobro do tempo (390 dias), além disso, a amostra que apresentou pior estabilidade foi a sem uso de menor concentração ( $\phi_v=0,0001\%$ ), com uma queda de 87% em relação a concentração inicial.

A adição de nanopartículas ao fluido base (água) resultou em aumento da razão de energia armazenada média (“SER”) e diminuição da taxa de absorção específica máxima (“SAR”) de cada amostra. Na avaliação do “SER” das amostras, os nanofluidos de ouro em água demonstraram relação de aumento proporcional ao aumento da concentração volumétrica, no entanto, para as amostras de MWCNT em água, esse comportamento só foi observado nas baixas concentrações ( $\phi_v \leq 0,0010\%$ ). Na análise do “SAR” notou-se uma queda exponencial com o aumento da concentração de nanopartículas, um comportamento que pode ser explicado pela formação de aglomerações nas concentrações mais altas, que prejudicam o processo de conversão fototérmica, e pelo fato de que, ao se dispersar um grande volume de nanopartículas na água, a absorção da radiação passa a ser realizada apenas pelas camadas mais superficiais de fluido, região onde ocorre um maior volume de perdas de calor para a vizinhança.

A avaliação conjunta do “SER” e do “SAR” das amostras indicaram que, apesar da adição de nanopartículas à água produzir efeitos de maior armazenamento de energia, o processo se torna menos eficiente à medida que se utilizam concentrações mais altas, sugerindo que a concentração volumétrica ideal (ou limite) para aplicações utilizando os nanofluidos de ouro e de MWCNT, seriam 0,0020% e 0,0010%, respectivamente.

Observou-se que os resultados obtidos nos testes de conversão fototérmica na bancada 1 pelas nanopartículas de ouro foram ligeiramente inferiores aos de MWCNT, assim como a estabilidade das amostras analisadas, assim, os melhores candidatos

para testes de aplicação em coletor solar (bancada 2) foram os nanofluidos de MWCNT-água com concentrações volumétricas de 0,0010% (a concentração volumétrica limite), e duas abaixo dela, 0,0008% e 0,0005%.

Nos testes realizados na bancada 2, observou-se que, para os coletores que utilizavam nanofluidos como meio e conversão fototérmica (Coletor 2 e 3), em razão da maior inércia térmica do sistema, o efeito termossifão se estabelecia de forma mais lenta, ao contrário do coletor de placa plana tradicional (Coletor 1), em que era notável um período breve e transitório em que o valor da variação da temperatura da água no interior do coletor oscilava. Além disso, notou-se que, para todos os coletores testados, os horários de máxima eficiência e máxima variação de temperatura ocorrem em horários próximos do meio-dia solar.

Na avaliação da estabilidade das amostras testadas, observou-se que os nanofluidos testados no Coletor 2 (serpentina+nanofluido) mantiveram-se estáveis durante o período de testes (diferença inferior a 4% em relação às amostras não expostas ao sol); seguindo uma tendência adversa, foi observada uma intensa degradação dos nanofluidos nas três concentrações testadas, resultado associado à característica construtiva do Coletor 3 (que possui, além da serpentina, placa absorvedora), sendo que a perda de estabilidade foi notada mais rapidamente (após o primeiro dia de exposição à radiação solar) na amostra menos concentrada ( $\phi_v=0,0005\%$ ) e de forma mais lenta (após 3 dias de testes) na amostra mais concentrada ( $\phi_v=0,0010\%$ ).

Nos testes utilizando a maior concentração volumétrica de nanofluidos de MWCNT em água (0,0010%), as variações de temperatura experimentadas pela água que escoava pelos coletores foram superiores nos coletores modificados para uso com nanofluidos (Coletor 2 e 3), no entanto, apenas no primeiro dia de testes, sob condições de céu nublado, esses coletores apresentaram valores de eficiência média superiores ao coletor tradicional (Coletor 1), tendo pior desempenho nos dias ensolarados (dias 2 e 3). Além disso, o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentou, em média, os menores valores de eficiência dentre os três coletores.

Nos testes realizados com a concentração volumétrica intermediária de nanofluidos de MWCNT em água (0,0008%), o processo de deposição de nanopartículas sobre a placa absorvedora presente no Coletor 3 decorrente da degradação do nanofluido testado coincidiu com uma mudança no padrão de desempenho do coletor, partindo do pior desempenho no primeiro dia de testes e,

após a degradação do nanofluido, atingindo as maiores variações de temperatura e pontos de máxima eficiência dentre os três coletores. No entanto, em média, o Coletor 1 (tradicional, placa+ar) apresentou os melhores resultados de eficiência, ao passo que obteve os menores valores para a temperatura máxima da água do boiler. Além disso, o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentou resultados de variação de temperatura média e eficiências substancialmente inferiores aos obtidos pelo Coletor 1 em todos os dias de teste, representando, no geral, o pior desempenho dentre os três coletores testados nessa concentração.

Na última etapa de ensaios com coletores solares, em que as amostras de menor concentração volumétrica de nanofluidos de MWCNT em água (0,0005%) foram testadas, na avaliação das médias de variação de temperatura o Coletor 2 (serpentina+nanofluido) apresentou os piores resultados, enquanto o Coletor 3 (placa+nanofluido), os melhores, por outro lado, analisando os valores de eficiência nota-se que, em todos os dias de teste, o Coletor 1 (placa+ar) foi o com melhores resultados, seguido do Coletor 3 e, por último, o Coletor 2. Os coletores operando com nanofluidos demonstraram pontos de máxima variação de temperatura superiores aos do Coletor 1, sendo do Coletor 3 as maiores máximas nos cinco dias de teste.

Comparando-se as três etapas de teste, nota-se que os coletores com nanofluidos tiveram melhor desempenho na maior concentração testada (0,0010%), apresentando médias de variação de temperatura substancialmente superiores às do coletor tradicional e eficiências médias equiparáveis. Por outro lado, os piores desempenhos foram observados nos testes na concentração intermediária ( $\phi_v=0,0008\%$ ). Além disso, observou-se o padrão de maiores médias de variação de temperatura no Coletor 3 (placa+nanofluido) e os coletores 1(placa+ar) e 2 (serpentina+nanofluido) apresentando, respectivamente, as melhores e piores eficiências médias.

Por fim, a avaliação da energia total específica de todos os dias de teste evidenciou que os coletores modificados para uso com nanofluidos (Coletor 2 e 3) conseguiram atingir, no melhor cenário (o primeiro dia de testes com nanofluidos de concentração  $\Phi_v=0,0010\%$ , em 5/8/22), resultados semelhantes aos do coletor tradicional de placa plana (Coletor 1), demonstrando que o preenchimento dos coletores com nanofluidos proporcionou maiores médias de variação de temperatura, no entanto, resultou em menores eficiências médias e em ganhos de energia total que no máximo, se equipararam ao do modelo tradicional ao se considerar a maior área

de absorção dos coletores modificados para absorção direta em relação ao modelo tradicional.

### 5.1 TRABALHOS FUTUROS

Os testes realizados e os resultados obtidos no presente trabalho abriram perspectivas de estudos que podem ser realizados futuramente no intuito de contribuir ainda mais com o tema, sendo eles:

- avaliação do desempenho de conversão fototérmica de nanofluidos produzidos com fluidos base e nanopartículas diferentes;
- variação da espessura de fluido utilizada no interior do coletor, em especial, menores que 2,5cm;
- modificação construtiva do coletor solar de placa plana de maneira a permitir que haja nanofluido apenas na face anterior da placa absorvedora.
- Substituição da serpentina de aquecimento de cobre do coletor solar por uma de material transparente que permita a radiação incidir de maneira direta também sobre a água a ser aquecida.
- Modificação do sistema para que a temperatura da água na entrada do coletor seja mantida constante e, adicionalmente, testes comparativos entre o sistema operando através de efeito termossifão *versus* sistema operando com circulação forçada.

## CAPÍTULO VI

### 6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas/NBR 15569: Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Requisitos de projeto e instalação, Rio de Janeiro, Brasil, 2020.

ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas/NBR 17003: Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

AKRAM, Naveed; MONTAZER, Elham; KAZI, S.N.; SOUDAGAR, Manzoore Elahi M.; AHMED, Waqar; ZUBIR, Mohd Nashrul Mohd; AFZAL, Asif; MUHAMMAD, Mohd Ridha; ALI, Hafiz Muhammad; MÁRQUEZ, Fausto Pedro García. Experimental investigations of the performance of a flat-plate solar collector using carbon and metal oxides based nanofluids. **Energy**, 227, p. 120452, 2021.

AMJAD, Muhammad; JIN, Haichuan; DU, Xiaoze; WEN, Dongsheng. Experimental photothermal performance of nanofluids under concentrated solar flux. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, 182, p. 255-262, 2018.

CACUA, Karen; ORDOÑEZ, Fredy; ZAPATA, Camilo; HERRERA, Bernardo; PABÓN, Elizabeth; BUITRAGO-SIERRA, Robison. Surfactant concentration and pH effects on the zeta potential values of alumina nanofluids to inspect stability. **Colloids And Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects**, 583, p. 123960, 2019.

CHEN, M., HE, Y., ZHU, J., KIM, D. R. Enhancement of photo-thermal conversion using gold nanofluids with different particle sizes. **Energy Conversion and Management**, 112, p. 21-30, 2016.

CHEN, Meijie; HE, Yurong; HUANG, Jian; ZHU, Jiaqi. Investigation into Au nanofluids for solar photothermal conversion. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, 108, p. 1894-1900, 2017.

CHOI, U.S., Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles, **ASMEFED** 231, p. 99-103, 1995.

Dabiri, S.; Rahimi, S.: Introduction of solar collectors and energy and exergy analysis of a heliostat plant. **Res. Gate 3:ICESE-2016**, 8, 2016.

DE CARO, Cosimo A.; HALLER, Claudia. UV/VIS Spectrophotometry—Fundamentals and Applications; **Mettler-Toledo Publication**, Greifensee, Switzerland, 2015.

DEHAJ, Mohammad Shafiey; REZAEIAN, Mohsen; MOUSAVI, Davoud; SHAMSI, Sajjad; SALARMOFRAD, Masoud. Efficiency of the parabolic through solar collector using NiFe<sub>2</sub>O<sub>4</sub>/Water nanofluid and U-tube. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, 120, p. 136-149, 2021.

DELFANI, S., KARAMI, M., AKHAVAN-BEHABADI, M.A., Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using MWCNT nanofluid, **Renewable Energy**, 87, p. 754-764, 2016.

DEVENDIRAN, Dhinesh Kumar; AMIRTHAM, Valan Arasu. A review on preparation, characterization, properties and applications of nanofluids. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 60, p. 21-40, jul. 2016. Elsevier BV.

DUAN, Huiling; TANG, Liangliang; ZHENG, Yuan; XU, Chang. Effect of plasmonic nanoshell-based nanofluid on efficiency of direct solar thermal collector. **Applied Thermal Engineering**, 133, p. 188-193, 2018.

ELTAWHEEL, Mahmoud; ABDEL-REHIM, Ahmed A. Energy and exergy analysis of a thermosiphon and forced-circulation flat-plate solar collector using MWCNT/Water nanofluid. **Case Studies In Thermal Engineering**, 14, p. 100416, 2019.

ELTAWHEEL, Mahmoud; ABDEL-REHIM, Ahmed A.; ATTIA, Ahmed A.A. Energetic and exergetic analysis of a heat pipe evacuated tube solar collector using MWCNT/water nanofluid. **Case Studies In Thermal Engineering**, 22, p. 100743, 2020.

ELTAWHEEL, Mahmoud; ABDEL-REHIM, Ahmed A.; ATTIA, Ahmed A.A.. A comparison between flat-plate and evacuated tube solar collectors in terms of energy and exergy analysis by using nanofluid. **Applied Thermal Engineering**, 186, p. 116516, 2021.

FAN, J., WANG, L., Review of heat conduction in nanofluids, **J. Heat Transfer**, 133, p. 040801, 2011.

FANG, Liwei. Study on energy saving of solar hot water system. **Iop Conference Series: Earth and Environmental Science**, 170, p. 042044, 2018.

FU, Y, MEI, T., WANG, G., GUO, A., DAI, G., WANG, S., WANG, J., LI, J., WANG, X., Investigation on enhancing effects of Au nanoparticles on solar steam generation in graphene oxide nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, 114, p. 961–968.

GHADERIAN, Javad; SIDIK, Nor Azwadi Che. An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/distilled water nanofluid on the energy efficiency of evacuated tube solar collector. **International Journal Of Heat And Mass Transfer**, 108, p. 972-987, 2017.

GUO, Juanxuan; WANG, Fangxian; LI, Shihao; WANG, Yuwei; HU, Xueshan; ZU, Daoyuan; SHEN, Yongming; LI, Changping. Enhanced optical properties and light-to-heat conversion performance of Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>/[BMIM]BF<sub>4</sub> nanofluids based direct absorption solar collector. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, 237, p. 111558, 2022.

GUPTA, H.K., AGRAWAL, G.D., MATHUR, J.. An experimental investigation of a low temperature Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid based direct absorption solar collector. **Solar Energy**, 118, p. 390-396, 2015.

HE, Q., ZHENG, S., WANG, S., Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids. **Applied Thermal Engineering**. 88, p. 165–171, 2014.

HE, Q., WANG, S., ZENG, S., ZHENG, Z., Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems. **Energy Conversion and Management**, 73, p. 150–157, 2013.

HE, Y., WANG, S., MA, J., TIAN, F., REN, Y., Experimental study on the light-heat conversion characteristics of nanofluids. **Nanoscience and Nanotechnology Letters**, 3, p. 494–496, 2011.

HENEIN, Shady M.; ABDEL-REHIM, Ahmed A.. The performance response of a heat pipe evacuated tube solar collector using MgO/MWCNT hybrid nanofluid as a working fluid. **Case Studies In Thermal Engineering**, 33, p. 101957, 2022.

HORDY, N., RABILLOUD, D., MEUNIER, J.L., COULOMBE, S., High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors. **Solar Energy**, 105, p. 82–90, 2014.

HOSSEINI, Seyed Mohammad Sadegh; DEHAJ, Mohammad Shafiey. An experimental study on energetic performance evaluation of a parabolic trough solar collector operating with Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/water and GO/water nanofluids. **Energy**, 234, p. 121317, 2021.

INMETRO - Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia. Avaliação de dados de medição Guia para a expressão de incerteza de medição GUM 2008, Rio de Janeiro, Brasil, 2012

IRANMANESH, Soudeh; ONG, Hwai Chyuan; ANG, Bee Chin; SADEGHINEZHAD, Emad; ESMAEILZADEH, Alireza; MEHRALI, Mohammad. Thermal performance enhancement of an evacuated tube solar collector using graphene nanoplatelets nanofluid. **Journal Of Cleaner Production**, 162, p. 121-129, 2017.

JAMAL-ABAD, M.T., ZAMZAMIAN, A., IMANI, E., MANSOURI, M., Experimental Study of the Performance of a Flat-Plate Collector Using Cu–Water Nanofluid. **Journal of Thermophysics and Heat Transfer**, 27-4, p. 756-760, 2013.

JEON, J., PARK, S., LEE, B. J. Analysis on the performance of a flat-plate volumetric solar collector using blended plasmonic nanofluid. **Solar Energy**, 132, p. 247-256, 2016.

JOSEPH, Albin; THOMAS, Shijo. Energy, exergy and corrosion analysis of direct absorption solar collector employed with ultra-high stable carbon quantum dot nanofluid. **Renewable Energy**, 181, p. 725-737, 2022.

KARAMI, M., AKHAVAN BAHABADI, M.A., DELFANI, S., GHOZATLOO, A., A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 121, p. 114–118, 2014.

KARAMI, M; RAISEE, M; DELFANI, S. Numerical Investigation of Nanofluid-based Solar Collectors. **Iop Conference Series: Materials Science and Engineering**, 64, p. 012044, 2014.

KARAMI, M., AKHAVAN-BAHABADI, M.A., DELFANI, S., RAISEE, M., Experimental investigation of CuO nanofluid based direct absorption solar collector for residential applications. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 52, p. 793-801, 2015.

KAYA, Hüseyin; ALKASEM, Mohanad; ARSLAN, Kamil. Effect of nanoparticle shape of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Pure Water nanofluid on evacuated U-Tube solar collector efficiency. **Renewable Energy**, 162, p. 267-284, 2020.

KHANAFER, Khalil; VAFAI, Kambiz. A review on the applications of nanofluids in solar energy field. **Renewable Energy**, 123, p. 398-406, 2018.

KHULLAR, V., TYAGI, H., Application of nanofluids as the working fluid in concentrating parabolic solar collectors, In: Proceedings of the 37th National and 4th International Conference on Fluid Mechanics and Fluid Power, 2010. **Proceedings**. [...] Madras, Chennai, India. FMFP10 - BN – 06, 2010, p. 1-9.

KHULLAR, V., TYAGI, H., PHELAN, P.E., OTANICAR, T.P., SINGH, H., TAYLOR, R.A., Solar energy harvesting using nanofluids-based concentrating solar collector, In: International Conference on Micro/Nanoscale Heat and Mass Transfer 3, 2012. **Proceedings**. [...] Atlanta, Georgia, USA. ASME Proceedings - MNHMT2012, 2012, p. 259-267.

KIM, H., HAM, J., PARK, C., CHO, H., Theoretical investigation of the efficiency of a U-tube solar collector using various nanofluids. **Energy**, 94, p. 497-507, 2016.

KOCA, Halil Dogacan; DOGANAY, Serkan; TURGUT, Alpaslan; TAVMAN, Ismail Hakki; SAIDUR, R.; MAHBUBUL, Islam Mohammed. Effect of particle size on the

viscosity of nanofluids: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 82, p. 1664-1674, fev. 2018. Elsevier BV.

KUMAR, Sanjay; SHARMA, Vipin; SAMANTARAY, Manas R.; CHANDER, Nikhil. Experimental investigation of a direct absorption solar collector using ultra stable gold plasmonic nanofluid under real outdoor conditions. **Renewable Energy**, 162, p. 1958-1969, 2020.

LADJEVARDI, S.M., ASNAGHI, A., IZADKHAHAST, P.S., KASHANI, A.H., Applicability of graphite nanofluids in direct solar energy absorption. **Solar Energy**, 94, p. 327–334, 2013.

LI, Junhao; ZHANG, Xilong; XU, Bin; YUAN, Mingyu. Nanofluid research and applications: a review. **International Communications In Heat And Mass Transfer**, v. 127, p. 105543, out. 2021. Elsevier BV.

LIU, Xing; WANG, Xinzhi; HUANG, Jian; CHENG, Gong; HE, Yurong. Volumetric solar steam generation enhanced by reduced graphene oxide nanofluid. **Applied Energy**, 220, p. 302-312, 2018.

LIU, Z., HUA, R., LU, L., ZHAO, F., XIAO, H., Thermal performance of an open thermosyphon using nanofluid for evacuated tubular high temperature air solar collector. **Energy Conversion and Management**, 73, p. 135–143, 2013.

MAHBUBUL, I.M.; KHAN, Mohammed Mumtaz A.; IBRAHIM, Nasiru I.; ALI, Hafiz Muhammad; AL-SULAIMAN, Fahad A.; SAIDUR, R.. Carbon nanotube nanofluid in enhancing the efficiency of evacuated tube solar collector. **Renewable Energy**, 121, p. 36-44, 2018.

MEHTA, Bhavin; SUBHEDAR, Dattatraya; PANCHAL, Hitesh; SAID, Zafar. Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid – A review. **Journal Of Molecular Liquids**, 364, p. 120034, 2022.

MORAVEJ, Mojtaba; BOZORG, Mehdi Vahabzadeh; GUAN, Yu; LI, Larry K.B.; DORANEHGARD, Mohammad Hossein; HONG, Kun; XIONG, Qingang. Enhancing the efficiency of a symmetric flat-plate solar collector via the use of rutile TiO<sub>2</sub>-water

nanofluids. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, 40, p. 100783, 2020.

NATIVIDADE, Pablo Sampaio Gomes; MOURA, Gabriel de Moraes; AVALLONE, Elson; BANDARRA FILHO, Enio Pedone; GELAMO, Rogério Valentim; GONÇALVES, Júlio Cesar de Souza Inácio. Experimental analysis applied to an evacuated tube solar collector equipped with parabolic concentrator using multilayer graphene-based nanofluids. **Renewable Energy**, 138, p. 152-160, 2019.

NJOKI, Peter N.; LIM, I-Im S.; MOTT, Derrick; PARK, Hye-Young; KHAN, Bilal; MISHRA, Suprav; SUJAKUMAR, Ravishanker; LUO, Jin; ZHONG, Chuan-Jian. Size Correlation of Optical and Spectroscopic Properties for Gold Nanoparticles. **The Journal Of Physical Chemistry C**, v. 111, n. 40, p. 14664-14669, 18 set. 2007.

OTANICAR, T., PHELAN, P.E., PRASHER, R.S., ROSENGARTEN, G., TAYLOR, R.A., Nanofluid-based direct absorption solar collector. **Journal of Renewable Sustainable Energy**, 2, p. 033102, 2010.

RAJA, M.; VIJAYAN, R.; DINESHKUMAR, P.; VENKATESAN, M.. Review on nanofluids characterization, heat transfer characteristics and applications. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, 64, p. 163-173, 2016.

RAJPUT, Nitesh Singh; SHUKLA, Dipesh Dilipbhai; RAJPUT, Deep; SHARM, Shiv Kumar. Performance Analysis of Flat Plate Solar Collector using Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Distilled Water Nanofluid: an experimental investigation. **Materials Today: Proceedings**, 10, p. 52-59, 2019.

RIOS, Mariana S. Bretado-De Los; RIVERA-SOLORIO, Carlos I.; NIGAM, K.D.P.. An overview of sustainability of heat exchangers and solar thermal applications with nanofluids: a review. **Renewable And Sustainable Energy Reviews**, v. 142, p. 110855, maio 2021.

SABIHA, M.A., SAIDUR, R., HASSANI, S., SAID, Z., MEKHILEF, S., Energy performance of an evacuated tube solar collector using single walled carbon nanotubes nanofluids. **Energy Conversion and Management**, 105, p. 1377-1388, 2015.

SAID, Zafar; SOHAIL, Maham Aslam; PANDEY, Adarsh Kumar; SHARMA, Prabhakar; WAQAS, Adeel; CHEN, Wei-Hsin; NGUYEN, Phuoc Quy Phong; NGUYEN, Van Nhanh; PHAM, Nguyen Dang Khoa; NGUYEN, Xuan Phuong. Nanotechnology-integrated phase change material and nanofluids for solar applications as a potential approach for clean energy strategies: progress, challenges, and opportunities. **Journal Of Cleaner Production**, v. 416, p. 137736, set. 2023.

SALAVATI MEIBODI, S., NIAZMAND, H., MAHIAN, O., WONGWISES, S., Experimental investigation on the thermal efficiency and performance characteristics of a flat plate solar collector using SiO<sub>2</sub>/EG– water nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 65, p. 71-75, 2015.

SUN, Lei; YANG, Liu; ZHAO, Ning; SONG, Jianzhong; LI, Xiaoke; WU, Xiaohu. A review of multifunctional applications of nanofluids in solar energy. **Powder Technology**, 411, p. 117932, out. 2022.

TAYLOR, R. A., PHELAN, P. E., OTANICAR, T. P., TYAGI, H., TRIMBLE, S., Applicability Of Nanofluids In: Concentrated Solar Energy Harvesting, 2010. **Proceedings**. [...] Phoenix, Arizona, USA. ASME 2010 4th International Conference on Energy Sustainability, 2010.

TONG, Y., KIM, J., CHO, H., Effects of thermal performance of enclosed-type evacuated U-tube solar collector with multi-walled carbon nanotube/water nanofluid. **Renewable Energy**, 83, p. 463-473, 2015.

TONG, Yijie; LEE, Hoseong; KANG, Woobin; CHO, Honghyun. Energy and exergy comparison of a flat-plate solar collector using water, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> nanofluid, and CuO nanofluid. **Applied Thermal Engineering**, 159, p. 113959, 2019.

TONG, Yijie; WANG, Ruijin; WANG, Shifeng; WANG, Huijiao; HUANG, Lizhong; SHAO, Chun; JIN, Xiao; XUE, Bing; ZHU, Zefei. Comparison and evaluation of energetic and exergetic performance of an evacuated tube solar collector using various nanofluid. **Process Safety And Environmental Protection**, 174, p. 585-594, 2023.

TYAGI H, PHELAN P, PRASHER R., Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid based direct absorption solar collector, **Journal Solar Energy Engineering**, 131(4), p. 041004, 2009.

VAKILI, M., HOSSEINALIPOUR, S.M., DELFANI, S., KHOSROJERDI, S., KARAMI, M., Experimental investigation of graphene nanoplatelets nanofluid-based volumetric solar collector for domestic hot water systems. **Solar Energy**, 131, p. 119-130, 2016.

VERMA, S.K., TIWARI, A.K., CHAUHAN, D.S., Performance augmentation in flat plate solar collector using MgO/water nanofluid. **Energy Conversion and Management**, 124, p. 607-617, 2016.

VINCELY, D. A., NATARAJAN, E., Experimental investigation of the solar FPC performance using graphene oxide nanofluid under forced circulation. **Energy Conversion and Management**, 117, p. 1–11, 2016.

WANG, Han; YANG, Weimin; CHENG, Lisheng; GUAN, Changfeng; YAN, Hua. Chinese ink: high performance nanofluids for solar energy. **Solar Energy Materials And Solar Cells**, 176, p. 374-380, 2018.

YOUSEFI, T., SHOJAEIZADEH, E., VEYSI, F., ZINADINI, S., An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector, **Solar Energy**, 86, p. 771–779, 2012a.

YOUSEFI, T., VEYSI, F., SHOJAEIZADEH, E., ZINADINI, S., An experimental investigation on the effect of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors, **Renewable Energy**, 39, p. 293-298, 2012b.

YOUSEFI, T., VEYSI, F., SHOJAEIZADEH, E., ZINADINI, S., An experimental investigation on the effect of MWCNT–H<sub>2</sub>O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collector, **Experimental Thermal and Fluid Science**, 39, p. 207–212, 2012c.

ZIDAN, Diogo do Carmo; MAIA, Cristiana Brasil; SAFAEI, Mohammad Reza. Performance evaluation of various nanofluids for parabolic trough collectors. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, 50, p. 101865, 2022.

## Apêndice A – Curvas de calibração dos termopares da bancada 1

Figura A.1 a Fig. A.13 apresentam as curvas de calibração obtidas para cada um dos 13 termopares utilizados na bancada 1.

Figura A.1 – Curva de calibração do termopar 0 - Bancada 1.

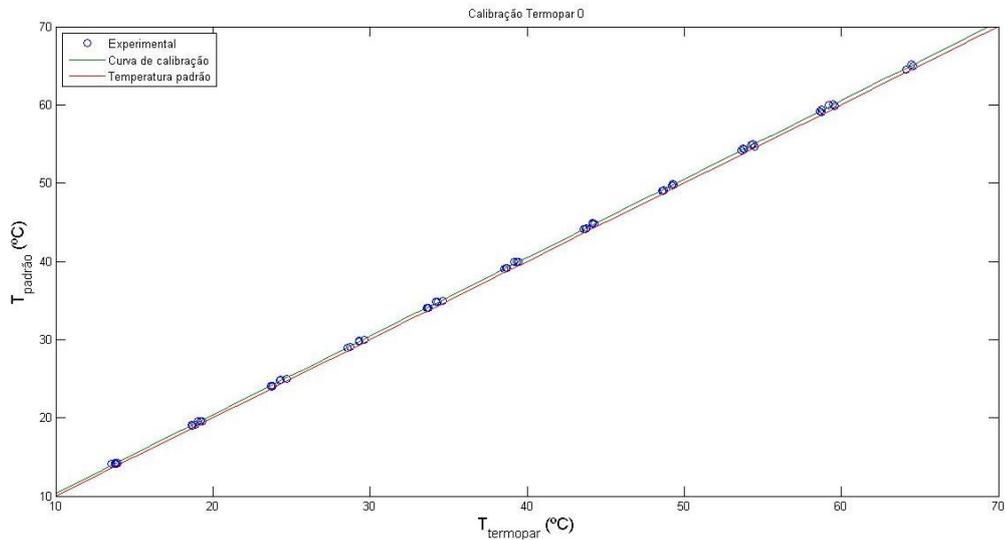


Figura A.2 – Curva de calibração do termopar 1 - Bancada 1.

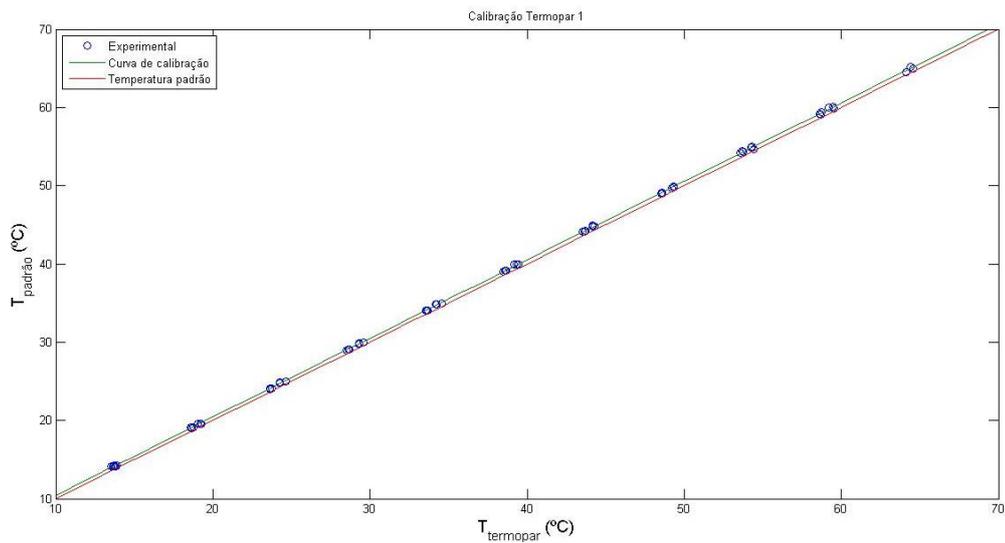


Figura A.3 – Curva de calibração do termopar 2 - Bancada 1.

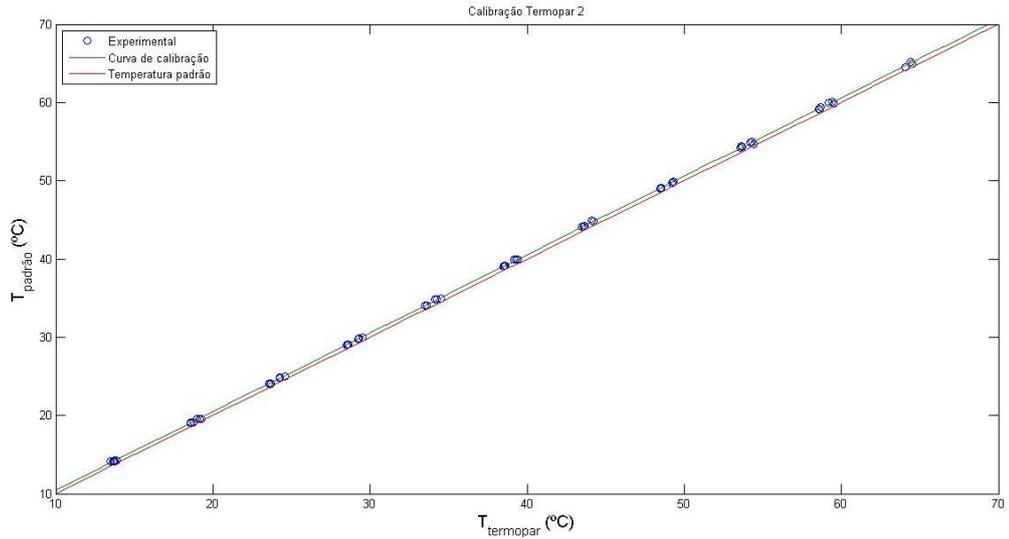


Figura A.4 – Curva de calibração do termopar 3 - Bancada 1.

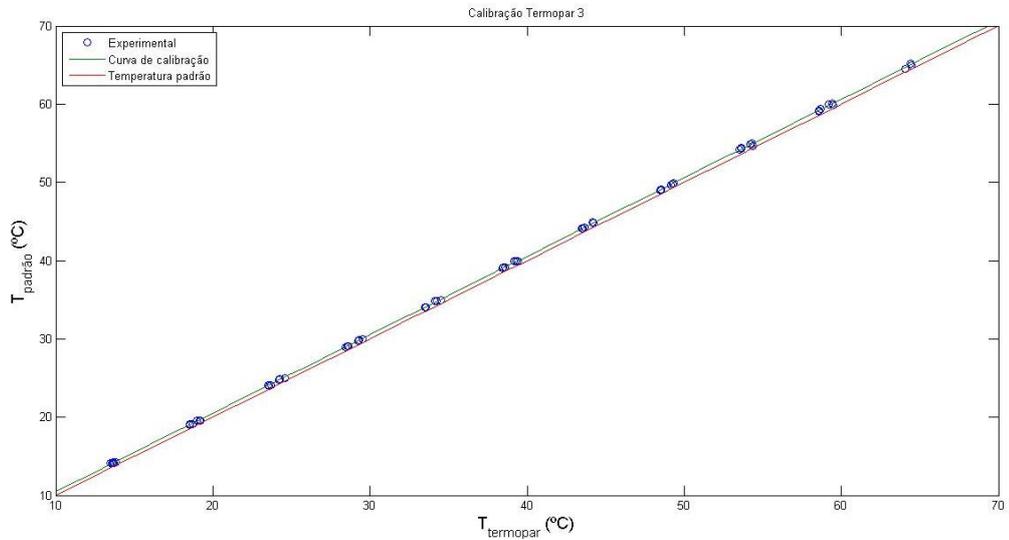


Figura A.5 – Curva de calibração do termopar 4 - Bancada 1.

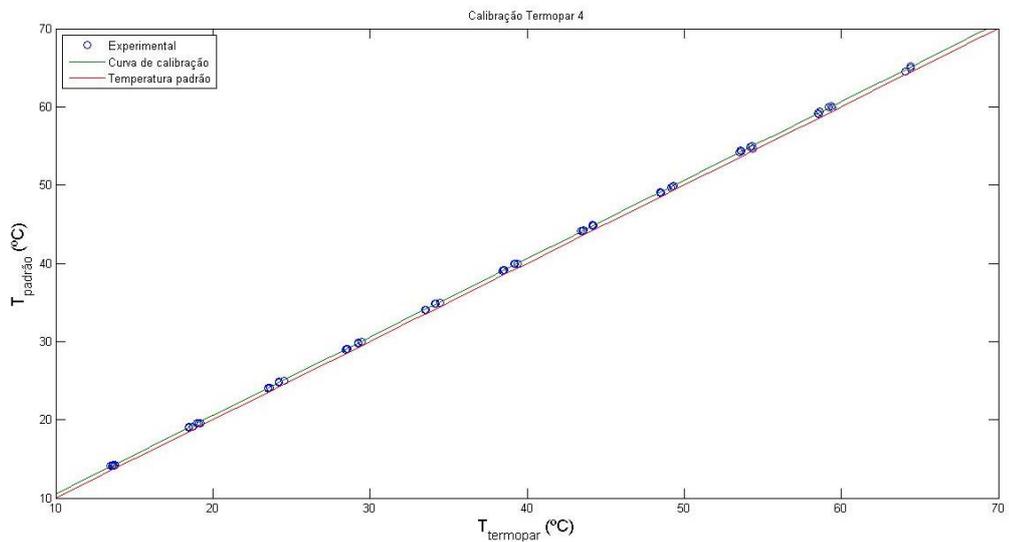


Figura A.6 – Curva de calibração do termopar 5 - Bancada 1.

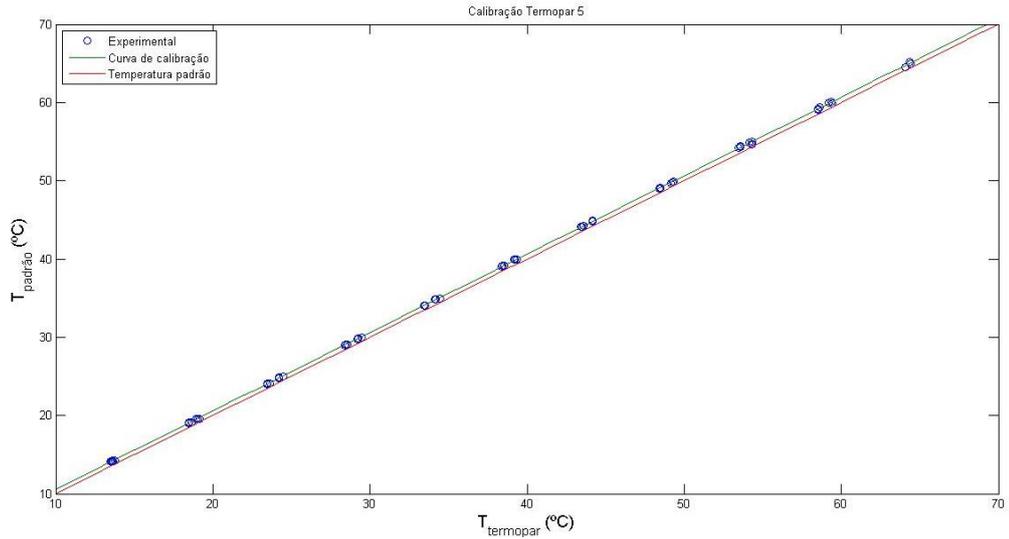


Figura A.7 – Curva de calibração do termopar 6 - Bancada 1.

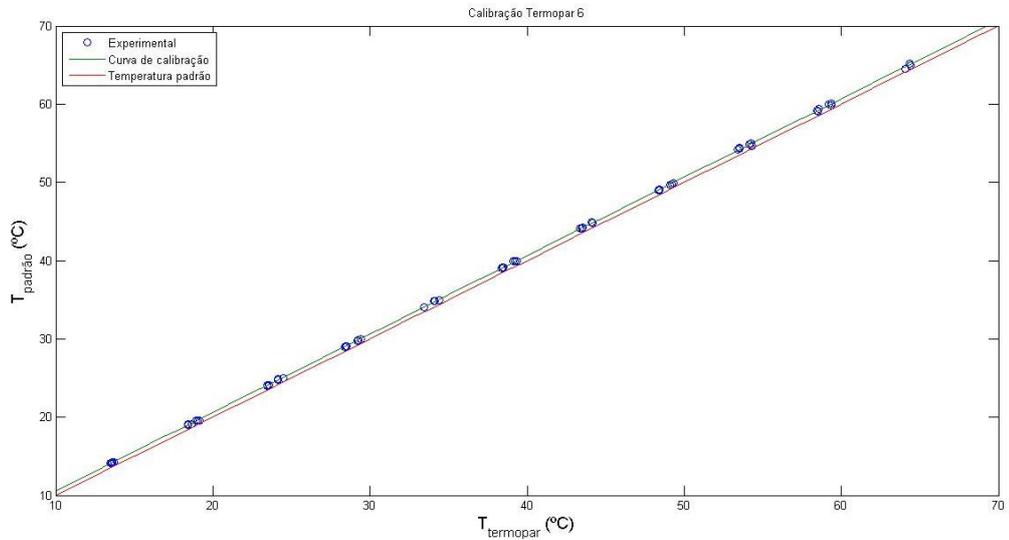


Figura A.8 – Curva de calibração do termopar 7 - Bancada 1.

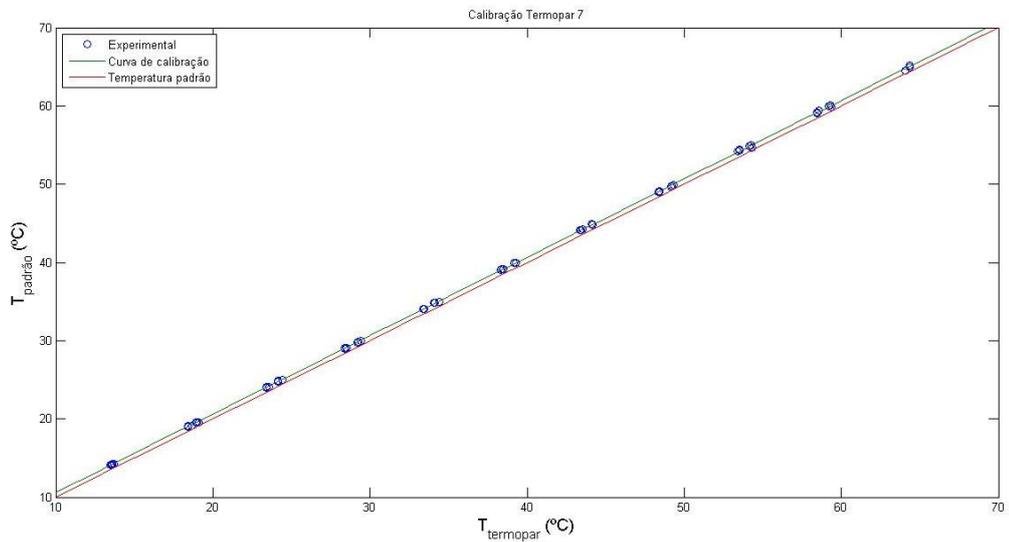


Figura A.9 – Curva de calibração do termopar 8 - Bancada 1.

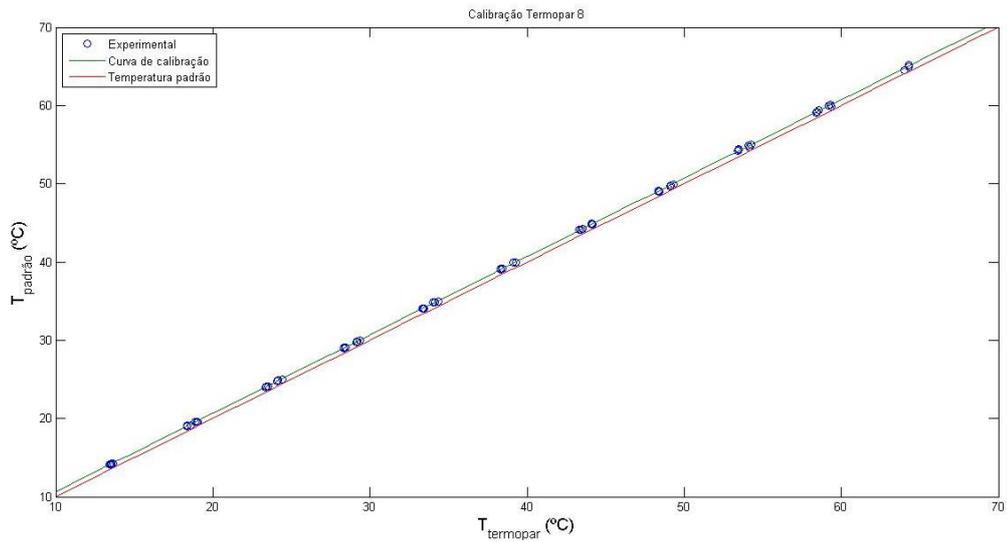


Figura A.10 – Curva de calibração do termopar 9 - Bancada 1.

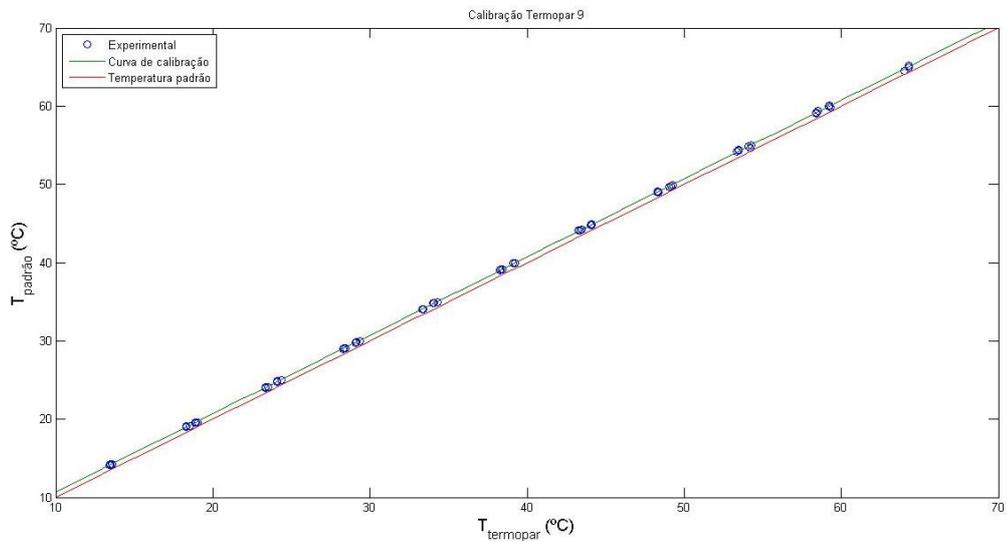


Figura A.11 – Curva de calibração do termopar 10 - Bancada 1.

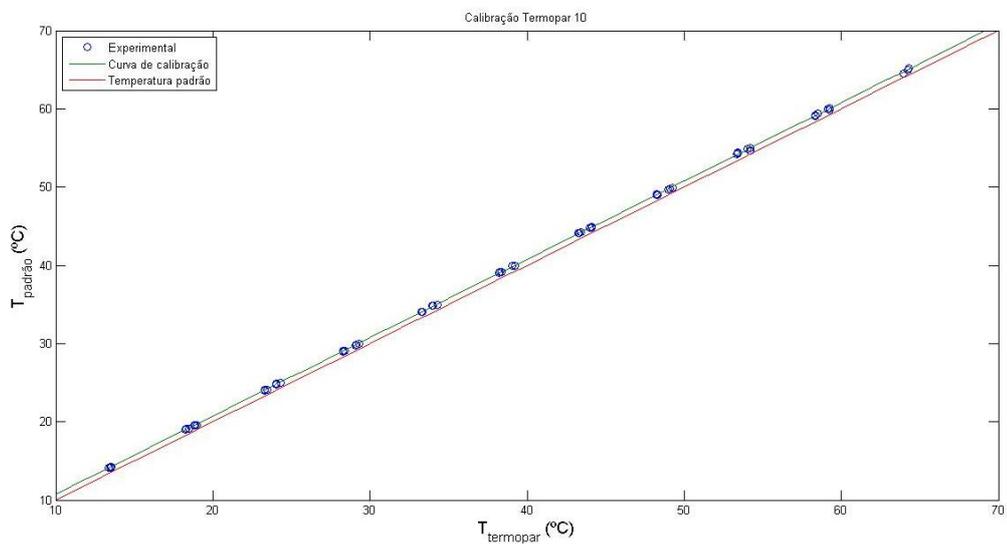


Figura A.12 – Curva de calibração do termopar 11 - Bancada 1.

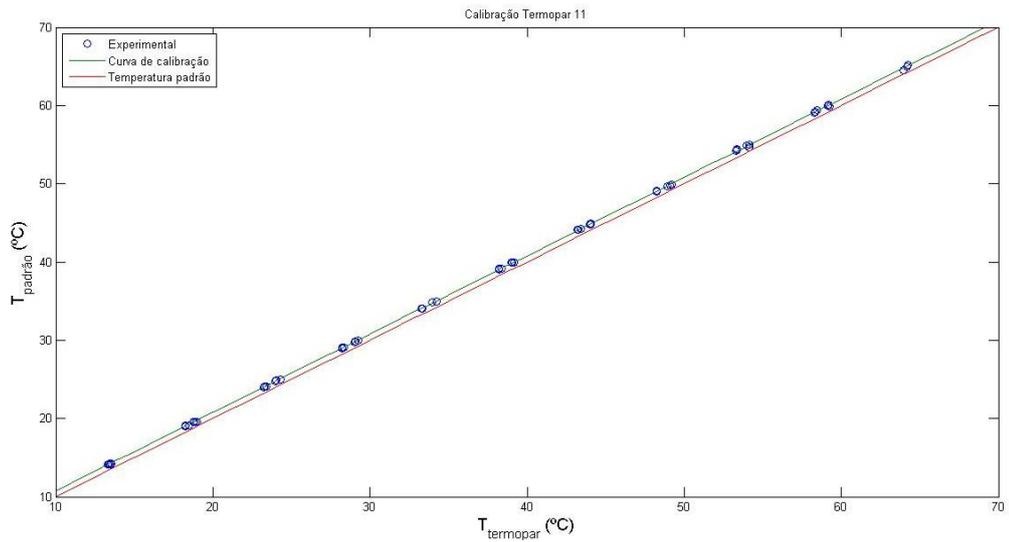
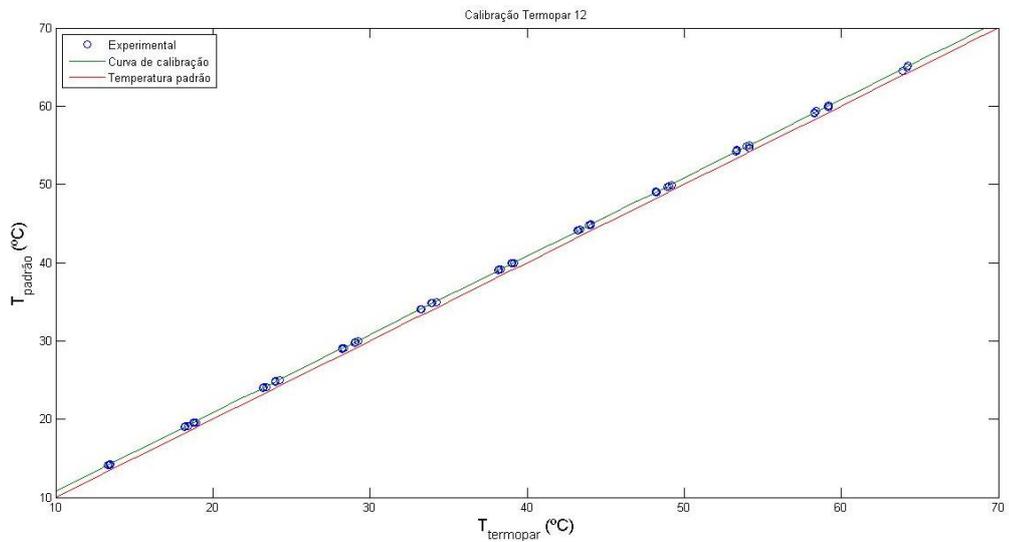


Figura A.13 – Curva de calibração do termopar 12 - Bancada 1.



## Apêndice B – Curvas de calibração dos termopares da bancada 2

Figura B.1 a Fig. B.7 apresentam as curvas de calibração obtidas para cada um dos 7 termopares utilizados na bancada 2.

Figura B.1 Curva de calibração do termopar 0 - Bancada 2.

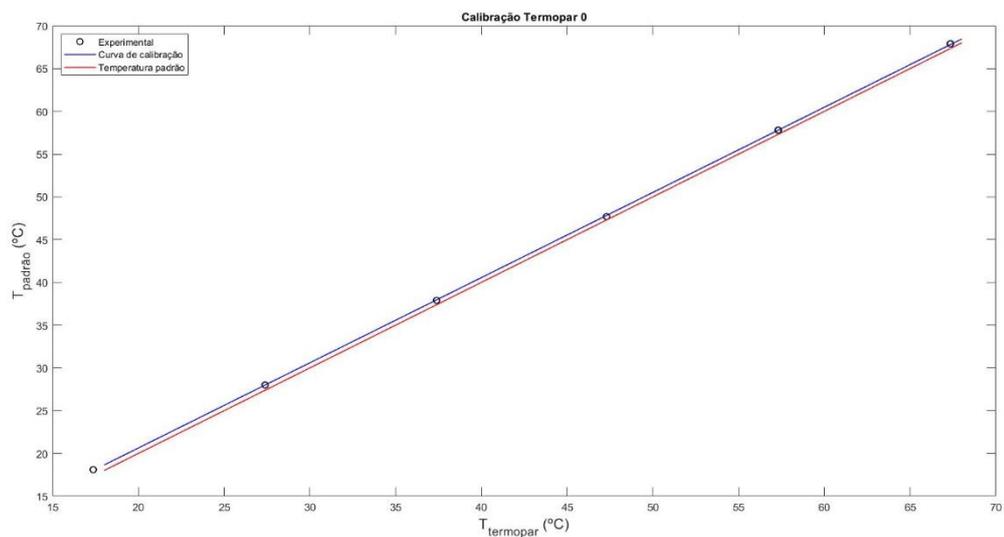


Figura B.2 – Curva de calibração do termopar 1 - Bancada 2.

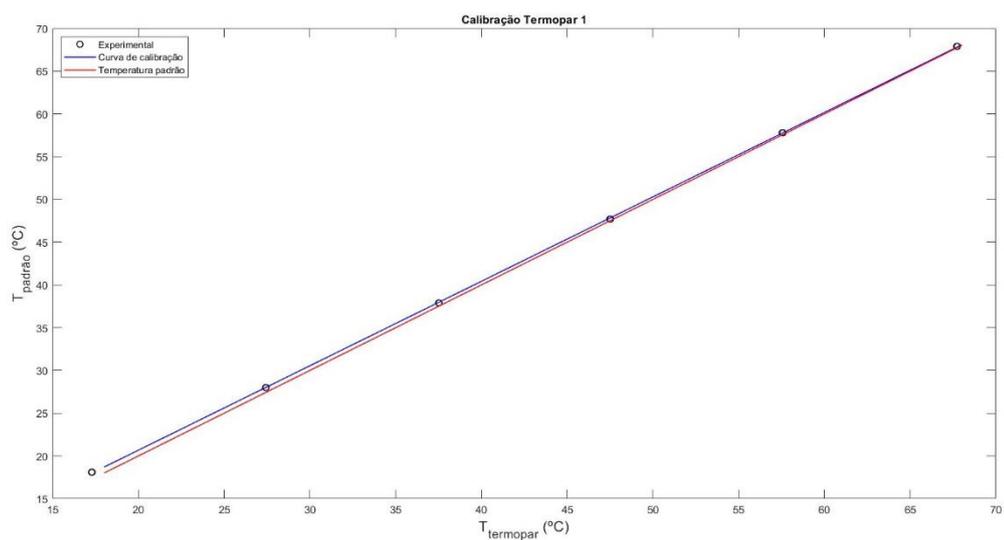


Figura B.3 – Curva de calibração do termopar 2 - Bancada 2.

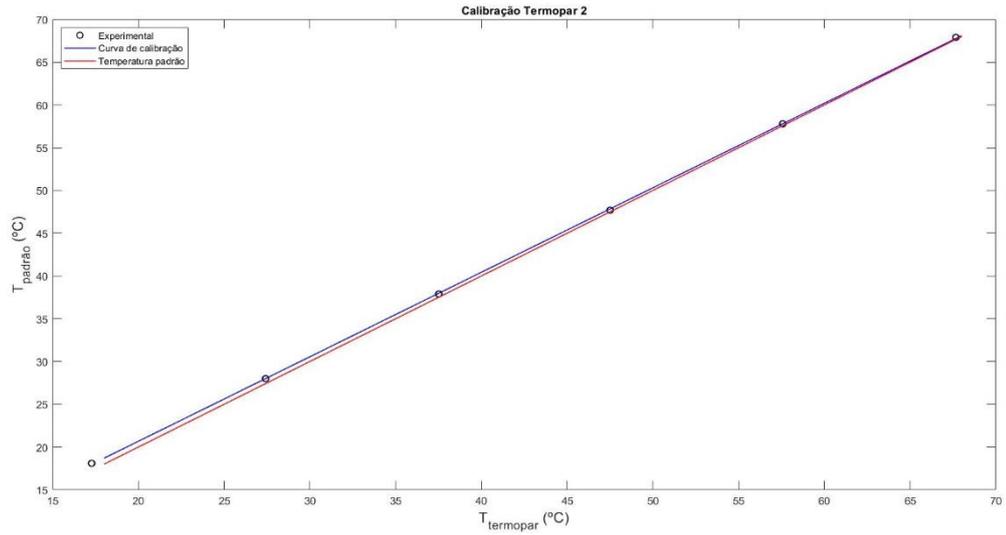


Figura B.4 – Curva de calibração do termopar 3 - Bancada 2.

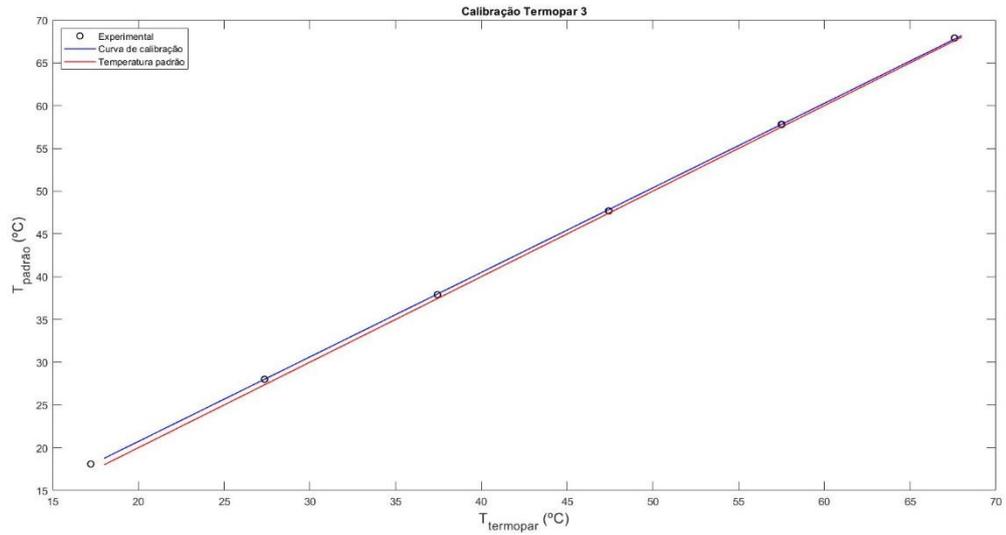


Figura B.5 – Curva de calibração do termopar 4 - Bancada 2.

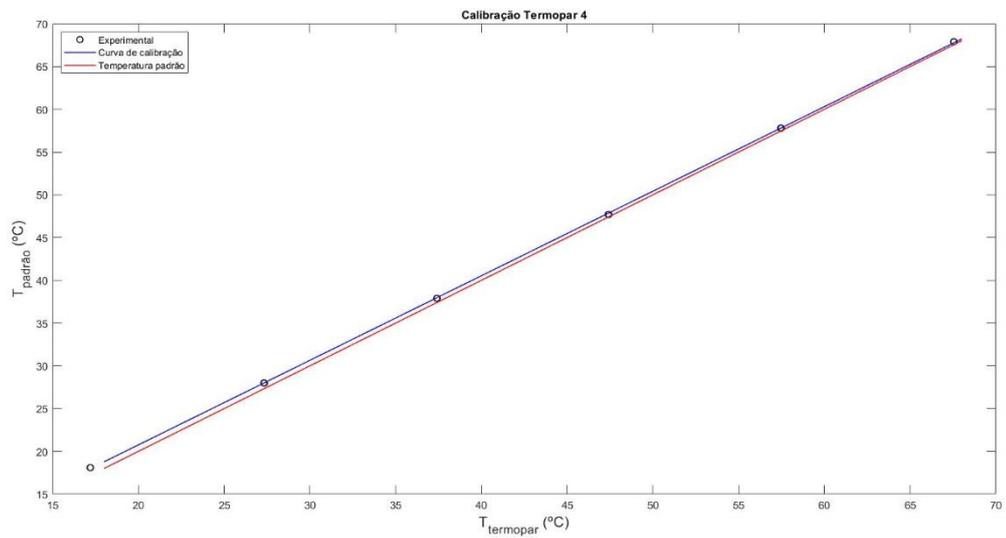


Figura B.6 – Curva de calibração do termopar 5 - Bancada 2.

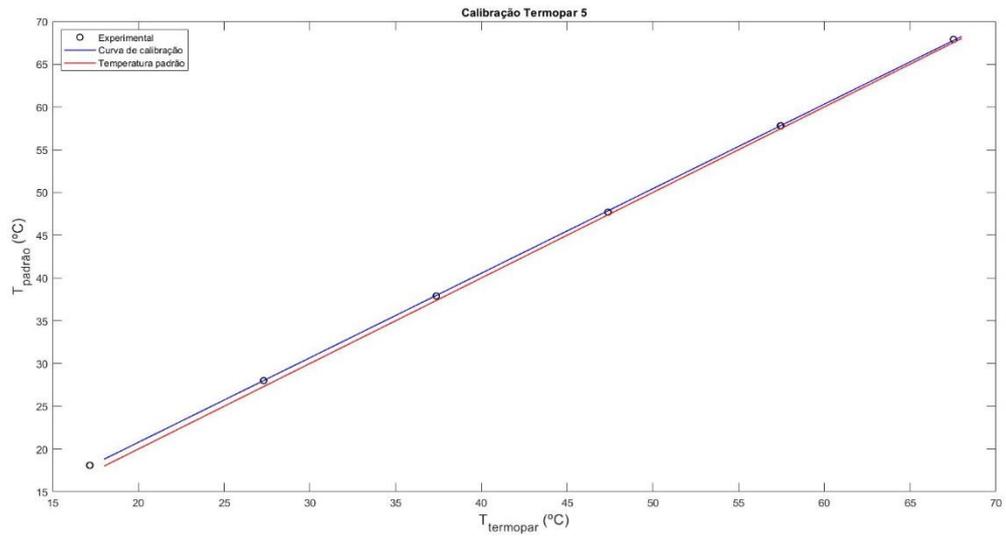
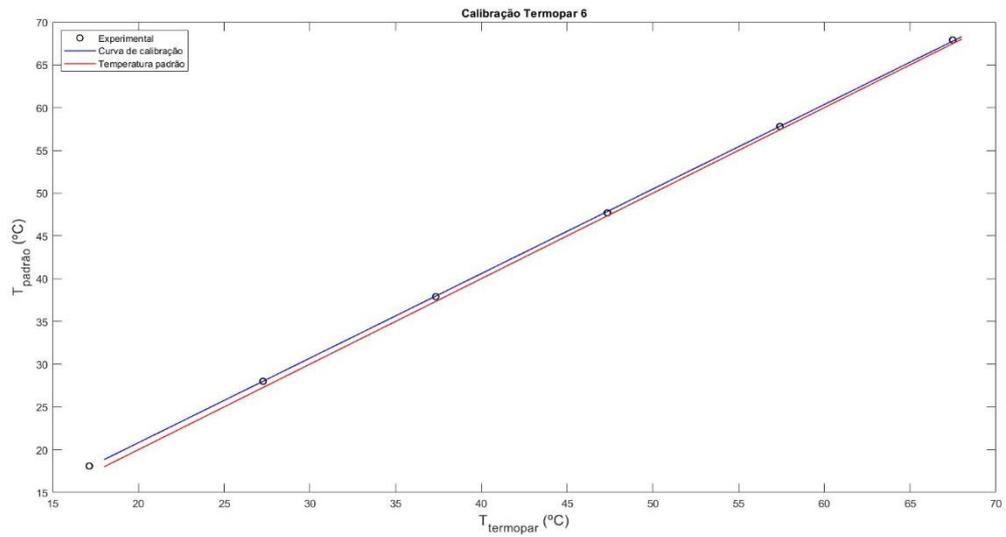


Figura B.7 – Curva de calibração do termopar 6 - Bancada 2.



### Apêndice C – Cálculo das incertezas de medição dos termopares

A incerteza de medição de cada termopar foi calculada através do erro de precisão das medidas de temperatura durante a calibração. O erro de precisão incorpora todas as influências aleatórias no sistema de medição, assumindo que o sinal medido é estável e sem flutuações. Este erro é subdividido em erro aleatório e erro de calibração.

O erro aleatório é o erro devido a variações aleatórias com respeito a calibração, ou seja, é um erro associado à discrepância entre várias medições de uma mesma temperatura. Como a medição desejada é a média de N medições, o erro de precisão da média de uma única medição devido a variações aleatórias é:

$$S_{rnd;meas} = \frac{\sigma}{\sqrt{N-1}} \quad (27)$$

Onde  $S_{rnd;meas}$  é o erro aleatório de uma medição e  $\sigma$  representa o desvio padrão das N medições.

Como k rodadas em condições estáveis foram realizadas (k rodadas com N medições em cada), a variação aleatória total deve ser estimada pela raiz quadrada média (RMS):

$$S_{rnd;total} = \sqrt{\frac{\sum (S_{rnd;meas})^2}{k}} \quad (28)$$

Onde o número de graus de liberdade é  $k(N-1)$ .

O erro de calibração serve para determinar quão boa é a curva de calibração obtida. A forma mais direta de obter este erro é calcular o erro RMS entre os dados de referência utilizados para obter a curva de calibração e a própria curva obtida. Sendo  $f(x_i)$  a função obtida para a temperatura e  $Y_i$  a temperatura padrão, o erro de calibração incorpora a diferença entre estes dois parâmetros para cada medição, segundo a equação:

$$S_{cal} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^k [f(x_i) - Y_i]^2}{k}} \quad (29)$$

O erro total ( $S_{total}$ ) para o termopar é calculada usando a raiz quadrada da soma dos quadrados dos erros calculados (erro aleatório e erro de calibração):

$$S_{total} = \sqrt{S_{rnd}^2 + S_{cal}^2} \quad (30)$$

Para a obtenção de uma calibração com erro reduzido, foram obtidas 6 amostras independentes para cada sensor.

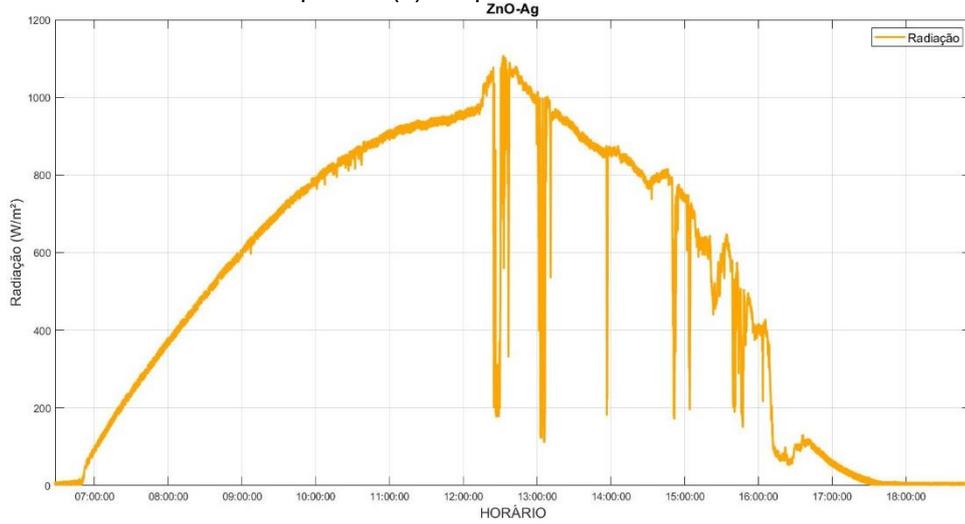
A incerteza total do sensor pode ser determinada através da equação:

$$U_{total} = B_{total} + t_{95} \cdot S_{total} \quad (31)$$

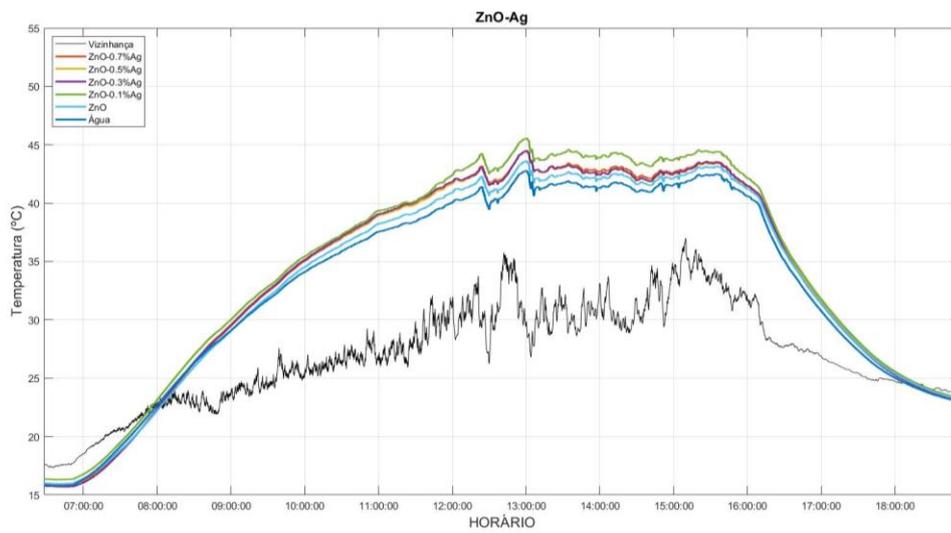
Onde  $U_{total}$  representa a incerteza total de cada medição do termopar,  $B_{total}$  representa o erro sistemático total e  $t_{95}$  é o valor da distribuição t de student com 95% de confiança para o número de graus de liberdade da calibração.

## Apêndice D – Dados relativos aos últimos dias de testes na Bancada 1

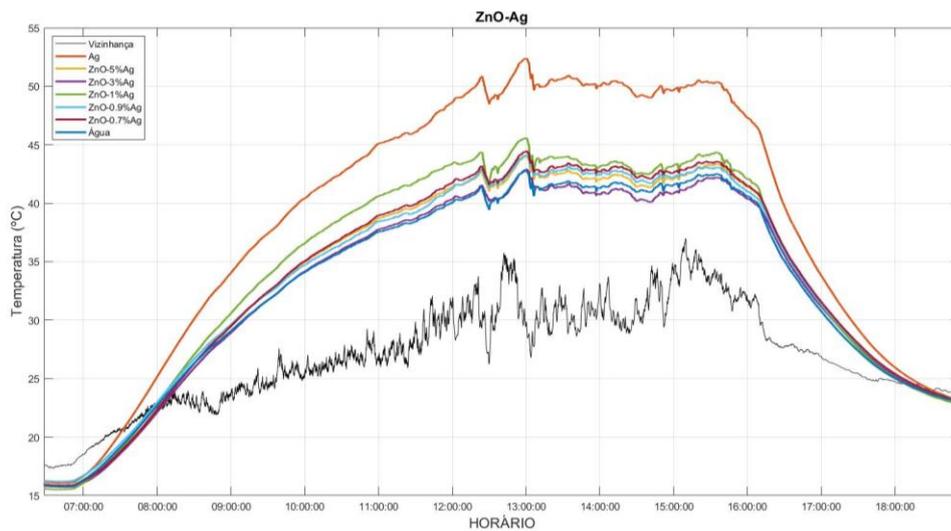
Figura D.1 - Perfis do dia 19/6/19 (ZnO-Ag/Água) de (a) radiação solar incidente, (b) temperatura das amostras com menor teor de prata e (c) temperatura das amostras com maior teor de prata



(a)

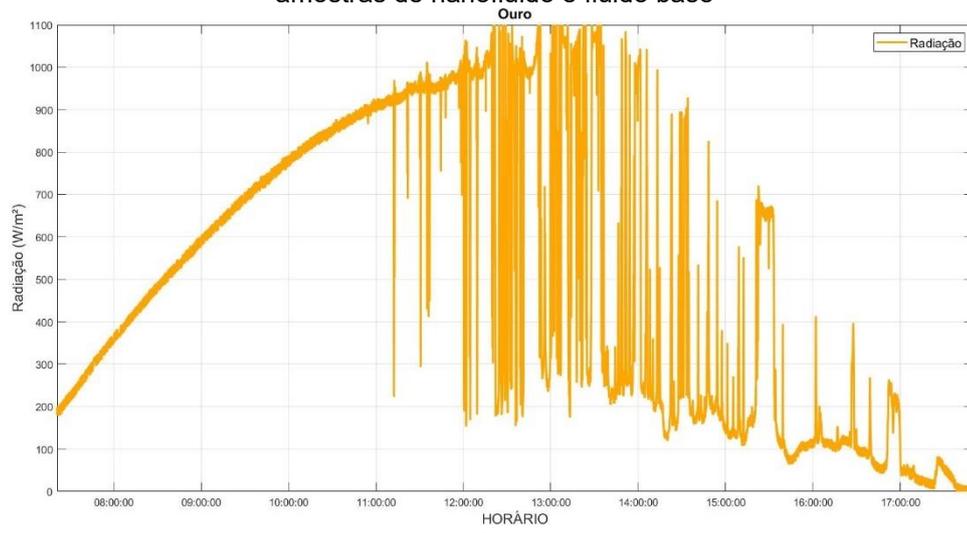


(b)

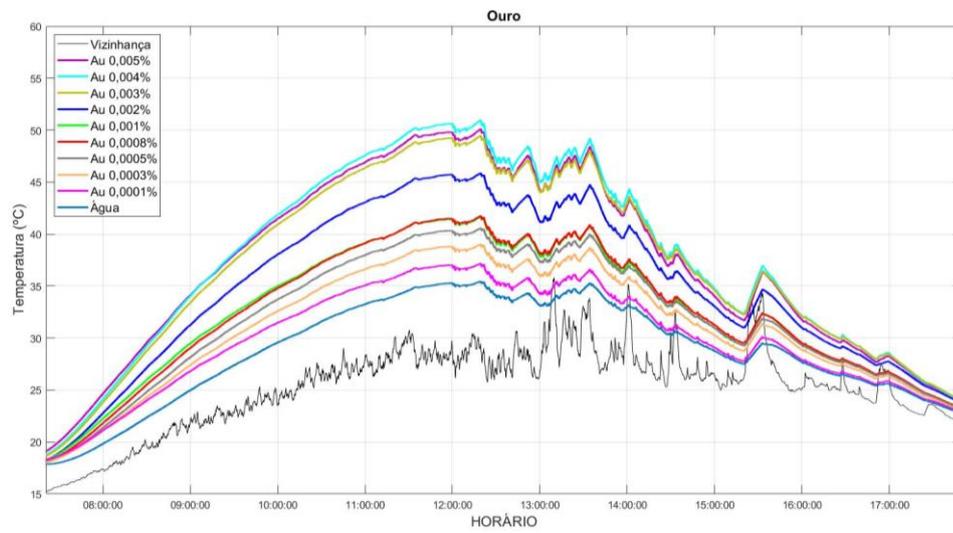


(c)

Figura D.2 - Perfis do dia 15/6/20 (Au/Água) de (a) radiação solar incidente, (b) temperatura das amostras de nanofluido e fluido base



(a)



(b)

Figura D.3 - Perfis do dia 20/10/19 (MWCNT/Água) de (a) radiação solar incidente, (b) temperatura das amostras com menor concentração e (c) temperatura das amostras com maior concentração

