

GABRIELA SOARES SANTOS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COLETORES
SOLARES UTILIZANDO NANOFUIDOS DE
GRAFENO EM ÁGUA DESTILADA**



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

2023

GABRIELA SOARES SANTOS

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DE COLETORES
SOLARES UTILIZANDO NANOFUIDOS DE
GRAFENO EM ÁGUA DESTILADA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Mecânica da Universidade Federal de Uberlândia, como parte dos requisitos para obtenção do título de MESTRE 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).

S237
2023

Santos, Gabriela Soares, 1993-
Avaliação do desempenho de coletores solares
utilizando nanofluidos de grafeno em água destilada
[recurso eletrônico] / Gabriela Soares Santos. - 2023.

Orientador: Enio Pedone Bandarra Filho.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de
Uberlândia, Pós-graduação em Engenharia Mecânica.
Modo de acesso: Internet.
Disponível em: <http://doi.org/10.14393/ufu.di.2023.83>
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:	Dissertação de Mestrado Acadêmico, nº 628, PPGEM				
Data:	07/02/2023	Hora de início:	8:00	Hora de encerramento:	10:00
Matrícula do Discente:	12022EMC007				
Nome do Discente:	Gabriela Soares Santos				
Título do Trabalho:	Avaliação do desempenho de coletores solares utilizando nanofluidos de grafeno em água destilada				
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: Solidônio Rodrigues de Carvalho - FEMEC/UFU; José Roberto Simões Moreira - USP; e Enio Pedone Bandarra Filho - FEMEC/UFU, orientador da candidata.

Iniciando os trabalhos o presidente da mesa, Dr. Enio Pedone Bandarra Filho, apresentou a Comissão Examinadora e a candidata, 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). Última 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 Mestre.

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 07/02/2023, às 09:59, 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 **Solidonio Rodrigues de Carvalho, Professor(a) do Magistério Superior**, em 07/02/2023, às 10:05, 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 09/02/2023, às 16:39, 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, informando o código verificador **4242213** e o código CRC **1DCC3CE9**.

À Deus, aos meus pais e ao meu marido.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por manter seu cuidado sobre mim e permitir a conclusão de mais uma etapa na minha vida.

Aos meus pais Adenor e Eliane, pelo apoio e carinho que me dão desde sempre.

Ao meu marido Nailton Jr, pelo amor, incentivo e compreensão oferecidos.

A minha família pelo carinho e motivação.

Aos meus amigos que se mantiveram presentes, e ao novos que encontrei nessa jornada, em especial Dijane e Carolina.

Ao meu orientador Prof. Enio Bandarra, pelo acompanhamento competente.

Aos meus colegas de laboratório pelo acolhimento e ajuda oferecidos.

A Universidade Federal de Uberlândia e a Faculdade de Engenharia Mecânica que forneceram infraestrutura para minha formação, e a Universidade Federal do Triângulo Mineiro, pelo material cedido.

Ao CNPq e CAPES pelo suporte financeiro, que garantiu minha permanência no curso.

E por fim, agradeço a todos aqueles que contribuíram de alguma maneira para a realização desse trabalho.

SANTOS, G. S., **Avaliação do desempenho de coletores solares utilizando nanofluidos de grafeno em água destilada**. 2023. 150 f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia, Brasil.

RESUMO

O presente trabalho aborda experimentalmente o uso de nanofluidos de grafeno em água destilada em coletores solares de placa plana. Os nanofluidos avaliados foram produzidos nas concentrações volumétricas de 5 ppm, 10 ppm e 20 ppm. Foi construída e instrumentada uma bancada experimental com três coletores solares para aquecimento de água atuando nas condições: coletor de placa plana tradicional, coletor sem placa absorvedora e com uso de nanofluido como meio de absorção, e coletor com placa absorvedora e com uso de nanofluido. Os testes foram realizados em três etapas avaliando cada concentração à exposição solar por 5 dias consecutivos. Os resultados mostraram maiores temperaturas de saída e de variação de temperatura na condição de ação conjunta placa absorvedora e nanofluido, garantindo um aumento na variação de temperatura de até 8,44 % em comparação ao coletor tradicional. Para este coletor, utilizando o nanofluido na concentração de 5 ppm, foi verificada a maior eficiência, com máximo de 45,10%, as demais concentrações não mostraram-se vantajosas em relação ao coletor tradicional. A condição com uso apenas do nanofluido não apresentou ganhos em relação ao coletor tradicional, indicando dessa forma que a remoção da placa absorvedora para substituição pelo nanofluido não foi viável. Considerando a avaliação da estabilidade foi identificada sua diminuição com o aumento da concentração, obtendo neste estudo o nanofluido de 20 ppm com pior estabilidade, por inspeção visual, notando-se a maior formação e deposição de aglomerados de nanopartículas, além dos resultados de absorbância mostrarem redução de até 96,32 % após exposição à radiação solar, em comparação a amostra inicial.

Palavras-chave: nanofluidos, coletor solar, grafeno.

ABSTRACT

This work experimentally approaches the use of graphene nanofluids in distilled water in flat plate solar collectors. The evaluated nanofluids were produced in volumetric concentrations of 5 ppm, 10 ppm and 20 ppm. An experimental bench was built and instrumented with three solar collectors for heating water operating under the conditions: traditional flat plate collector, collector without absorber plate and using nanofluid as an absorption medium, and collector with absorber plate and using nanofluid. The tests were carried out in three stages, evaluating each concentration to sun exposure for 5 consecutive days. The results showed higher outlet temperatures and temperature variation in the joint action condition absorber plate and nanofluid, ensuring an increase in temperature variation of up to 8.44% compared to the traditional collector. For this collector, using the nanofluid at a concentration of 5 ppm, the highest efficiency was verified, with a maximum of 45.10%, the other concentrations did not prove to be advantageous in relation to the traditional collector. The condition using only the nanofluid did not show gains in relation to the traditional collector, thus indicating that removing the absorber plate to replace it with the nanofluid was not viable. Considering the stability assessment, its decrease was identified with increasing concentration, obtaining in this study the 20 ppm nanofluid with the worst stability, by visual inspection, noting the greater formation and deposition of nanoparticle agglomerates, in addition to the absorbance results showing reduction of up to 96.32% after exposure to solar radiation, compared to the initial sample.

Keywords: nanofluids, solar collector, graphene.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1.1. Comparativo das médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa. Fonte: Pereira et al. (2017)	2
Figura 1.2. Número de trabalhos indexados na plataforma ScienceDirect com as palavras-chave “nanofluids+solar”. Fonte: ScienceDirect (2023).....	4
Figura 2.1. Esquema dos mecanismos de estabilização para nanofluidos: a) estabilização eletrostática, b) estabilização estérica, c e d) estabilização eletroestérica. Fonte: Yu et al. (2017)	8
Figura 2.2. Imagens TEM de agregações de nanofluidos TiO ₂ /água com 0,25 vol%: a) pH 2; b) pH 7; c) pH 12. Fonte: Zhang et al. (2021)	9
Figura 2.3. Diagrama esquemático: a) sonificador de sonda; b) banho ultrassônico. Fonte: Adaptado de Urmi et al. (2021)	10
Figura 2.4. Potencial zeta de nanofluidos. Fonte: Adaptado de Mukherjee e Paria (2013).....	11
Figura 2.5. Esquema de medição transmitância / absorvância. Fonte: Adaptado de Chakraborty e Panigrahi (2020).....	12
Figura 2.6. Coletor solar de placa plana. Fonte: Adaptado de Kalogirou (2004).....	13
Figura 2.7. Diagrama esquemático de um coletor de tubo evacuado. Fonte: Adaptado de Sabiha et al. (2015).....	14
Figura 2.8. Esquema de um coletor de calha parabólica. Fonte: Adaptado de Ahmed et al. (2021)	15
Figura 2.9. Diagrama esquemático de um aquecedor solar de água com termossifão. Fonte: Adaptado de Kalogirou (2004)	15
Figura 2.10. Tipos de nanopartículas e fluidos base usados em nanofluidos para aplicações de energia solar. Fonte: Adaptado de Sahin et al. (2020)	16
Figura 2.11. Configuração experimental do coletor solar de placa plana. Fonte: Yousefi <i>et al.</i> , 2012.a	17
Figura 2.12. Curva de temperatura de nanofluidos Cu–H ₂ O: a) com diferentes frações mássicas. (Cu: 50 nm, T _a é a temperatura do ar ambiente); b) com diferentes tamanhos de partículas (0,1% em peso). Fonte: Adaptado de He <i>et al.</i> (2013).....	19
Figura 2.13. Diagrama esquemático da configuração experimental (1. Coletor 2. Bomba 3. Calor 4. Tanque 5. Termômetro 6. Medidor solar 7. Válvula de controle 8. Válvula automatizada 9. Rotâmetro). Fonte: Adaptado de Moghadam <i>et al.</i> (2014).....	20

Figura 2.14. Exemplo de perfil de temperatura dos testes (onde b e u referem-se a termopares localizados nas posições inferior e superior, respectivamente). Fonte: Adaptado de Bandarra Filho <i>et al.</i> (2014)	21
Figura 2.15. Esquema de montagem experimental. Fonte: Adaptado de Meibodi <i>et al.</i> (2015)	22
Figura 2.16. a) Condutividade térmica; b) Dados experimentais para nanofluido de 0,2 %vol. (onde, η_1 , η_2 e η_3 representam a eficiência para vazão mássica de 0,008, 0,017 e 0,025 kg/s respectivamente). Fonte: Adaptado de Sabiha <i>et al.</i> (2015)	23
Figura 2.17. Variação de eficiência do coletor solar de tubo em U evacuado. Fonte: Adaptado de Tong, Kim e Cho (2015).....	24
Figura 2.18. Imagem do coletor solar de absorção direta. Fonte: Adaptado de Gupta, Agrawal e Mathur (2015).....	24
Figura 2.19. Eficiência do coletor solar de placa plana com nanofluidos de Cu-H ₂ O a) Cu:25 nm; b) 0,1% em peso, Cu: 25 nm, 50 nm. Fonte: Adaptado de He, Zeng e Wang (2015)	26
Figura 2.20. Montagem experimental do coletor solar de placa plana. Fonte: Noghrehabadi, Hajidavalloo e Moravej (2016).....	27
Figura 2.21. Sistema experimental do coletor solar parabólico de absorção direta. Fonte: Menbari, Alemrajabi e Rezaei (2016).....	28
Figura 2.22. Efeito da fração volumétrica de nanopartículas na eficiência térmica do coletor (MOD e EXP representam métodos analíticos e experimentais respectivamente). Fonte: Adaptado de Menbari, Alemrajabi e Rezaei (2016)	28
Figura 2.23. Montagem experimental do coletor solar de placa plana. Fonte: Verma, Tiwari e Chauhan (2016)	29
Figura 2.24. a) Eficiência do coletor e as concentrações volumétricas de partículas; b) Eficiência versus vazão mássica para vários nanofluidos. Fonte: Verma, Tiwari e Chauhan (2017).....	30
Figura 2.25. Efeito da concentração e vazão volumétrica a) na diferença de temperatura; b) na eficiência térmica. Fonte: Adaptado de Iranmanesh <i>et al.</i> (2017).....	31
Figura 2.26. Variação da eficiência do coletor solar de tubo em U a) em função do nanofluido da concentração do nanofluido; b) em função do tamanho de nanopartículas. Fonte: Adaptado de Kim <i>et al.</i> (2017).....	32
Figura 2.27. Eficiência térmica e diferença de temperatura para o fluido base e três diferentes frações volumétricas de duas nanopartículas (MWCNT e nanossílica). Fonte: Adaptado de Kasaeian <i>et al.</i> (2017)	33

Figura 2.28. Variação da eficiência do coletor de acordo com a temperatura reduzida: a) em diferentes concentração de nanofluido; b) com diferentes vazões mássicas. Fonte: Adaptado de Kaya, Arslan e Eltugral (2018).....	33
Figura 2.29. A eficiência do coletor solar de placa plana usando mistura nanofluido de 0,1 e 0,2% em peso a 2,0 L/min de vazão volumétrica. Fonte: Adaptado de Farajzadeh, Movahed e Hosseini (2018).....	35
Figura 2.30. Eficiência vs (vol.%) partícula em vazão constante. Fonte: Adaptado de Verma <i>et al.</i> (2018).....	36
Figura 2.31. Comparação de eficiência para o coletor solar de placa plana usando água, nanofluido de Al ₂ O ₃ e nanofluido de CuO. Fonte: Adaptado de Tong <i>et al.</i> (2019).....	37
Figura 2.32. Dependência da eficiência térmica do coletor solar da temperatura reduzida para metanol e nanofluidos em duas frações mássicas diferentes: a) vazão: 1 L/min; b) vazão: 3 L/min. Fonte: Adaptado de Sarafraz e Safaei (2019)	39
Figura 2.33. Eficiência térmica média do aparato experimental usando água e nanofluido de MLG como fluidos de trabalho. Fonte: Adaptado de Natividade <i>et al.</i> (2019).....	40
Figura 2.34. Eficiência do coletor em função da vazão para água pura e nanofluidos TiO ₂ / água. Fonte: Adaptado de Moravej <i>et al.</i> (2020).....	41
Figura 2.35. Variação da eficiência do coletor. Fonte: Adaptado de Kaya, Alkasem e Arslan (2020).....	42
Figura 2.36. Eficiência térmica e eficiência exergética em várias vazões. Fonte: Adaptado de Joseph, Sreekumar e Thomas (2020).....	43
Figura 2.37. Diminuição da área coletora em relação à concentração volumétrica do nanofluido. Fonte: Adaptado de Sundar <i>et al.</i> (2020).....	45
Figura 2.38. Fotografia (a) do coletor solar de placa plana (b) do coletos solar de tubo evacuado (c) da luz solar artificial. Fonte: Adaptado de Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021)	46
Figura 2.39. Esquema do coletor solar tubular de absorção direta: a) Vista frontal; b) Vista lateral. Fonte: Adaptado de Struchalin <i>et. al</i> (2021).....	47
Figura 2.40. Efeito do fluido de trabalho e vazão na eficiência do coletor: a) Com tubo em U b) sem tubo em U. Fonte: Adaptado de Dehaj <i>et al.</i> (2021).....	48
Figura 2.41. Eficiência de conversão fototérmica dos nanofluidos de MXene e grafeno. Fonte: Adaptado de Wang <i>et al.</i> (2021).....	49
Figura 2.42. a) Esquema do coletor solar; b) Tubo receptor de absorção superficial (tubo de cobre revestido de grafite); c) Tubo receptor de absorção volumétrica (tubo de policarbonato). Fonte: Adaptado de Ham, Shin e Cho (2022).	51

Figura 2.43. a) Esquema de instalação do coletor solar parabólico de absorção direta b) Coletor parabólico. Fonte: Adaptado de Joseph e Thomas (2022)	52
Figura 3.1. Foto do coletor solar com placa absorvedora	60
Figura 3.2. Foto do coletor solar sem placa absorvedora.....	60
Figura 3.3. Foto do reservatório de água.....	61
Figura 3.4. Foto do termopar tipo T utilizado nas entradas e saídas dos coletores solares.....	62
Figura 3.5. Sistema de aquisição de temperatura: a) Chassi NI cDAQ-9178, b) Módulo de aquisição NI 9213	62
Figura 3.6. Foto do Medidor de Energia Solar – MES 200 / Instrutherm.....	63
Figura 3.7. Interface do programa no LabView para aquisição de temperatura	64
Figura 3.8. Interface do programa Run Solar Meter para aquisição de radiação solar	64
Figura 3.9. Foto da bancada experimental montada nos dias de teste	65
Figura 3.10. Foto do Sonicador Q500 / Qsonica	67
Figura 3.11. Foto dos nanofluidos produzidos: a) 0,0005 %; b) 0,0010 % e c) 0,0020 %	68
Figura 3.12. Posicionamento dos coletores na banca experimental	70
Figura 3.13. Espectrofotômetro UV – 1900 / Shimadzu.....	71
Figura 3.14. Desenho esquemático do sistema de aquecimento. Fonte: Adaptado de Siqueira (2003).....	73
Figura 4.1. Perfis de temperatura dos testes 1ª condição de validação dia 22/07/22	76
Figura 4.2. Perfil de radiação do dia 22/07/22	77
Figura 4.3. Perfis de temperatura e radiação dos testes na 1ª condição de validação dia 25/07/22	77
Figura 4.4. Perfis de temperatura dos testes 2ª condição de validação dia 27/07/22	78
Figura 4.5. Perfis de temperatura dos testes 2ª condição de validação dia 29/07/22	79
Figura 4.6. Perfis de temperatura e radiação dos testes 2ª condição de validação dia 30/07/22	80
Figura 4.7. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 1: 24/08/22	81
Figura 4.8. Perfil de radiação do dia 24/08/22	82
Figura 4.9. Diferença de temperatura dos coletores do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 1: 24/08/22.....	82
Figura 4.10. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 5: 28/08/22	83
Figura 4.11. Perfil de radiação do dia 28/08/22	83
Figura 4.12. Diferença de temperatura dos coletores com nanofluido de 5 ppm – dia 5: 28/07/22	84

Figura 4.13. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 1: 29/08/22	85
Figura 4.14. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 1: 29/08/22	86
Figura 4.15. Perfil de radiação dia 29/08/22	87
Figura 4.16. Perfil de radiação dia 02/09/22	87
Figura 4.17. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 5: 02/09/22	88
Figura 4.18. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 5: 02/09/22	89
Figura 4.19. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 1: 03/09/22	90
Figura 4.20. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 1: 03/09/22.....	91
Figura 4.21. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 1: 03/09/22	91
Figura 4.22. Perfil de radiação do dia 07/09/22	92
Figura 4.23. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 5: 07/09/22	92
Figura 4.24. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 5: 07/09/22	93
Figura 4.25. Valores médios de máximas diferenças de temperaturas para os coletores	95
Figura 4.26. Diferenças de temperaturas dos coletores 2 e 3 de acordo com concentração do nanofluido.....	96
Figura 4.27. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 5 ppm – 27/08/22	98
Figura 4.28. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 10 ppm – 01/09/22	98
Figura 4.29. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 20 ppm – 06/09/22	99
Figura 4.30. Comparativo das eficiências térmicas máximas dos coletores	100
Figura 4.31. Comparativo de absorbância entre amostras iniciais	101
Figura 4.32. Resultados da absorbância do nanofluido de 5 ppm	102
Figura 4.33. Resultados da absorbância do nanofluido de 10 ppm	102
Figura 4.34. Resultados da absorbância do nanofluido de 20 ppm	103
Figura 4.35. Fotos dos coletor 3 com nanofluido de 5 ppm a) 1° dia; b) 5° dia	104
Figura 4.36. Fotos dos coletor 2 com nanofluido de 5 ppm a) 1° dia; b) 5° dia	105
Figura 4.37. Fotos dos coletor 2 com nanofluido de 10 ppm a) 1° dia; b) 5° dia	106

Figura 4.38. Fotos dos coletor 3 com nanofluido de 10 ppm a) 1º dia; b) 5º dia	106
Figura 4.39. Detalhes de deposição no coletor 3 com nanofluido de 10 ppm - 5º dia de teste	107
Figura 4.40. Fotos dos coletores com nanofluido de 20 ppm - 1º dia de teste: a) Coletor 2; b) Coletor 3	108
Figura 4.41. Detalhe deposição no coletor 2 com nanofluido de 20 ppm - 3º dia de teste	108
Figura 4.42. Detalhe deposição no coletor 3 com nanofluido de 20 ppm - 3º dia de teste	109
Figura 4.43. Fotos dos coletores com nanofluido de 20 ppm - 5º dia de teste: a) Coletor 2; b) Coletor 3	109
Figura 4.44. Detalhe deposição no coletor 3 com nanofluido de 20 ppm - 5º dia de teste	110

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1. Resumo dos trabalhos revisados de aplicação de nanofluidos em coletores solares	52
Tabela 3.1. Valores das incertezas de medição associadas aos termopares	66
Tabela 3.2. Características da amostra inicial mais concentrada de nanofluido	67
Tabela 3.3. Dados para produção das amostras de nanofluido.....	67
Tabela 3.4. Condições de avaliação dos coletores nos testes experimentais	70
Tabela 4.1. Valores máximos obtidos para as diferenças de temperatura (ΔT) de entrada e saída dos coletores	94
Tabela 4.2. Valores médios das máximas diferenças de temperatura nos coletores	95

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIACÕES**Arábico**

T: temperatura (°C)

t: tempo (s)

V: volume [ml]

Q_u : taxa de calor útil proveniente dos coletores solares [W]

\dot{m} : vazão mássica [kg/s]

cp: calor específico [J/kg.°C]

\bar{x} : média

s: desvio padrão

MWCNT: nanotubos de carbono de paredes múltiplas

SWCNT: nanotubos de carbono de parede simples

Grego

ΔT : variação na temperatura [°C]

ϕ : concentração [%]

ρ : massa específica [g/cm³]

μ : viscosidade dinâmica [Ns/m²]

η : eficiência

Subscrito

np: nanopartículas

fb: fluido base

m: mássica

v: volumétrica

ent: entrada

saí: saída

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	1
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Motivação.....	1
1.2. Objetivos	4
1.2.1. Objetivo geral	4
1.2.2. Objetivos específicos	4
1.3. Estrutura da dissertação	5
 CAPÍTULO 2	 6
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	6
2.1. Nanofluidos	6
2.1.1. Preparação de nanofluidos	7
2.1.2. Estabilidade de nanofluidos	7
2.2. Coletores solares.....	12
2.3. Aplicação de nanofluidos em coletores solares.....	17
 CAPÍTULO 3	 59
3. MATERIAIS E MÉTODOS	59
3.1. Bancada experimental.....	59
3.2. Calibração e análise de incertezas	65
3.2.1. Termopares.....	65
3.3. Nanofluido.....	66
3.4. Procedimentos experimentais.....	68
3.4.1. Instalação da bancada experimental	68
3.4.2. Validação da bancada experimental	69
3.4.3. Condições de realização dos testes experimentais	69
3.5. Equações governantes	72
 CAPÍTULO 4	 76
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	76
4.1. Validação.....	76
4.2. Testes experimentais	80
4.2.1. Concentração de 5 ppm.....	80

4.2.2.	Concentração de 10 ppm.....	85
4.2.3.	Concentração de 20 ppm.....	89
4.2.4.	Comparativo entre as concentrações.....	94
4.2.5.	Eficiência.....	97
4.3.	Avaliação da estabilidade.....	101
CAPÍTULO 5		111
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS	111
5.1.	Perspectivas de trabalhos futuros.....	113
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		114
APÊNDICE A – Curvas de calibração dos termopares.....		122
APÊNDICE B – Procedimento para o cálculo da incerteza de medição.....		128
APÊNDICE C – Perfis de radiação, temperatura e eficiência dos demais dias de teste		130

CAPÍTULO 1

1. INTRODUÇÃO

1.1. Motivação

Os avanços tecnológicos têm sido cada vez mais intensificados na atualidade, impulsionando também a busca por fontes alternativas de energia. De acordo com Baz *et al.* (2021), a energia pode ser considerada um importante indicador da economia e desenvolvimento social de um país, visto que, uma aceleração da economia não é possível sem um equilíbrio eficiente entre sua demanda e seu fornecimento.

Durante muito tempo a matriz energética mundial foi direcionada para o consumo de combustíveis fósseis, como carvão, petróleo e gás natural. As tecnologias de produção relativamente avançadas e baratas dos combustíveis fósseis, proporcionaram o seu uso nos últimos dois séculos, no entanto, a crise do petróleo em 1973 criou um ambiente inseguro para a demanda mundial de energia (SHAHBAZ *et al.*, 2021). Conforme apontado por Kalogirou (2004), o uso dos combustíveis fósseis trazem implicações quanto às limitações das reservas, confrontando com uma situação em que o preço dos combustíveis tem aumentado à medida que as reservas diminuem. Além da crescente escassez de combustíveis fósseis, outro ponto a ser destacado, consiste na preocupação com a poluição ambiental causada pela sua queima.

A principal causa da concentração das emissões de gases de efeito estufa (GEE) pode ser atribuída à queima de combustível fóssil, e um aumento expressivo da emissão de GEE é acompanhado por várias consequências adversas, incluindo um aumento inesperado de temperatura e consequentemente aumento do nível do mar (SHAFIULLAH *et al.*, 2021). Dessa forma, buscando alternativas que superem os impactos negativos associados ao uso de combustíveis fósseis, as energias renováveis vêm ganhando espaço como solução para sustentar a crescente demanda de energia, atenuando as preocupações para a garantia do desenvolvimento econômico sem prejuízo a sociedade e ao ambiente.

As energia renováveis são, de forma geral, extraídas de fontes naturais ilimitadas e que são restauradas dentro de um breve período de tempo (FARHANA *et al.*, 2019). Solangi *et al.* (2011) defende que disponibilidade de energia barata e abundante com mínimos riscos ambientais e ecológicos referentes à sua produção e uso é um fator que contribui para melhoria da qualidade de vida das pessoas.

Os debates mundiais sobre desenvolvimento sustentável frequentemente trazem

relações sobre o uso de energias renováveis. Em 2015, a Cúpula das Nações Unidas reuniu diversos países para discutir novos caminhos sobre a melhoria de vida das pessoas, discussões estas que resultaram na construção dos 17 Objetivos do Desenvolvimento Sustentável (ODS), dentre eles, o Objetivo 7: Energia limpa e acessível, que visa assegurar o acesso confiável, sustentável, moderno e a preço acessível à energia para todas e todos (ONU, 2022).

Shahbaz *et al.* (2021) comentam que embora o uso de energia renovável no mundo esteja aumentando, sua participação no consumo final de energia não é satisfatório, e leva-se tempo para mudanças na infraestrutura e hábitos de consumo, os autores defendem que para aumentar a participação das energias renováveis devem ocorrer revisões das políticas energéticas implementadas, incentivo ao setor privado para essa produção de energia e mudanças nos padrões de consumo tanto para os consumidores industriais como consumidores finais.

Assim, frente a uma tendência de impulsionamento das energias renováveis, é interessante destacar o potencial de contribuição da energia solar, uma fonte limpa, abundante e que não contribui para a intensificação do efeito estufa. De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, desenvolvido no INPE por Pereira *et. al.* (2017), os níveis de irradiação solar do país são elevados e possuem baixa variabilidade mensal, a região Nordeste apresenta maior potencial solar, com valor médio do total diário da irradiação global horizontal de 5,49 kWh/m², seguidos das regiões Centro-Oeste e Sudeste, que apresentam valores próximos, 5,07 kWh/m² e 5,06 kWh/m² respectivamente, a região Norte com 4,64 kWh/m² e a região Sul com 4,53 kWh/m². Como visto na Fig. 1.1, as regiões Nordeste, Centro-Oeste e Sudeste superam Portugal e Espanha, em termos de irradiação solar média mensal, devendo ainda destacar a existência de uma variabilidade inferior.

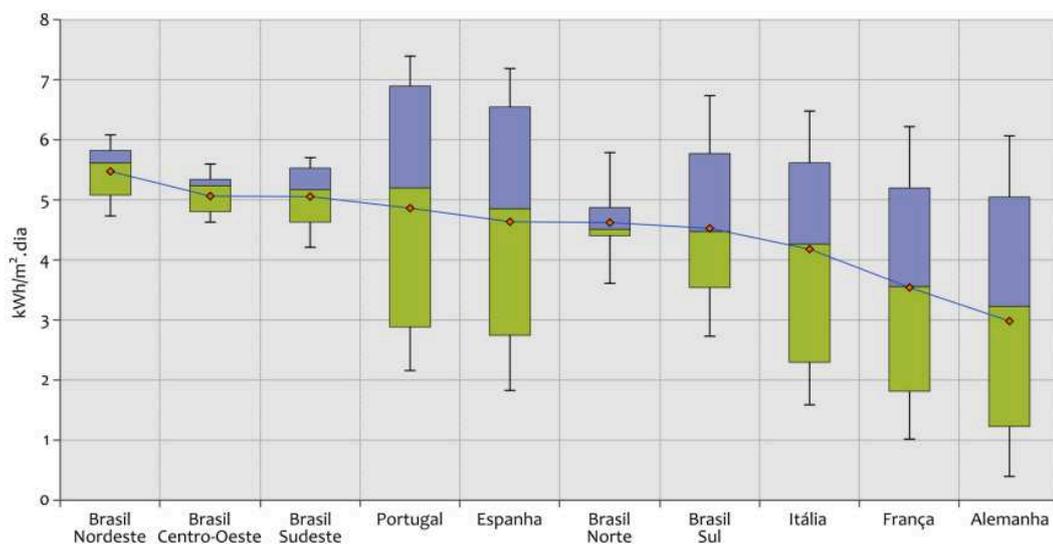


Figura 1.1. Comparativo das médias mensais da irradiação global horizontal no Brasil e em alguns países da Europa. Fonte: Pereira et al. (2017)

Uma das formas de aproveitamento da energia solar trata-se do uso de coletores solares, equipamentos capazes de promover a absorção da radiação solar e convertê-la em energia térmica. No Brasil, conforme apresentado no Atlas de Eficiência Energética – Brasil 2021 (EPE, 2022), a área total acumulada de coletores de sistemas de aquecimento solar atingiu 19,2 milhões m² em 2020, com destaque para o setor residencial, que representou quase 70 % da área instalada em 2020, o documento ainda ressalta que a utilização de sistemas de aquecimento solar pode reduzir o consumo de eletricidade da rede, a demanda de ponta em períodos críticos e as perdas técnicas no sistema.

No entanto, os fluidos tradicionalmente usados na transferência de calor apresentam algumas limitações quanto à condutividade térmica. Uma das vias de pesquisas que buscam melhorias quanto aos meios de absorção é o uso de nanofluidos, uma composição de nanopartículas dispersas em um fluido base. Os trabalhos desenvolvidos sobre esses fluidos apontam aprimoramento na condutividade térmica e em propriedades ópticas, despertando atenção de pesquisadores nos últimos anos. Li *et al.* (2021), destacaram que muitos cientistas buscam explorar o padrão de aumento anômalo da condutividade térmica dos nanofluidos, em trabalhos que investigam as propriedades das nanopartículas e da solução, a distribuição ou estado de agregação das nanopartículas na solução e os fatores que afetam a distribuição ou estado de agregação das nanopartículas na solução base.

De acordo com Urmi *et al.* (2021), os nanofluidos apresentam-se como recursos potenciais em diferentes campos como usinagem, transporte, eletrônica, sistemas de refrigeração nuclear, biomedicina e coletores solares. Li *et al.* (2021) ainda destaca aplicações na medicina, para transporte de medicamentos e destruição de células cancerígenas, e aplicações na exploração de petróleo.

O crescimento das pesquisas sobre esses fluidos pode ser evidenciado na Fig. 1.2, que apresenta os trabalhos publicados e indexados na plataforma ScienceDirect, mediante consulta com as palavras-chave “*nanofluids+solar*”, trazendo os resultados dos anos de 2005 até 2022.

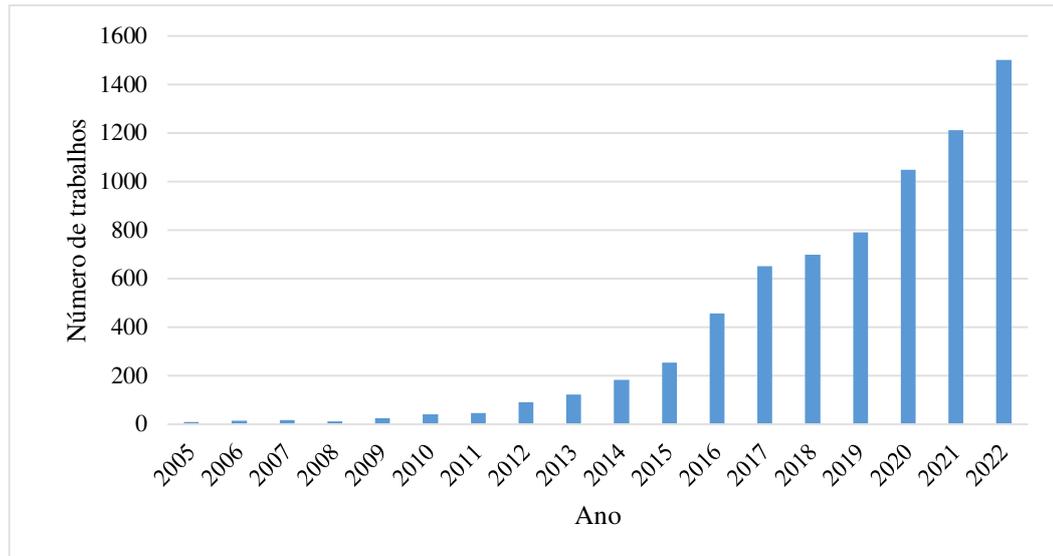


Figura 1.2. Número de trabalhos indexados na plataforma ScienceDirect com as palavras-chave “nanofluids+solar”. Fonte: ScienceDirect (2023)

Assim, diante dos fatos supracitados, a importância desse trabalho consiste no fortalecimento dos estudos voltados para análise de aproveitamento de energias renováveis, de maneira a contribuir para a expansão de investimentos nessa área, associado ao crescimento e expressividade que o uso de nanofluidos vem adquirindo na comunidade acadêmica.

1.2. Objetivos

1.2.1. Objetivo geral

Avaliar o desempenho de coletores solares para aquecimento de água que utilizem nanofluidos de grafeno em água destilada como meio de conversão fototérmica em diferentes concentrações de nanopartículas.

1.2.2. Objetivos específicos

- Construir uma bancada experimental para exposição solar dos nanofluidos e instrumentada para coleta de dados de temperatura durante os testes.
- Produzir nanofluidos estáveis para uso na bancada experimental
- Comparar o desempenho dos coletores solares com uso de nanofluido em relação ao coletor solar de placa plana tradicional.

1.3. Estrutura da dissertação

Este trabalho encontra-se dividido em cinco capítulos. Inicialmente, no Capítulo 1, é apresentada a introdução contemplando a contextualização do tema pesquisado e os objetivos propostos.

O Capítulo 2 traz uma revisão bibliográfica dos conceitos associados aos nanofluidos e coletores solares, pontuando características e aplicações, sendo feito como recorte para pesquisa os trabalhos desenvolvidos quanto ao uso de nanofluidos em coletores solares.

O Capítulo 3 apresenta qual processo metodológico foi utilizado para desenvolvimento do objetivo proposto, descrevendo os materiais, procedimentos e equações governantes que direcionaram este estudo.

No Capítulo 4 os resultados obtidos são apresentados e discutidos sob os pontos de perfis de temperatura, diferenças de temperaturas, observadas entre entradas e saídas dos coletores, eficiência e avaliação da estabilidade dos nanofluidos.

E por fim, no Capítulo 5 são apresentadas as conclusões mediante o estudo experimental, além das discussões referentes as considerações finais, e quais as perspectivas de trabalhos futuros.

CAPÍTULO 2

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. Nanofluidos

Nanofluido é uma suspensão formada pela dispersão de partículas de tamanho nanométrico em um fluido base. O conceito de nanofluidos foi proposto pela primeira vez por Choi e Eastman (1995) no Laboratório Nacional de Argonne, nos Estados Unidos. Estes autores apresentaram os nanofluidos como uma nova classe de fluidos de engenharia com alta condutividade térmica, propondo que exibem propriedades superiores quando comparados com fluidos de transferência de calor convencionais e fluidos que contenham partículas de ordem micrométrica.

As nanopartículas possuem condutividades térmicas com ordem de magnitude quase três vezes maior do que os fluidos base (GUPTA *et al.*, 2018). Os fluidos comumente utilizados para processos de transferência de calor, como água, óleos térmicos e etilenoglicol, têm comparativamente baixa condutividade térmica, proporcionando assim uma barreira para atingir altas taxas de transferência de calor, no entanto o desenvolvimento dos nanofluidos aparece como alternativa para superar tal barreira (SAHIN *et al.*, 2020).

Considerando os tipos de nanopartículas usadas para a síntese de nanofluidos, o nanofluido pode ser classificado em quatro categorias distintas: à base de metal, à base de óxido de metal, à base de carbono e híbrido.

De acordo Gupta *et al.* (2018) nanofluidos híbridos são preparados a partir de uma suspensão de dois ou mais tipos diferentes de nanopartículas ou compósitos híbridos em um único fluido base.

Os resultados quanto ao aprimoramento da transferência de calor tem incentivado pesquisadores quanto ao estudo dos nanofluidos. A adição de nanopartículas em fluidos convencionais mostra substancial melhoria na condutividade térmica, mas deve-se destacar como fatores que influenciam o desempenho termo-hidráulico dos nanofluidos a fração de volume ideal de nanopartículas, além do tipo, tamanho e forma das nanopartículas (AWIS *et al.*, 2021). Gupta *et al.* (2018) acrescenta ainda como fatores que influenciam a condutividade térmica de nanofluidos o uso de tensoativos, o pH e a vazão.

2.1.1. Preparação de nanofluidos

A preparação do nanofluido é feita tradicionalmente por dois métodos: método de um passo e método de dois passos.

O método de um passo consiste na síntese e dispersão das nanopartícula no fluido base simultaneamente, enquanto no método de dois passos após a sintetização das nanopartículas por diferentes técnicas, estas são dispersas no fluido base.

Gupta e Dixit (2021), indicam como vantagem do método de um passo que não há necessidade de transporte, armazenamento e secagem das nanopartículas, no entanto o desenvolvimento de resíduos como resultados de reações incompletas podem ficar presentes na suspensão, implicando assim em uma desvantagem do método.

Chakraborty e Panigrahi (2020) destacam que estabilidade do nanofluido preparado pelo método de um passo é superior em comparação como método de dois passos, no entanto, a produção por esse método em grande escala é impraticável devido ao seu alto custo de produção. De acordo com Sezer *et al.* (2019), o método de dois passos possui como vantagens a maior capacidade de produção e menor custo.

2.1.2. Estabilidade de nanofluidos

Conforme apontado por Chakraborty e Panigrahi (2020), um dos fatores críticos que limitam o uso generalizado de nanofluidos é a estabilidade. As nanopartículas mostram tendência de aglomeração devido à sua alta atividade, elas colidem entre si induzindo a formação de aglomerados das partículas suspensas, e tais aglomerados levam à desestabilização do nanofluido, diante da sedimentação de nanopartículas no fluido base.

Ali, Teixeira e Addali (2018) pontuaram que a interação entre as partículas no nanofluido tem o comportamento ligado a duas principais forças, a força atrativa de Van der Waals na superfície das partículas, que leva a formação de aglomerados que sedimentam devido a força gravitacional, e a força repulsiva de dupla camada elétrica, que tendem a separar as partículas, assim para alcançar um nanofluido estável, a força repulsiva elétrica de dupla camada deve superar a força atrativa de Van der Waals. Awais *et al.* (2021) apresentam que a estabilidade do nanofluido aumenta quando a presença de aglomerações e agregados é desprezível e a coagulação das partículas alivia após determinado tempo, no entanto, os autores afirmam que alcançar a completa homogeneidade das nanopartículas e solução de fluido de base ainda é um desafio técnico devido a alta interação pela intensa força de Van der Waals

entre nanopartículas.

Chakraborty e Panigrahi (2020) destacam que as propriedades termo-físicas do nanofluido como condutividade térmica e viscosidade são dependentes de sua estabilidade, reiterando que a baixa estabilidade do nanofluido pode prejudicar seu desempenho, uma vez que a agregação e sedimentação das partículas podem levar ao aumento da viscosidade, custo de bombeamento e propriedades térmicas inferiores, que são prejudiciais em várias aplicações. Os autores indicam como parâmetros que afetam a estabilidade do nanofluidos a constante dielétrica, pH do fluido base, potencial zeta, tamanho, forma e concentração das nanopartículas.

Existem diferentes abordagens para a estabilização de nanofluidos, estas são amplamente classificadas em técnicas químicas e mecânicas.

Considerando as técnicas químicas, a estabilização pode ocorrer de forma eletrostática, estérica e eletroestérica. Conforme descrito por Yu *et al.* (2017), e representado na Fig.2.1, na estabilização eletrostática, a sobreposição de dupla camada elétrica nas nanopartículas que causam a repulsão e proporcionam estabilidade na dispersão, na estabilização estérica ocorre a fixação de macromoléculas, normalmente cadeias de polímeros, na superfície das nanopartículas atuando como barreira estérica entre nanopartículas, e para a estabilização eletroestérica ocorre a ligação de cadeias de polímeros a superfícies de partículas carregadas ou ligação de cadeias de polieletrólitos a superfícies de partículas não carregadas, obtendo dessa forma um efeito combinado da estabilização eletrostática e estérica para a prevenção da aglomeração.

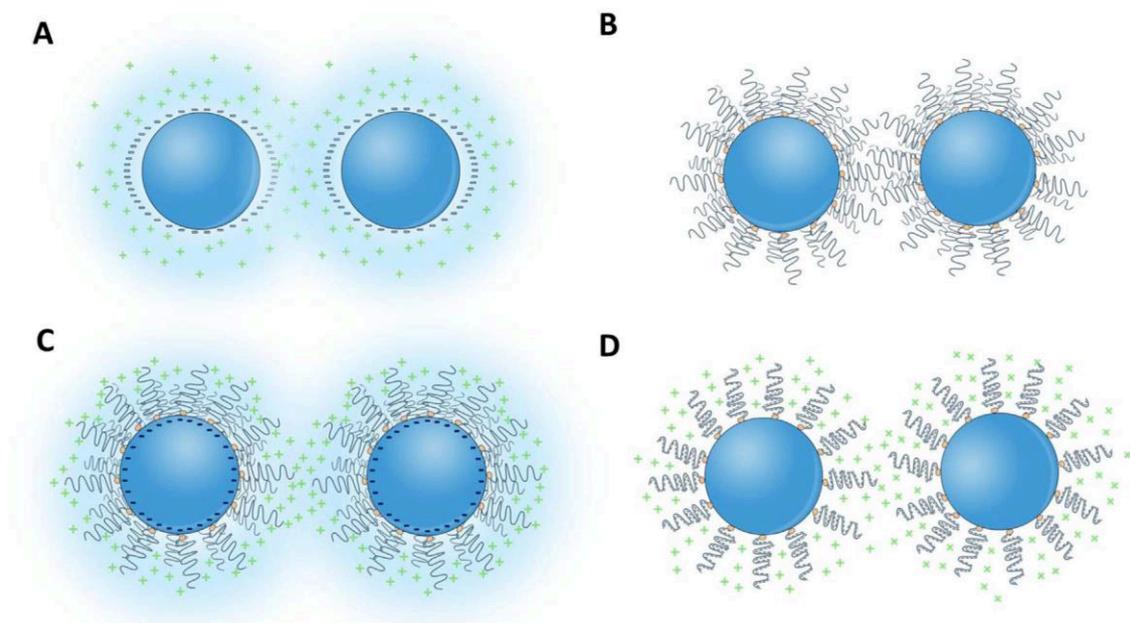


Figura 2.1. Esquema dos mecanismos de estabilização para nanofluidos: a) estabilização eletrostática, b) estabilização estérica, c e d) estabilização eletroestérica. Fonte: Yu *et al.* (2017)

De acordo com Chakraborty e Panigrahi (2020) a estabilização eletrostática é feita usando surfactante iônico, funcionalização de superfície e ajuste de pH, a estabilização estérica é feita pelo uso de surfactante não iônico e adição de polímero, e a estabilização eletroestérica, é obtida por uso de polímero iônico ou líquidos iônicos.

Dessa forma, para as técnicas químicas pode-se destacar a adição de surfactantes, ou ativadores de superfície, que modificam a energia interfacial para alcançar nanofluidos estáveis (AWAIS et al., 2021). Urmi *et al.* (2021) indicam como tensoativos comumente usados em nanofluidos o dodecil sulfato de sódio (SDS), dodecil benzeno sulfonato de sódio (SDBS), sal, ácido oléico, brometo de dodeciltrimetilamônio (DTAB), brometo hexadecil trimetilamônio (HCTAB), polivinil pirrolidona (PVP) e goma arábica.

A funcionalização da superfície promove modificações na superfície das nanopartículas antes da dispersão no fluido base, Sezer *et al.* (2019) apontam como aplicação típica a funcionalização de nanotubos de carbono (CNT) por tratamento ácido, onde são introduzidos eletroquimicamente ativos na superfície do CNT que melhoram sua dispersão na água.

A modificação do pH para estabilização do nanofluido está relacionado com o ponto isoelétrico. No ponto isoelétrico (IEP) a carga superficial é zero, dessa forma a força repulsiva entre as partículas é mínima, o que torna os nanofluidos instáveis, portanto ajustar o valor de pH da dispersão distanciando do IEP aumenta a estabilidade dos nanofluidos (YU *et al.*, 2017). A Fig.2.2 ilustra os efeitos do pH da estabilidade, onde Zhang *et al.* (2021) verificaram em seu trabalho maiores agregações de nanopartículas para o pH 7 do que o pH 2 e 12, considerando que o pH do IEP foi identificado como 6,5, quanto mais distante do IEP maior a estabilidade do nanofluido.

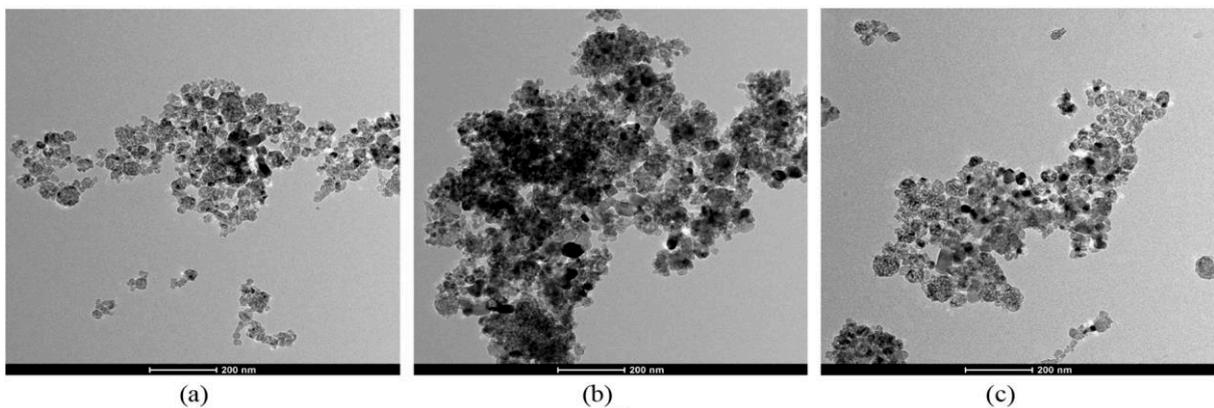


Figura 2.2. Imagens TEM de agregações de nanofluidos TiO_2 /água com 0,25 vol%: a) pH 2; b) pH 7; c) pH 12. Fonte: Zhang *et al.* (2021)

A estabilização por técnicas mecânicas ocorre pela quebra das aglomerações das nanopartículas, um desses métodos é a vibração ultrassônica, que pode ser feita por banho ultrassônico (método indireto) ou sonicador de sonda (método direto) que podem ser vistos na Fig.2.3, sendo que sonicador de sonda fornece resultado superior em termos de quebra de aglomerado de partículas (CHAKRABORTY E PANIGRAHI, 2020). Outras técnicas mecânicas utilizadas na preparação dos nanofluidos são homogeneizadores de alta pressão e agitadores magnéticos e mecânicos.

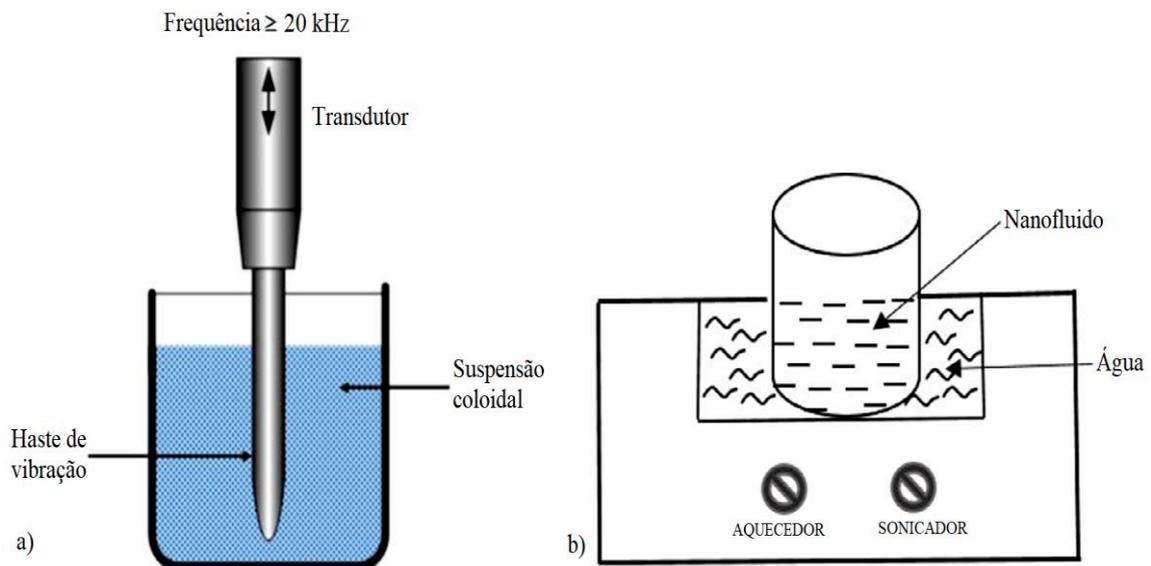


Figura 2.3. Diagrama esquemático: a) sonicador de sonda; b) banho ultrassônico. Fonte: Adaptado de Urmi *et al.* (2021)

A avaliação da estabilidade de nanofluidos é importante do ponto de vista para uso em aplicações práticas, as pesquisas realizadas sobre nanofluidos trazem várias técnicas de avaliação de estabilidade, com destaque para as técnicas de sedimentação, centrifugação, medição de potencial zeta, medição de absorvância, medição de transmitância, microscopia eletrônica e dispersão dinâmica de luz.

Urmi *et al.* (2021) destacaram a sedimentação como uma técnica simples e amplamente utilizada, onde a estabilidade é avaliada por inspeção visual, mas os autores pontuam a necessidade de muito tempo para observar a sedimentação das partículas, visto que nessa técnica o fluido é considerado estável para o período de tempo específico em que a concentração de nanofluido se mantém consistente. Assim, a centrifugação é uma alternativa mais rápida a sedimentação para determinar a estabilidade do nanofluido, onde é feito um exame visual da sedimentação usando um analisador de dispersão centrífuga (ALI, TEIXEIRA E ADDALI, 2018). Como comentado por Chakraborty e Panigrahi (2020), as técnicas de sedimentação e

centrifugação podem oferecer uma avaliação quantitativa da estabilidade em termos de tempo de sedimentação ou de altura da camada de sedimentação em função do tempo.

Ali, Teixeira e Addali (2018) definem potencial zeta como a diferença de potencial entre o fluido base e a camada de popa em contato com as partículas dispersas, sendo medido em mV, como representado na Fig.2.4. De acordo com Mukherjee e Paria (2013) o potencial zeta indica o grau de repulsão entre partículas adjacentes com cargas semelhantes na dispersão, dessa forma dispersões de alto potencial zeta, negativo ou positivo, possuem boa condição de estabilidade, enquanto um baixo potencial zeta indica tendência de coagulação ou floculação. Chakraborty e Panigrahi (2020) apresentam que partículas com potencial zeta maior que ± 30 mV são consideradas estáveis, e com estabilidade excelente para valores maiores que ± 60 mV.

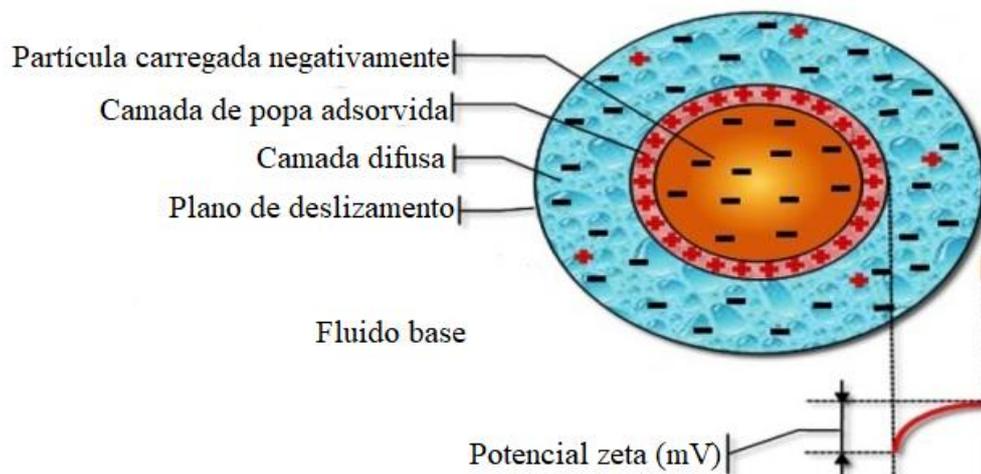


Figura 2.4. Potencial zeta de nanofluidos. Fonte: Adaptado de Mukherjee e Paria (2013)

De acordo com Chamsa-ard *et al.* (2017), a análise espectral UV-Vis tem sido aplicada para determinação de estabilidade, sendo uma técnica utilizada para nanofluidos em que as nanopartículas tem absorção entre os comprimentos de onda de 190 a 1100 nm, os autores apontam utilização desta análise para nanofluidos de Ag, Au, TiO₂ e materiais de carbono como nanotubos e grafeno. A análise espectral UV-Vis, apresentada na Fig. 2.5, pode ser utilizada para medições de absorbância e transmitância. Chakraborty e Panigrahi (2020) discorrem que a avaliação da estabilidade pela medição da absorbância consiste na avaliação dos picos de absorção e o monitoramento de seu comportamento com o tempo, sendo medido em um espectrofotômetro UV-Vis, de forma que a diminuição da absorbância com o tempo indica instabilidade no nanofluido, visto que a absorbância é proporcional a concentração de nanopartículas na solução, assim, a diminuição da concentração de nanopartículas devido a

sedimentação é refletida na medição da absorbância. Para avaliação em termos da transmitância, a instabilidade no nanofluido é indicada com o aumento do valor medido em função do tempo.

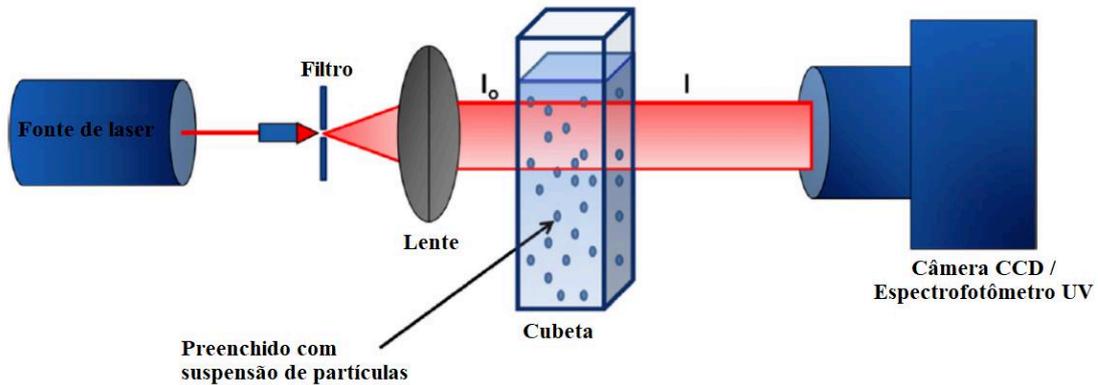


Figura 2.5. Esquema de medição transmitância / absorbância. Fonte: Adaptado de Chakraborty e Panigrahi (2020)

O uso de microscopia eletrônica de transmissão (TEM) e microscopia eletrônica de varredura (SEM) são citados por Ali, Teixeira e Addali (2018) como método de avaliação de estabilidade, onde as imagens de alta resolução capturadas por esses microscópios permitem a observação da distribuição das nanopartículas, de forma que a identificação de aglomerados nas imagens indica maior possibilidade de sedimentação.

A técnica de dispersão dinâmica de luz (DLS) realiza a medição da distribuição de tamanho das partículas, considerando a realização de medições em diferentes intervalos ao longo do tempo, a análise DLS pode mostrar o aumento do tamanho das nanopartículas devido a aglomeração, indicando dessa forma instabilidade no nanofluido (CHAKRABORTY E PANIGRAHI, 2020).

2.2. Coletores solares

O princípio básico de funcionamento dos coletores solares consiste em um meio absorvente da energia da radiação solar que incide sobre o coletor e transfere esta energia para um meio ou então a armazena dentro do coletor na forma de energia térmica, de forma que possa ser utilizada posteriormente para vários requisitos (SAHIN *et al.*, 2020).

Existem dois tipos de coletores solares: não concentrados e os concentrados. Os coletores não concentrados tem a mesma área para interceptar e absorver a radiação solar, enquanto os coletores de concentração possuem superfícies de reflexo côncavas para interceptar

e focar a radiação do feixe do sol para uma área de recepção menor, proporcionando aumento do fluxo de radiação (KALOGIROU, 2004).

Considerando os coletores solares não concentrados tem-se os coletores de placa plana, absorção direta e tubo evacuado, enquanto para os coletores concentrados verifica-se principalmente aplicações para o coletor solar de calha parabólica.

Conforme descrito por Kalogirou (2004), em um coletor solar de placa plana a radiação solar atravessa a cobertura transparente e colide com a placa absorvedora, que absorve grande parte da energia e em seguida transfere para o meio de transporte nos tubos de escoamento que seguirão para armazenamento ou uso, destaca-se que a cobertura transparente é usada como forma de redução das perdas por convecção da placa absorvedora mediante a contenção de camada de ar estagnada entre a placa absorvedora e a cobertura. A Fig.2.6 apresenta um esquema desse tipo de coletor.

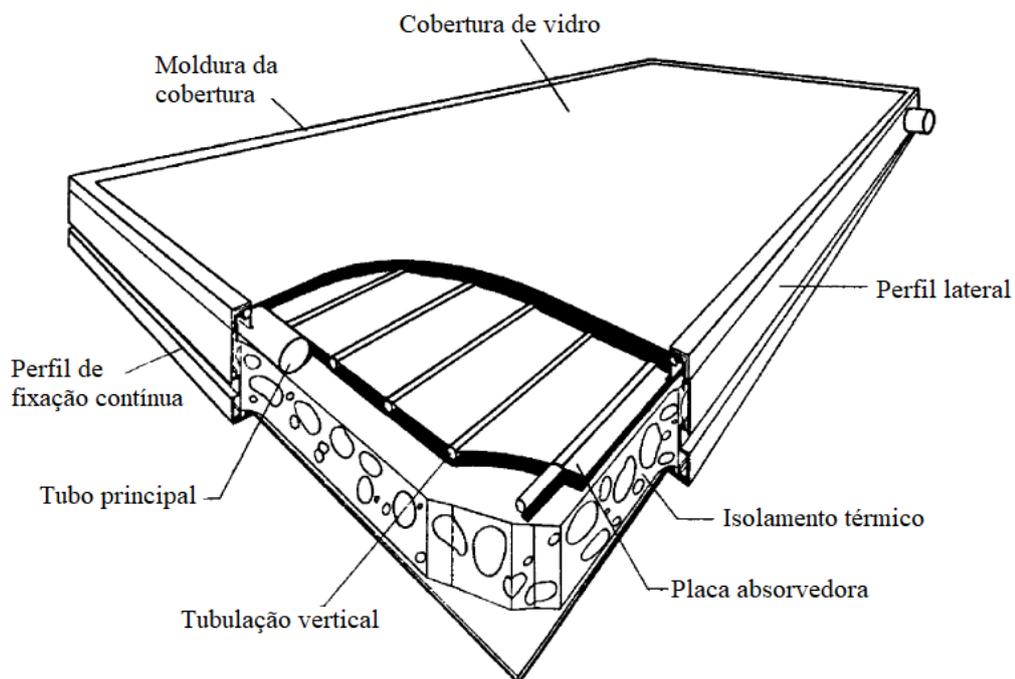


Figura 2.6. Coletor solar de placa plana. Fonte: Adaptado de Kalogirou (2004)

No coletor solar de absorção direta o sistema absorve energia solar diretamente no volume de fluido, não havendo placa absorvedora na parte superior do coletor (FARHANA *et al.*, 2019). Conforme apresentado por Sahin *et al.* (2020), este coletor possui o princípio básico de absorção direta da energia solar que chega ao fluido de trabalho passando pela tampa transparente na face superior do coletor.

No coletor solar de tubo evacuado, como visto na Fig.2.7, o tubo de calor é colocado em uma aleta dentro de um tubo de vácuo, então o tubo evacuado é conectado em um coletor com um fluido de trabalho, assim, quando o fluido no tubo de calor absorve energia e atinge o bulbo do tubo evacuado, passa a ocorrer uma transferência de calor entre o fluido de trabalho que flui no coletor e o bulbo do tubo evacuado (SAHIN *et al.*, 2020). O fluido no tubo de calor passa por um ciclo de evaporação-condensação, o calor evapora o líquido de forma que o vapor flui para o condensador onde libera o seu calor latente, em seguida o fluido condensado retorna ao tubo de calor e o processo é repetido (KALOGIROU, 2004).

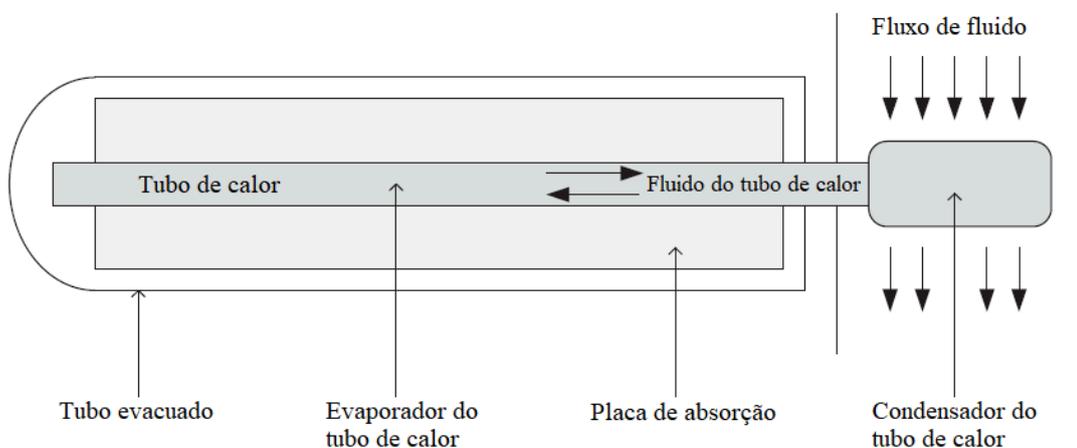


Figura 2.7. Diagrama esquemático de um coletor de tubo evacuado. Fonte: Adaptado de Sabiha et al. (2015)

O coletor solar de calha parabólica, visto na Fig.2.8, é um tipo de coletor concentrador, como descrito por Gupta e Dixit (2021), na configuração deste tipo de coletor o tubo receptor está disposto ao longo do eixo focal da parábola para receber a energia solar. Esses coletores são constituídos por uma material reflexivo com forma parabólica, e quando apontado para o sol, os raios paralelos incidentes são refletidos no tubo receptor (KALOGIROU, 2004). O receptor absorve a radiação solar, e essa radiação concentrada aquece o fluido que se move através do tubo (FARHANA *et al.*, 2019).

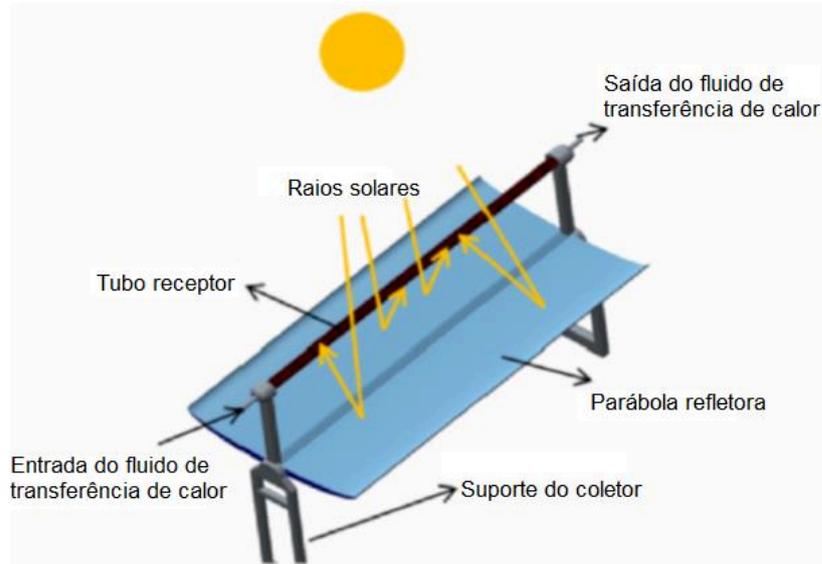


Figura 2.8. Esquema de um coletor de calha parabólica. Fonte: Adaptado de Ahmed et al. (2021)

De acordo com Ahmed *et al.* (2021), os sistemas de aquecimento por coletores solares podem ser classificados em ativos e passivos, onde o sistema ativo utiliza-se de bombas e outros componentes para promover a circulação forçada, enquanto o sistema passivo não requer bombas externas, tendo a circulação impulsionada pela convecção natural, para esse tipo destaca-se o sistema de termossifão. Como descrito por Kalogirou (2004), o sistema de termossifão, ilustrado na Fig.2.9, utiliza-se da convecção para o transporte do fluido, a água se expande a medida em que é aquecida no coletor, subindo para o reservatório, onde é substituída pela água mais fria do fundo do reservatório que flui para parte inferior do coletor.

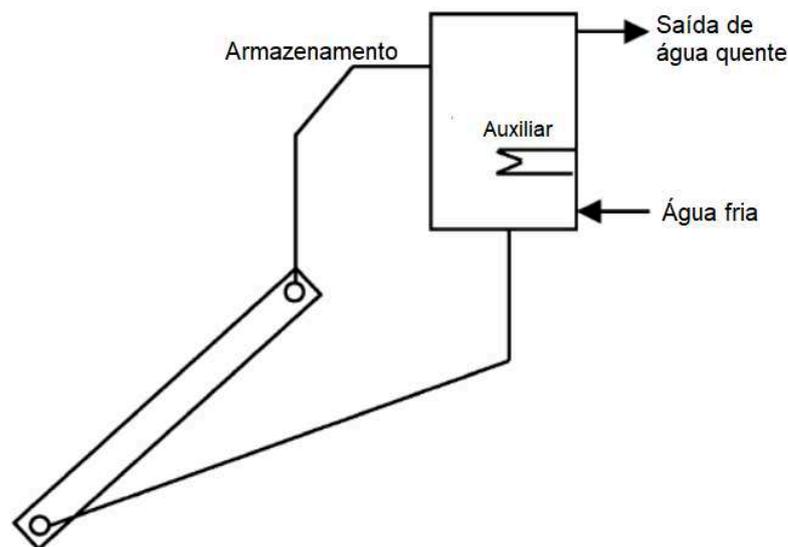


Figura 2.9. Diagrama esquemático de um aquecedor solar de água com termossifão. Fonte: Adaptado de Kalogirou (2004)

Sahin *et al.* (2020) destaca como vantagens para o uso de coletores solares como técnica de geração de energia: ausência de emissões tóxicas, nenhuma degradação da terra, além de apresentar-se como solução para fornecimento de energia descentralizada, principalmente em áreas remotas. Porém, os autores pontuam que a eficiência de coletores solares é comparativamente baixa, e nos últimos tempos, pesquisadores vêm realizando esforços para melhorar essa eficiência, como modificações em termos de materiais.

Farhana *et al.* (2019), apontam ainda além das alterações de diferentes componentes ou equipamentos de sinal, alterações na configuração de coletores solares. No entanto, dentre as contribuições para melhoria no desempenho dos coletores solares, o uso de nanofluidos como meio de absorção é um dos métodos pelos quais se tem obtido aumentos significativos. A pesquisa de revisão de Sahin *et al.* (2020), pontua que uma combinação ideal de tamanho de partícula, valor de pH e dispersão adequada das nanopartículas promovem aumento de eficiência nos coletores solares. A Fig.2.10 apresenta as principais nanopartículas e fluidos base utilizados em aplicações solares.

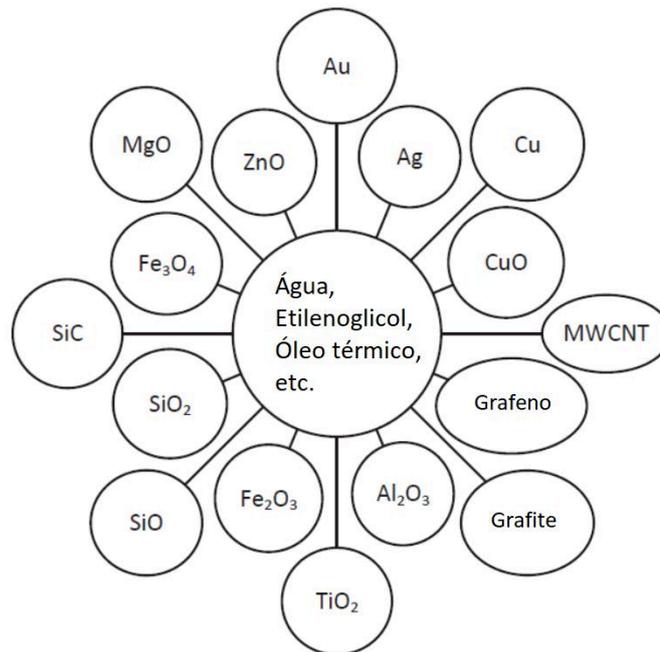


Figura 2.10. Tipos de nanopartículas e fluidos base usados em nanofluidos para aplicações de energia solar.
Fonte: Adaptado de Sahin et al. (2020)

2.3. Aplicação de nanofluidos em coletores solares

Muitos estudos anteriores trouxeram avaliações das propriedades e características da transferência de calor nos nanofluidos, no entanto, nos últimos anos, estudos mais recentes buscam investigações de aplicações na engenharia. Sendo o nanofluido revelado como um fluido de trabalho com aumento potencial da condutividade térmica, a utilização dos nanofluidos em coletores solares tem atraído a atenção de muitos pesquisadores, principalmente para avaliação de melhorias no desempenho destes equipamentos.

Yousefi *et al.* (2012.a) avaliaram experimentalmente o efeito da variação do pH de nanofluidos na eficiência de um coletor solar de placa plana. Foram utilizados nanofluidos de MWCNT/água com concentração de 0,2 % em peso e com adição do surfactante Triton X-100, com valores de pH de 3,5; 6,5 e 9,5. Os resultados indicaram que quanto maior a diferença entre o pH do nanofluido e o do ponto isoelétrico ($\text{pH} = 7,4$), maior é o aumento na eficiência do coletor. A bancada experimental utilizada é apresentada na Fig. 2.11.



Figura 2.11. Configuração experimental do coletor solar de placa plana. Fonte: Yousefi *et al.*, 2012.a

Ainda utilizando nanofluidos de MWCNT em água, Yousefi *et al.* (2012.b) investigaram experimentalmente o seu uso no coletor solar de placa plana, sendo avaliados nanofluidos com concentração de 0,2 % e 0,4 % em peso, sem surfactante e com adição do surfactante Triton X-100. Os resultados apresentados indicam que o nanofluido menos concentrado sem adição de surfactante proporcionou eficiência inferior ao da água, no entanto para maior concentração a eficiência do coletor foi aumentada em relação a da água. Com a

adição do surfactante, foi obtido aumento da eficiência em relação à água para ambas concentrações.

Yousefi *et al.* (2012.c), usaram a mesma bancada dos estudos citados anteriormente para investigar o uso de nanofluidos de Al_2O_3 em água, utilizando novamente as concentrações de 0,2 % e 0,4 % em peso, com e sem surfactante. Foram verificados aumento na eficiência do coletor para as duas concentrações quando comparadas com a da água, sendo mais significativo no nanofluido menos concentrados, onde foi atingido um aumento de eficiência de 28,3 %. Os autores ainda afirmam que o uso do surfactante teve efeito positivo no desempenho do coletor, atingindo um aumento de eficiência de 15,63 %.

Utilizando métodos numéricos e dados da literatura, Faizal *et al.* (2013) desenvolveram um estudo para estimar o potencial de redução do tamanho de coletores solares de placa plana com uso de nanofluidos de óxidos metálicos. Os autores pontuaram que para uma mesma temperatura de saída, devido à maior condutividade térmica e eficiência dos nanofluidos a obtenção de um coletor com design menor e compacto pode reduzir o uso de material, custo e energia na fabricação. Foram analisados nanofluidos de CuO , SiO_2 , TiO_2 e Al_2O_3 em água, e os resultados mais significativos foram observados para o nanofluido $\text{CuO}/\text{água}$, onde foi obtido um aumento de 38,5 % na eficiência do coletor, trazendo como potencial de redução de tamanho do coletor em 25,6 % quando comparado com a água, e uma redução de peso estimada em 10239 kg para 1000 unidades de coletores solares.

He *et al.* (2013) trouxeram uma investigação experimental de propriedades fototérmicas de nanofluidos de Cu e água para uso em sistemas solares térmicos de absorção direta. Os resultados experimentais, como visto na Fig.2.12.a, mostraram que o aumento da fração mássica leva ao aumento da temperatura, até a concentração de 0,1 % em peso, onde foi alcançado um aumento de temperatura de 25,3 % em comparação com a água, porém para a concentração de 0,2 % em peso, a temperatura apresentou valores inferiores aos obtidos com as concentrações de 0,1 % e 0,04 % em peso, identificando assim um ponto ótimo para fração volumétrica. E considerando o efeito do tamanho das partículas, visto na Fig.2.12.b, temperaturas mais altas foram obtidas para as nanopartículas de 25 nm em comparação com as de 50 nm.

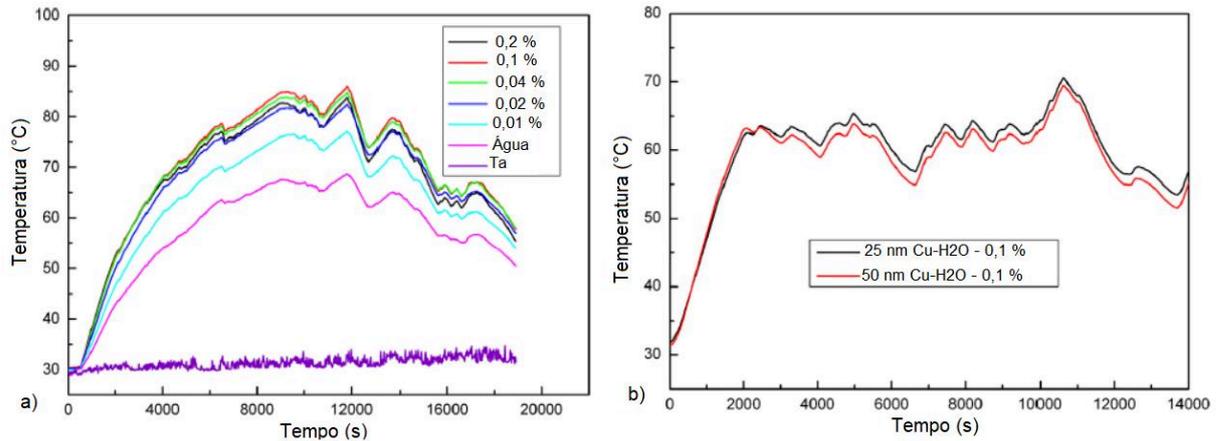


Figura 2.12. Curva de temperatura de nanofluidos Cu–H₂O: a) com diferentes frações mássicas. (Cu: 50 nm, Ta é a temperatura do ar ambiente); b) com diferentes tamanhos de partículas (0,1% em peso). Fonte: Adaptado de He *et al.* (2013)

Ladjevardi *et al.* (2013) apresentaram um estudo teórico sobre o uso de nanofluidos de grafite e água em um coletor solar volumétrico. Foi verificado que um aumento na fração volumétrica de nanopartículas promove um aumento na absorção da energia solar e da temperatura na saída do coletor. Considerando uma temperatura adimensional, as temperaturas de saída do coletor saltam de 0,27 quando utilizando água pura para 0,51, 0,915 e 0,95 para as frações de volume de 0,000025 %, 0,00025 % e 0,0025 % respectivamente, no entanto os autores pontuaram que o custo é um parâmetro decisivo, e que o ganho para maior temperatura é significativamente menor do que o aumento do custo/litro do nanofluido nessa condição, dessa forma, o uso da fração volumétrica de 0,00025 % torna-se mais atrativa.

Zamzamian *et al.* (2014) avaliaram o efeito de nanofluidos de Cu e etilenoglicol em coletores de placa plana. Os nanofluidos foram preparados pelo método de um passo, nas concentrações de 0,2 % e 0,3 % em peso, com vazão volumétrica variando de 0,5 L/min a 1,5 L/min. O trabalho destaca que a eficiência do coletor diminui com a diminuição da vazão volumétrica, e aumenta com o aumento da concentração do nanofluido.

Karami *et al.* (2014) apresentaram um estudo experimental do uso de nanotubos de carbono funcionalizados (f- CNT) e água como fluido de trabalho em um coletor solar de absorção direta. Os nanofluidos foram avaliados para as frações volumétricas de 5 a 150 ppm, e de acordo com os resultados a condutividade térmica aumentou com o aumento da fração volumétrica. Considerando a temperatura de 25 °C, o nanofluido de 150 ppm teve um aumento de 32,2 % na condutividade térmica em comparação com a água. Outra relação estabelecida foi do aumento da condutividade térmica com o aumento da temperatura, devendo ser destacado que para temperaturas superiores a 40 °C a tendência de aumento foi intensificada para

nanofluidos com maiores frações volumétricas.

Moghadam *et al.* (2014) analisaram o uso de nanofluidos de CuO/água com fração volumétrica de 0,4 % em um coletor solar de placa plana, conforme esquema experimental apresentado na Fig.2.13. De acordo com os autores, o comportamento da eficiência do coletor diante de diferentes vazões mássicas, indicam a existência de uma vazão mássica ótima, identificada como 1 kg/min, nessa condição a eficiência do coletor é aumentada em 16,7 % em comparação com a da água.

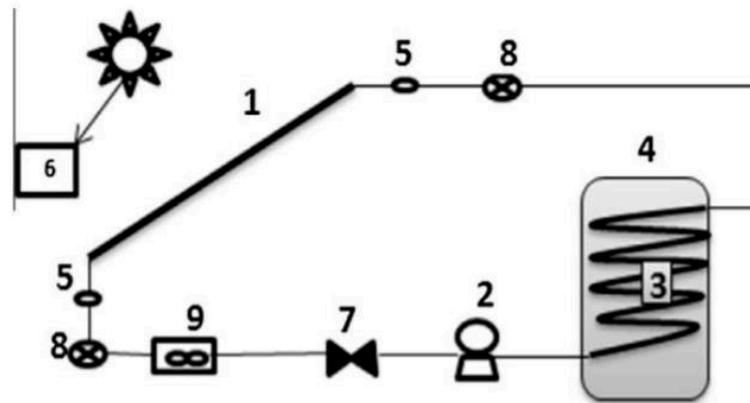


Figura 2.13. Diagrama esquemático da configuração experimental (1. Coletor 2. Bomba 3. Calor 4. Tanque 5. Termômetro 6. Medidor solar 7. Válvula de controle 8. Válvula automatizada 9. Rotâmetro). Fonte: Adaptado de Moghadam *et al.* (2014)

Em uma investigação experimental, Bandarra Filho *et al.* (2014) apresentaram a análise do uso de nanofluidos de prata em água em um sistema solar térmico de absorção direta. Os autores pontuaram sobre a potencialidade do uso de nanopartículas de prata diante do conhecimento de sua forte ressonância plasmônica de superfície no espectro de luz visível, que consiste em uma oscilação coletiva de elétrons estimulada pela luz incidente, sendo uma forma eficaz de converter luz em energia térmica. Foram avaliados nanofluidos com concentrações variando de 1,6 a 650 ppm, no entanto é destacado que aumentos de temperatura significativos em relação a água, foram verificados em baixas concentrações, conforme visto na Fig. 2.14. A concentração de 6,5 ppm atingiu um pico de 43 °C nas primeiras 3 h enquanto a água chegou a 30 °C, para essa mesma concentração foi verificado um aumento de 144 % da energia térmica máxima armazenada.

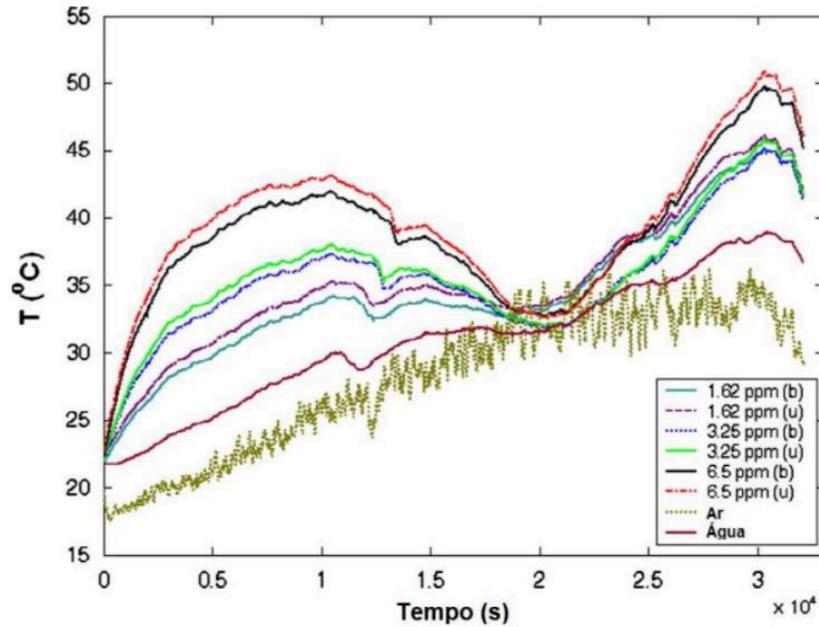


Figura 2.14. Exemplo de perfil de temperatura dos testes (onde b e u referem-se a termopares localizados nas posições inferior e superior, respectivamente). Fonte: Adaptado de Bandarra Filho *et al.* (2014)

Meibodi *et al.* (2015) analisaram experimentalmente o uso de nanofluidos de SiO_2 em etilenoglicol e água (50:50 vol.%) em um coletor solar de placa plana, como visto no esquema da Fig. 2.15. Os nanofluidos foram preparados com uso de partículas de tamanho médio de 40 nm nas concentrações 0,5 %, 0,75 % e 1 % em volume, sendo avaliadas as vazões mássicas de 0,018, 0,032 e 0,045 kg/s. Os testes indicaram que apesar da baixa condutividade térmica das nanopartículas de SiO_2 , foi possível verificar aumento na eficiência térmica de 4 a 8 % em comparação com o fluido base. Além disso, constatou-se que a eficiência das concentrações de 0,75 % e 1% são bem próximas, sendo dessa forma sugerido o uso do fluido de menor concentração diante de fatores como diminuição da instabilidade e custo de preparação.

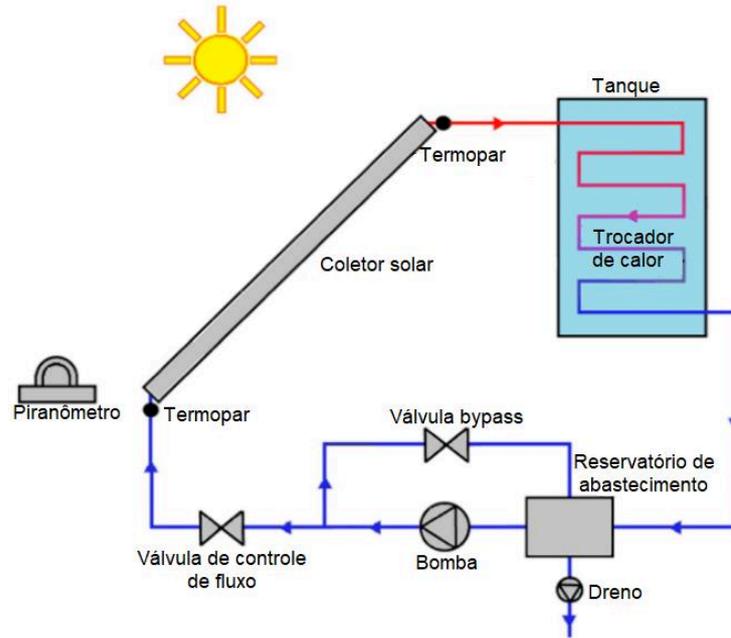


Figura 2.15. Esquema de montagem experimental. Fonte: Adaptado de Meibodi *et al.* (2015)

Sabiha *et al.* (2015) realizaram um estudo experimental em um coletor solar de tubo evacuado, utilizando nanofluidos de nanotubos de carbono de parede simples (SWCNT) a base de água, e com adição do surfactante dodecil sulfato de sódio. Foram utilizados nanofluidos com concentração de 0,05, 0,1 e 0,2 %vol., e vazões mássicas de 0,008, 0,017 e 0,025 kg/s. Como visto na Fig. 2.16.a, no intervalo de 20-70 °C, a condutividade térmica do nanofluido foi superior ao da água, aumentando com o aumento da fração volumétrica e temperatura. Os autores destacaram que essa relação com a temperatura é vantajosa para aplicação em coletores solares, visto que a radiação solar varia ao longo do dia. Quanto a avaliação da eficiência do coletor, o melhor resultado ocorreu para o nanofluido de 0,2 %vol. com vazão mássica de 0,025 kg/s, atingindo 93,43 % de eficiência, como visto na Fig. 2.16.b, esse resultado superou o obtido pela água em 71,84 %. Além disso, foi evidenciado que a eficiência do coletor mesmo em dias nublados usando o nanofluido é superior a eficiência do coletor em dias claros usando água.

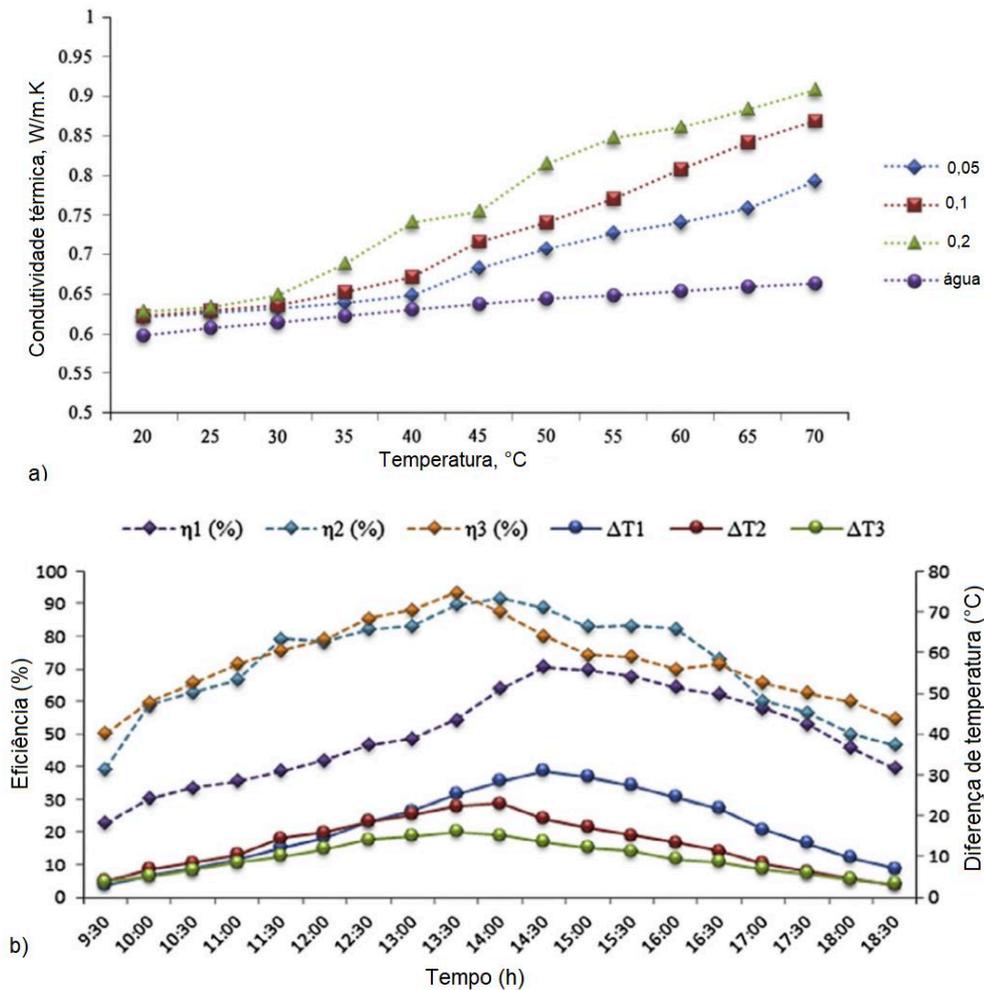


Figura 2.16. a) Condutividade térmica; b) Dados experimentais para nanofluido de 0,2 %vol. (onde, η_1 , η_2 e η_3 representam a eficiência para vazão mássica de 0,008, 0,017 e 0,025 kg/s respectivamente). Fonte: Adaptado de Sabiha *et al.* (2015)

Tong, Kim e Cho (2015) avaliaram de forma teórica e experimental um coletor solar de tubo evacuado em U, utilizando como fluido de trabalho nanofluidos de MWCNT e água. Foi observada uma boa concordância entre os valores de eficiência simulados e experimentais, como visto na Fig. 2.17. Os resultados do modelo sugerido apontaram que a concentração 0,24 % vol. oferece o maior coeficiente de transferência de calor, sendo superior em 8 % comparado com a água, considerando a garantia de propriedades estáveis, os experimentos foram conduzidos com a concentração de nanopartículas de 0,2 %vol., e a vazão mássica mantida em 0,01 kg/s.

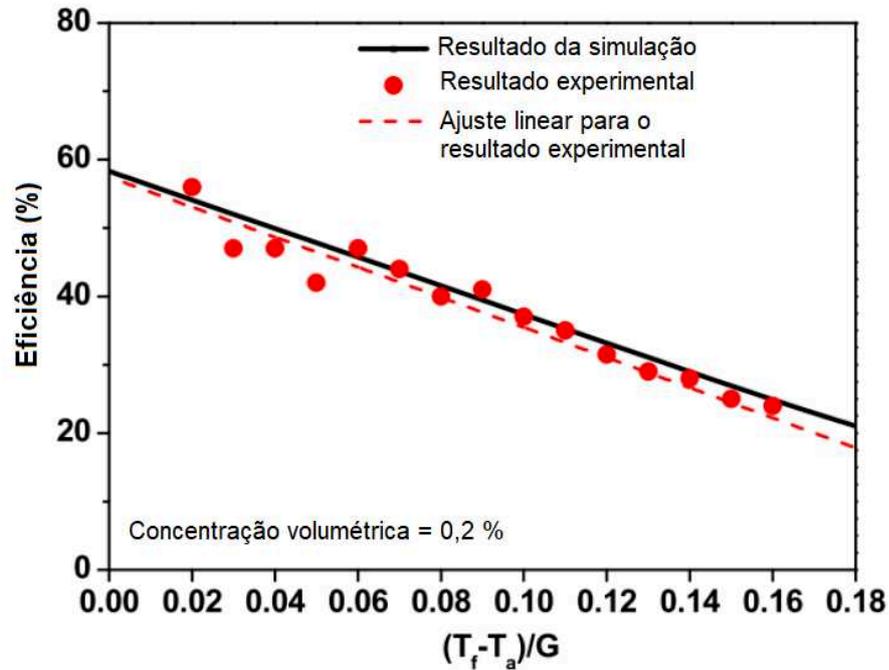


Figura 2.17. Variação de eficiência do coletor solar de tubo em U evacuado. Fonte: Adaptado de Tong, Kim e Cho (2015)

Gupta, Agrawal e Mathur (2015) avaliaram o uso de nanofluidos de Al_2O_3 e água em um coletor solar de absorção direta, apresentado na Fig. 2.18. Foram utilizadas nanopartículas de 20-30 nm para produzir nanofluidos com quatro concentrações volumétricas diferentes, 0,001 %, 0,005 %, 0,01 % e 0,05 %.

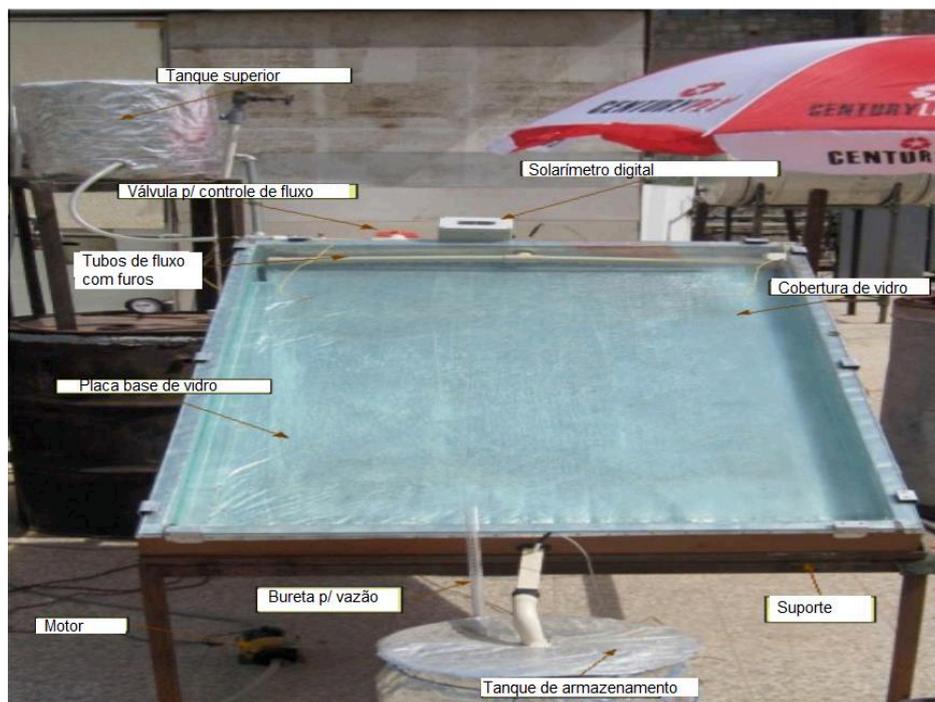


Figura 2.18. Imagem do coletor solar de absorção direta. Fonte: Adaptado de Gupta, Agrawal e Mathur (2015)

Os resultados mostraram uma maior eficiência do coletor para as quatro concentrações do nanofluidos quando comparados com a água como fluido de trabalho, no entanto foi observado que a eficiência aumenta com o aumento da concentração de 0,001 % para 0,005 %, mas o aumento da concentração acima desse ponto até 0,05 % resultou na diminuição da eficiência. De acordo com os autores, para frações volumétricas mais baixas, parte da radiação solar foi absorvida pelo nanofluido, enquanto o restante foi absorvido pela placa de base inferior, causando perdas emissivas extras, já para maiores frações volumétricas, as camadas superiores de nanofluido absorveram a maior parte da radiação incidente, de forma que pouca ou nenhuma radiação penetrou camadas interiores do fluido ou alcançou a placa inferior, levando dessa forma a uma distribuição desigual na temperatura que resulta em emissões excessivas e quedas na eficiência do coletor. Dessa forma, em determinada fração volumétrica ocorre o pico de eficiência, onde pode ser observado uma distribuição uniforme da temperatura dentro do nanofluido, nesse caso o maior aumento da eficiência foi de 39,6 % obtido na concentração de 0,005 %.

He, Zeng e Wang (2015) investigaram experimentalmente o efeito de diferentes frações mássicas e tamanho de nanopartículas no uso de nanofluidos de Cu e água em um coletor solar de placa plana. Conforme apresentado na Fig. 2.19.a, a eficiência para uso de nanofluido foi superior ao da água, no entanto observando o efeito da fração mássica, foi visto que com seu aumento a eficiência foi reduzida. O estudo discutiu como explicações possíveis para esse resultado que nanopartículas em concentrações mais altas tendem a se aglomerar, reduzindo assim a estabilidade do nanofluido, e o aumento da viscosidade com aumento da fração mássica. Observando o efeito do tamanho das nanopartículas de 25 nm e 50 nm, mostrado na Fig.2.19.b, verificou-se um desempenho superior para as nanopartículas menores, conforme apontado pelos autores esse efeito decorre da maior condutividade térmica desses nanofluidos, justificada por fatores de que para a mesma fração de massa, a quantidade de partículas pequenas é maior, oferecendo assim uma área interfacial maior entre o líquido e as partículas, além disso, nanopartículas de pequeno tamanho irão caminhar aleatoriamente na suspensão potencializando a transferência de energia.

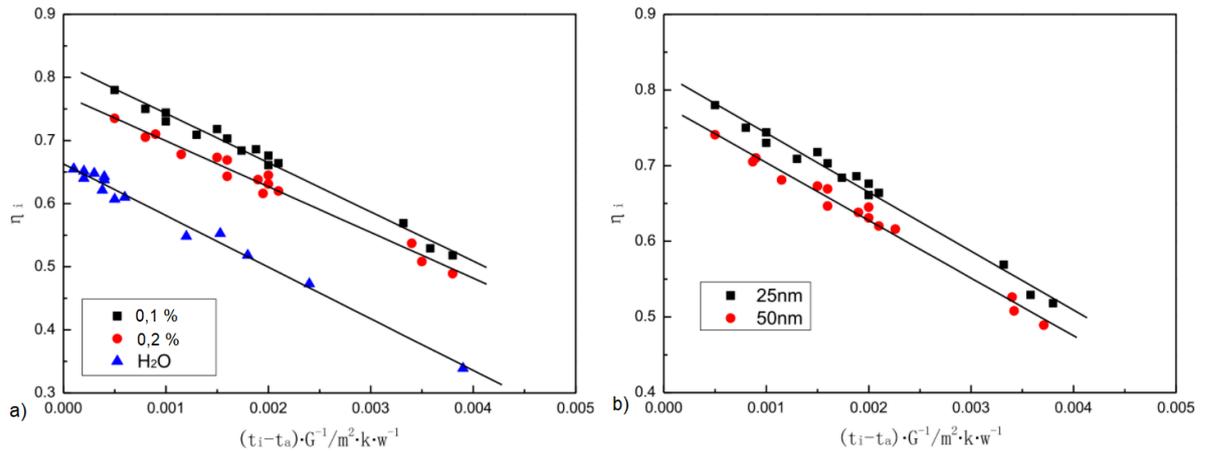


Figura 2.19. Eficiência do coletor solar de placa plana com nanofluidos de Cu-H₂O a) Cu:25 nm; b) 0,1% em peso, Cu: 25 nm, 50 nm. Fonte: Adaptado de He, Zeng e Wang (2015)

Said *et al.* (2015) avaliaram o uso de nanofluidos de TiO₂ em água, em um coletor solar de placa plana. Foram avaliados nanofluidos com frações volumétricas de 0,1 % e 0,3 %, com vazões mássicas de 0,5, 1,0 e 1,5 kg/min. Foi observado que o uso do nanofluido no coletor proporcionou resultados superiores ao da água para eficiência energética e exergética, sendo obtidos os melhores valores com o nanofluido de 0,1 % à 0,5 kg/min, com aumentos 76,6 % e 16,9 % para eficiência energética e exergética respectivamente em comparação com a água.

A pesquisa de Noghrehabadi, Hajidavalloo e Moravej (2016) apresentou uma investigação experimental do uso de nanofluidos de SiO₂ / água em um coletor solar de placa plana, apresentado na Fig.2.20. Os autores realizaram comparativos dos resultados da água e de nanofluidos com fração mássica de 1 %. A eficiência do coletor com o nanofluido foi superior ao da água, e observando os efeitos da variação da vazão volumétrica e da radiação solar incidente, foi verificado um aumento da eficiência com o aumento desses dois parâmetros para água e para o nanofluido, no entanto o aumento é mais significativo para o nanofluido, esse comportamento é justificado pelo movimento das nanopartículas no nanofluido, que levam a uma maior transferência de calor e o conseqüente aumento na eficiência do coletor



Figura 2.20. Montagem experimental do coletor solar de placa plana. Fonte: Noghrhabadi, Hajidavalloo e Moravej (2016)

Ghasemi e Ranjbar (2016) realizaram um estudo com Dinâmica dos Fluidos Computacional (CFD) para avaliar o uso de nanofluidos em um coletor solar de calha parabólica. Os autores avaliaram nanofluidos de $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{água}$ e $\text{CuO} / \text{água}$, e verificaram que o número de Nusselt relativo, $(\text{Nu}_{\text{nanofluido}}/\text{Nu}_{\text{fluido base}})$, aumenta com o aumento da fração volumétrica, pois a adição de nanopartículas contribui para melhora da condutividade e movimento browniano, que são diretamente responsáveis pela melhora do desempenho térmico. Foi verificado um maior aumento de desempenho no coletor para o nanofluido de CuO .

Uma abordagem numérica e experimental foi mostrada por Chen *et al.* (2016), para avaliação de nanofluidos de prata e água em coletores solares de absorção direta. Os resultados indicam um aumento na eficiência do coletor com o aumento da fração volumétrica, no entanto o aumento adicional na fração volumétrica leva a eficiência a aproximação de um valor máximo assintótico, independentemente do tempo de irradiação, assim, como concentração prática que traga um equilíbrio entre aumento de eficiência e aumento do custo com nanopartículas, os autores apresentam a fração de volume de 0,03 % para nanofluidos com nanopartículas de prata de 10 nm e altura do coletor de 6 mm. Os resultados sobre os efeitos da altura do coletor mostraram que o aumento da altura promove o aumento da eficiência até um certo ponto, onde é atingido um valor máximo, como valor prático foi indicada a altura de 10 mm para o coletor.

Menbari, Alemrajabi e Rezaei (2016) realizaram um estudo teórico e experimental para uso de nanofluidos de $\text{CuO}/\text{água}$ em um coletor solar parabólico de absorção direta, visto na Fig. 2.21. Os resultados apresentaram boas concordâncias entre a simulação e os experimentos,

indicando que o aumento da vazão volumétrica e da fração volumétrica resultam em um aumento da eficiência térmica, conforme apresentado na Fig. 2.22.



Figura 2.21. Sistema experimental do coletor solar parabólico de absorção direta. Fonte: Menbari, Alemrajabi e Rezaei (2016)

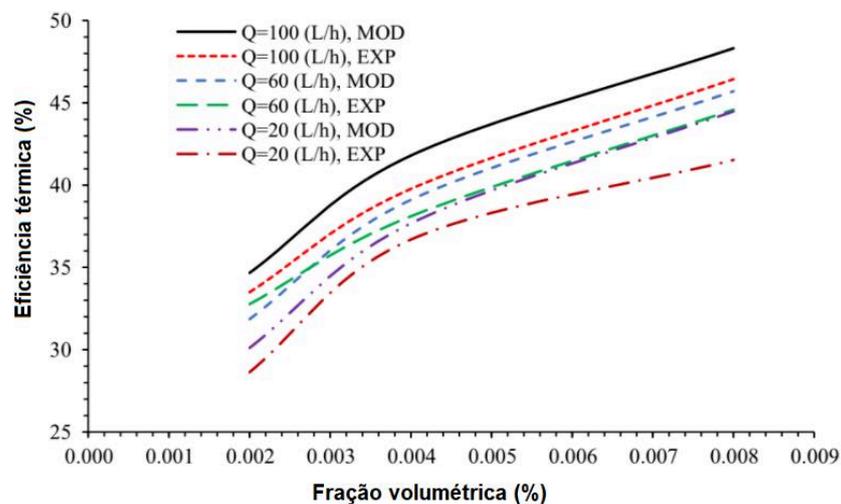


Figura 2.22. Efeito da fração volumétrica de nanopartículas na eficiência térmica do coletor (MOD e EXP representam métodos analíticos e experimentais respectivamente). Fonte: Adaptado de Menbari, Alemrajabi e Rezaei (2016)

Em uma pesquisa experimental Vincely e Natarajan (2016) investigaram o uso de nanofluidos de óxido de grafeno (GO) e água em um coletor solar de placa plana, com concentrações mássicas de 0,005, 0,01 e 0,02 % com vazões mássicas variando de 0,0067 - 0,0167 kg/s. De acordo com os resultados apresentados o parâmetro de absorção de energia

aumentou com o aumento da vazão, o que levou ao aumento da eficiência do coletor. O aumento máximo de 7,3 % ocorreu para o nanofluido com 0,02 % de concentração mássica a 0,0167 kg/s. O coeficiente de transferência de calor aumentou com o aumento da concentração mássica de nanopartículas, onde foi observado um aumento máximo de 11,5 % para concentração de 0,02 %.

Verma, Tiwari e Chauhan (2016) analisaram experimentalmente o uso de nanofluidos de MgO / água em um coletor solar de placa plana. Foram utilizadas nanopartículas de 40 nm para produção de nanofluidos com concentrações volumétricas variando de 0,25 a 1,25 %, os experimentos foram realizados em uma bancada experimental onde o coletor recebe calor de lâmpadas infravermelhas que geram calor solar artificial, mostrada na Fig. 2.23, com variação da vazão volumétrica de 0,5 a 2,5 L/min.



Figura 2.23. Montagem experimental do coletor solar de placa plana. Fonte: Verma, Tiwari e Chauhan (2016)

De acordo com os resultados obtidos, a eficiência do coletor aumenta com o aumento da vazão volumétrica até atingir a eficiência máxima, e então diminui gradualmente para vazões maiores. Quanto aos efeitos da concentração volumétrica, a adição de nanopartículas aumenta a capacidade de absorção até um nível ideal, onde o aumento adicional de nanopartículas diminui a eficiência do coletor, que conforme pontuado pelos autores, devido a aglomeração de nanopartículas ocorrem perdas por atrito devido ao aumento da viscosidade em concentrações mais altas. Os valores ideais determinados no estudo para concentração volumétrica e vazão foram 0,75 % e 1,5 L/min (0,025 kg/s), nessa condição foi verificado um aprimoramento de 9,34 % na eficiência do coletor. O aumento ótimo da eficiência exergética também foi verificado para essa condição, sendo de 32,23 %. Considerando uma saída semelhante em

relação ao fluido base convencional, em termos de redução do tamanho do coletor solar, a área do coletor seria 12,5 % menor com uso do nanofluido em sua condição ótima de fração volumétrica e vazão.

Em um trabalho subsequente, usando a mesma montagem experimental, Verma, Tiwari e Chauhan (2017) analisaram o uso de nanofluidos de MWCNT/água, grafeno/água, CuO/água, Al_2O_3 /água, TiO_2 /água e SiO_2 /água. O aumento ótimo da eficiência foi alcançado para concentração volumétrica de 0,75 %, e vazão mássica de 0,03 kg/s, conforme visto nas Fig.2.24. a, b. O valor máximo de aumento da eficiência energética foi observado no nanofluido de MWCNT, obtendo um valor 23,5 % superior ao do fluido base. Os autores discorrem sobre a eficiência exergética, indicando sua diminuição com o aumento da vazão mássica. Foi pontuado que, com o aumento da vazão ocorre um aumento na entropia, por maior perda na energia térmica irreversível, considerando que a taxa de destruição de exergia é proporcional a de geração de entropia, ocorre dessa forma a diminuição da eficiência exergética. O maior aumento para eficiência exergética também ocorreu para o nanofluido de MWCNT.

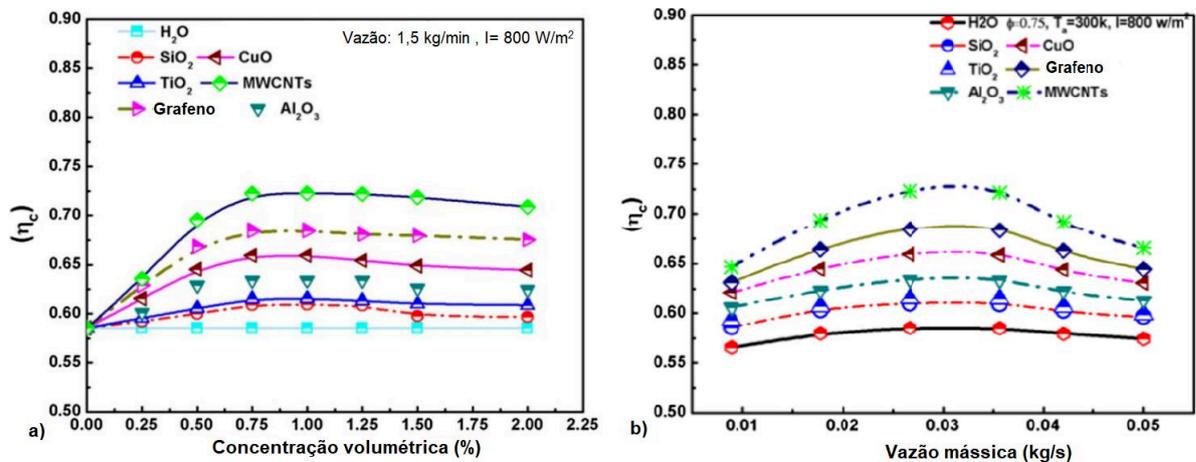


Figura 2.24. a) Eficiência do coletor e as concentrações volumétricas de partículas; b) Eficiência versus vazão mássica para vários nanofluidos. Fonte: Verma, Tiwari e Chauhan (2017)

Iranmanesh *et al.* (2017) investigaram o efeito do uso de nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno (GNP) e água em um coletor solar de tubo evacuado, sendo o estudo conduzido experimentalmente com nanofluidos nas concentrações de 0,025, 0,5, 0,075 e 0,1% em peso e vazões volumétricas de 0,5, 0,1 e 1,5 L/min. Os autores discorrem que a eficiência do sistema solar era diretamente dependente da intensidade solar, temperatura ambiente, vazão e concentração de nanofluidos. A diferença entre temperatura de entrada e saída aumentou com o aumento da concentração, atingindo maior valor, 23,6 °C, para o nanofluido com 0,1 % em

peso, como visto na Fig. 2.25.a, e a eficiência térmica, apresentada na Fig. 2.25.b., melhorou com o aumento da concentração e da vazão volumétrica, com maior valor verificado, 90,7 %, para o nanofluido de 0,1 % em peso a 1,5 L/min.

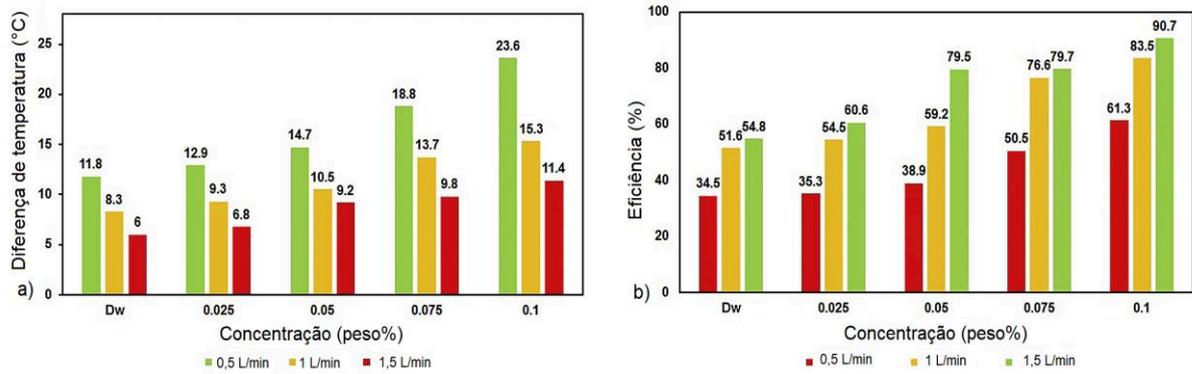


Figura 2.25. Efeito da concentração e vazão volumétrica a) na diferença de temperatura; b) na eficiência térmica. Fonte: Adaptado de Iranmanesh *et al.* (2017)

Kim *et al.* (2017) mostraram experimentalmente a influência da concentração e tamanho de nanopartículas de Al_2O_3 de nanofluidos operando em um coletor solar de tubo em U. Foram avaliadas nanopartículas de 20, 50 e 100 nm, variando nas concentrações volumétricas de 0,5, 1 e 1,5 %, na água como fluido base. Foi verificado um aumento da condutividade térmica com a diminuição do tamanho das nanopartículas. Em concentrações volumétricas iguais, para partículas menores, o movimento browniano aumenta e a nanoconvecção se torna dominante na transferência de calor. A eficiência máxima foi verificada para as nanopartículas de 20 nm, sendo de 72,4 %, esse valor foi 3,05 % e 5,32 % superior aos valores com as nanopartículas de 50 nm e 100 nm respectivamente, como visto na Fig. 2.26.a. Para as variações na concentração, a maior eficiência foi alcançada para a concentração de 1,0 %, visto na Fig. 2.26.b, sendo superior em 24,1 % a água, e 5,6 % e 9,7 % maior que os valores das concentrações de 0,5 % e 1,5 % respectivamente.

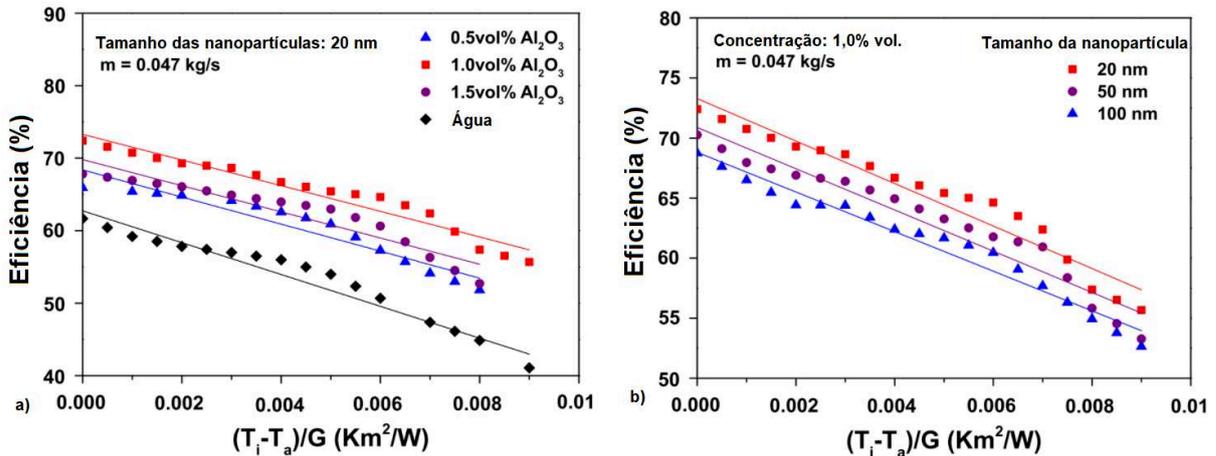


Figura 2.26. Variação da eficiência do coletor solar de tubo em U a) em função do nanofluido da concentração do nanofluido; b) em função do tamanho de nanopartículas. Fonte: Adaptado de Kim *et al.* (2017)

Sharafeldin, Grof e Mahian (2017) realizaram um trabalho experimental com uso de nanofluidos de WO_3 / água em um coletor de placa plana. Foram avaliados nanofluidos com as frações volumétricas de 0,0167 %, 0,333 % e 0,0666 %, para diferentes fluxos mássicos. Os resultados demonstraram um aumento da eficiência do coletor com o aumento do fluxo mássico, sendo esse aumento potencializado em concentrações mais altas. O valor máximo de eficiência do coletor foi de 71,87 % para o nanofluido de 0,0666 %, e fluxo mássico de 0,0195 kg/s. m^2 , nessa mesma condição foi atingido o maior aumento do parâmetro de energia absorvida, de 13,48 % em comparação com a água.

Kasaeian *et al.* (2017), avaliaram o uso de nanofluidos de MWCNT/etilenoglicol e nanosílica/etilenoglicol em um coletor solar de calha parabólica de absorção direta, cada nanofluido foi testado nas frações volumétricas de 0,1 %, 0,2 % e 0,3 %. Foi constatado que o uso dos nanofluidos como fluido de trabalho melhoram o desempenho do coletor em comparação ao fluido base. A temperatura de saída e eficiência térmica do coletor foram aumentadas com a adição de nanopartículas, sendo os maiores valores obtidos para cada nanofluido nas frações volumétricas de 0,3 %, e para um comparativo entre os nanofluidos os valores máximos foram obtidos para o nanofluido de MWCNT. Como apresentado na Fig. 2.27, a diferença de temperatura para o MWCNT é de 26,1 °C, enquanto para nanosílica é de 22 °C. A maior eficiência obtida, 72,8 %, ocorreu no nanofluido de MWCNT com 0,3 % de fração volumétrica, apresentando um crescimento de 30,4% em relação ao fluido base.

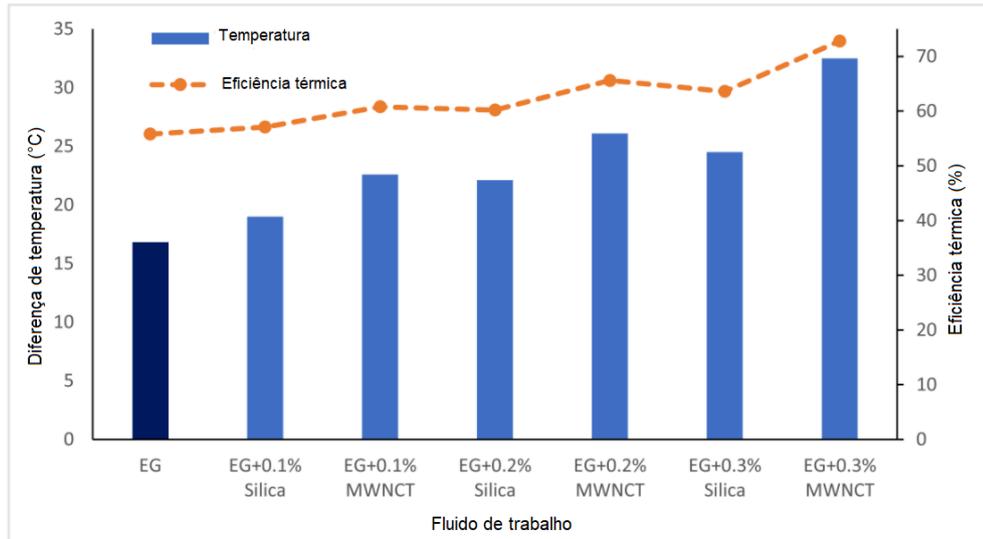


Figura 2.27. Eficiência térmica e diferença de temperatura para o fluido base e três diferentes frações volumétricas de duas nanopartículas (MWCNT e nanossilica). Fonte: Adaptado de Kasaeian *et al.* (2017)

Kaya, Arslan e Eltugral (2018) apresentaram um estudo experimental do uso de nanofluidos de ZnO em água e etilenoglicol (EG) em coletor solar de tubo em U. Foram usadas nanopartículas nas concentrações volumétricas de 1 – 4 % para três vazões mássicas (0,02 kg/s, 0,03 kg/s e 0,045 kg/s). Os resultados evidenciaram que a eficiência do coletor com o nanofluido de ZnO foi superior ao do fluido base (50 % água: 50 % EG) em todas as condições avaliadas. Conforme visto na Fig.2.28a, o maior valor de eficiência ocorreu para concentração de 3 % a 0,045 kg/s, determinado como 62,87 %, o que corresponde a um aumento de 26,42 % em relação ao fluido base. Os resultados quanto a variação da vazão revelou um aumento da eficiência para vazões mássicas mais altas, como mostrado na Fig.2.28.b.

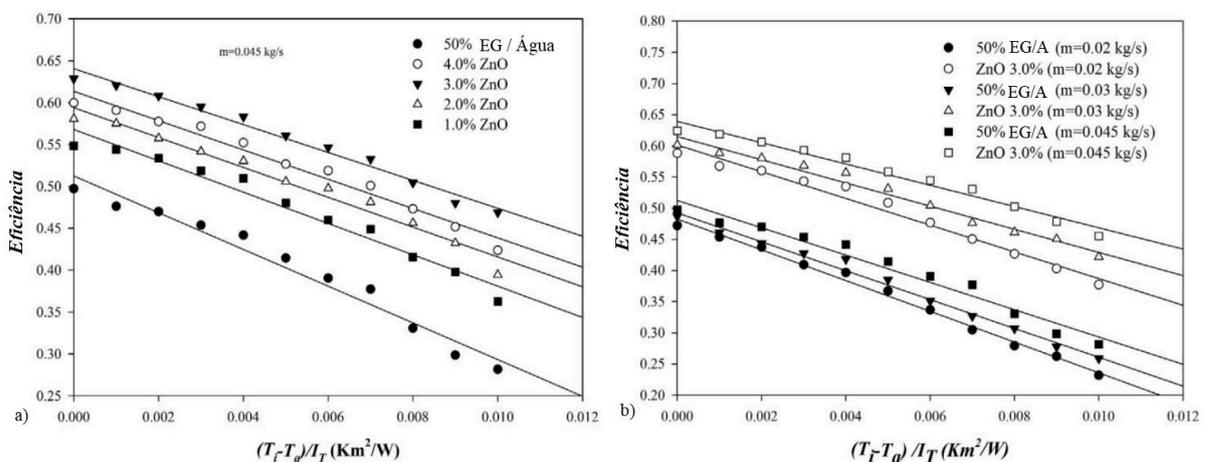


Figura 2.28. Variação da eficiência do coletor de acordo com a temperatura reduzida: a) em diferentes concentração de nanofluido; b) com diferentes vazões mássicas. Fonte: Adaptado de Kaya, Arslan e Eltugral (2018)

Utilizando nanofluidos de SWCNT/água em um coletor solar de tubo evacuado, Mahbubul *et al.* (2018) verificaram a melhoria de desempenho com o uso do nanofluido como fluido de trabalho em comparação com a água. Para as concentrações avaliadas, (0,05, 0,1 e 0,2 %vol.), foi verificado melhores condutividades térmicas conforme o aumento da concentração das nanopartículas, de forma que a eficiência térmica apresentou maior valor para o nanofluido com 0,2 %vol, onde foi verificado cerca de 10 % a mais de eficiência do que o coletor com uso de água.

Sharafeldin e Gróf (2018) avaliaram o desempenho de um coletor solar de tubo evacuado utilizando nanofluidos de CeO₂/água em comparação com o fluido base. Foram avaliados nanofluidos com partículas esféricas de 20 nm de diâmetro, nas concentrações de 0,015, 0,025 e 0,035 %vol., e com variação dos fluxos mássicos. O desempenho térmico foi verificado mediante os fatores de diferença de temperatura, ganho de calor útil e eficiência térmica. O máximo valor de diferença de temperatura foi verificado para o nanofluido de 0,035 %vol., atingindo 8,6 °C, para a água nas mesmas condições obteve-se 6,7 °C. Para o calor útil, foi verificado um ganho à medida que a fração volumétrica das nanopartículas aumentou, o aumento mínimo de ganho de calor observado foi de 19 % para a fração volumétrica de 0,015 % a 0,013 kg/s.m², e o aumento máximo de 42,3 % ocorreu no nanofluido de 0,035 %vol. a 0,017 kg/s.m². E para a eficiência térmica concluiu-se que essa foi aprimorada com o aumento da fração volumétrica e do fluxo mássico, obtendo um aumento de até 34 %.

Farajzadeh, Movahed e Hosseini (2018) apresentaram uma investigação numérica e experimental do uso de nanofluidos em um coletor solar de placa plana. Eles utilizaram nanopartículas de Al₂O₃ e TiO₂ para produção de nanofluidos de 0,1 % em peso, e nanofluidos da mistura dos dois na mesma proporção em 0,1 % e 0,2 % em peso, tendo a água como fluido base e adição de brometo cetiltrimetilamônio (CTAB) como surfactante. Os resultados da comparação da eficiência térmica indicaram que embora as nanopartículas de Al₂O₃ possuam condutividade térmica 3 vezes superior os de TiO₂, a eficiência térmica do nanofluido de TiO₂ foi um pouco superior, sendo explicada pela maior aglomeração no nanofluido de Al₂O₃, no entanto é pontuado que as nanopartículas de TiO₂ são muito mais caras, logo a escolha do nanofluido de Al₂O₃ apresenta-se como mais econômica. Ainda foi evidenciado que a eficiência térmica do nanofluido da mistura foi superior aos nanofluidos de Al₂O₃ e TiO₂, sendo o nanofluido da mistura mais barato do que o de TiO₂, os autores consideraram uma substituição apropriada. O aumento da eficiência em comparação com a água foi de 19 %, 21 % e 26 % para os nanofluidos com 0,1 % em peso de Al₂O₃ e TiO₂ e a sua mistura respectivamente. Em

avaliações posteriores com o nanofluido da mistura, foi constatado que o aumento da concentração de 0,1 % para 0,2 % em peso promove um aumento na eficiência térmica de 3,5 %, visto na Fig. 2.29, e considerando a variação da vazão volumétrica (1,5, 2,0 e 2,5 L/min), a eficiência máxima foi alcançada para 2,0 L/min. Por fim, o trabalho ainda destaca que houve uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais.

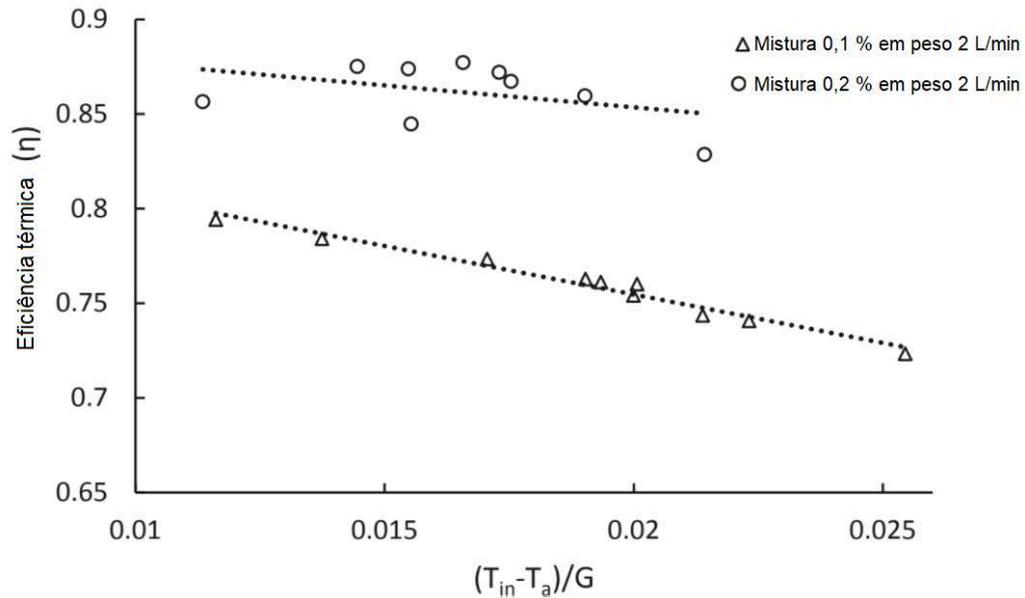


Figura 2.29. A eficiência do coletor solar de placa plana usando mistura nanofluido de 0,1 e 0,2% em peso a 2,0 L/min de vazão volumétrica. Fonte: Adaptado de Farajzadeh, Movahed e Hosseini (2018)

Verma *et al.* (2018) analisaram o desempenho de coletores solares de placa plana com uso de nanofluidos híbridos, realizando uma investigação experimental para nanofluido de 80 % MgO + 20 % MWCNTs em água e 80 % CuO + 20 % MWCNTs em água, além das composições individuais MgO / água, CuO / água e MWCNTs / água, variando as concentrações volumétricas dos nanofluidos de 0,25 % a 2 %. Para uma vazão mássica constante foi identificada como concentração de nível ótimo a faixa de 0,75 – 0,80 %.

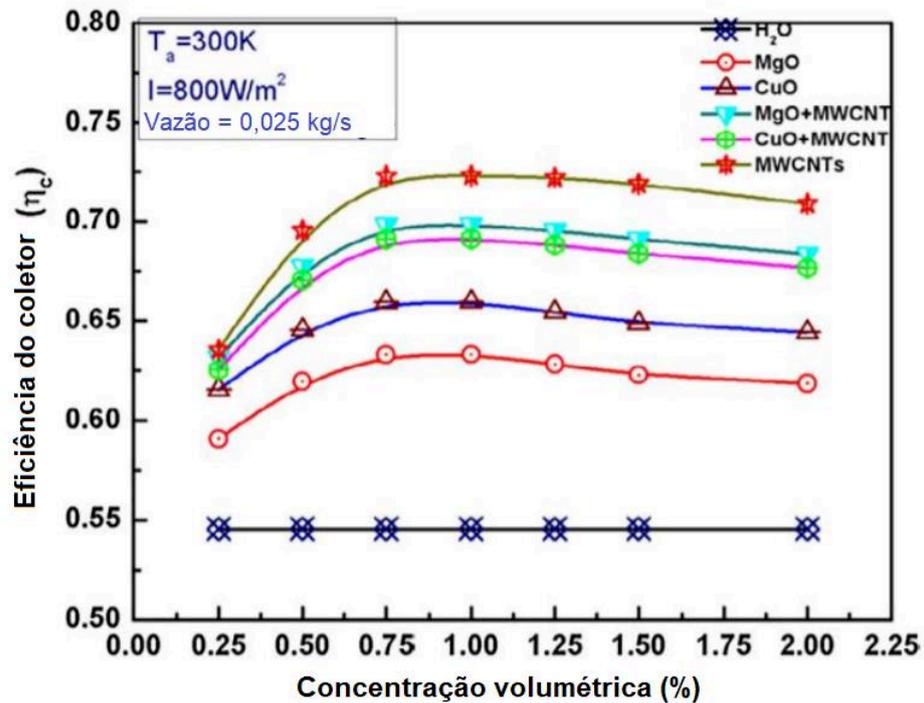


Figura 2.30. Eficiência vs (vol.%) partícula em vazão constante. Fonte: Adaptado de Verma *et al.* (2018)

Conforme apresentado na Fig. 2.30, o desempenho do coletor usando nanofluido híbrido é superior ao uso de nanofluido individual, mas inferior a MWCNT/água, porém comparando o desempenho do coletor quanto aos nanofluidos híbridos, o MgO+MWCNTs / água é significativamente melhor do que o CuO+MWCNTs / água, o autores atribuem esse resultado as propriedades térmicas e principalmente reológicas, pois o MgO tem menor densidade e viscosidade que o CuO. As melhorias de eficiência mais altas foram: 9,26%, 12,65% 18,05%, 20,52% e 23,47% respectivamente para MgO/água, CuO/água, híbrido CuO, híbrido MgO e nanofluidos MWCNTs/água.

Beicker *et al.* (2018) investigaram experimentalmente a conversão fototérmica para nanofluidos de Au/água e MWCNT/água em uma configuração experimental de um coletor solar de absorção direta. Foram utilizados nanofluidos com as concentrações volumétricas de 0,0001– 0,004% para o ouro e 0,0001–0,03% para MWCNT. Os resultados dos perfis de temperatura indicaram um aumento significativo até a concentração de 0,003 %, para concentrações superiores o comportamento tornou-se muito semelhante, além disso, amostras dos nanofluidos de Au durante a evolução dos dias de teste indicaram evidências de degradação do nanofluido de Au, levando a uma visível aglomeração e adesão de nanopartículas a superfície, reduzindo a absorção de luz solar, visto que a conversão fototérmica passa de volumétrica para superficial. Os resultados para os nanofluidos de MWCNT indicaram um

aumento da temperatura com o aumento da concentração até 0,001 %, não havendo variações significativas para concentrações mais altas. Desta forma, os autores discorrem sobre a existência de concentrações ideais para os nanofluidos, a partir da qual a adição de nanopartículas é irrelevante ou inviável, os valores definidos na pesquisa foram de 0,002 % e 0,001 % para Au e MWCNT respectivamente. Deve-se destacar ainda, que considerando os fatores econômicos, estabilidade e conversão fototérmica, o uso do nanofluido de MWCNT apresentou-se mais viável.

Tong *et al.* (2019) apresentaram um estudo das eficiências energéticas e exergéticas da água, nanofluidos de Al_2O_3 e nanofluidos de CuO em um coletor solar de placa plana, nas concentrações de 0,5 %, 1,0 % e 1,5 %vol. para Al_2O_3 , e 0,1 %, 0,3 %, 0,5 % e 0,7 %vol. para CuO. Para os dois nanofluidos foi verificado um aumento da eficiência energética com aumento da concentração até uma concentração ótima, a partir do qual o aumento da concentração reduz gradualmente a estabilidade da dispersão, devido ao aumento da agregação de nanopartículas. No estudo, foram identificadas como concentrações ótimas os valores de 1,0 %vol. para o nanofluido de Al_2O_3 , e 0,5 %vol. para o de CuO, onde, conforme visto na Fig.2.31, foram verificadas as eficiências máximas de 77,5 % e 73,9 % para Al_2O_3 e CuO, respectivamente, o que corresponde a um aumento na eficiência de 21,9 % e 16,2 % em comparação a água. Os maiores valores para a eficiência exergética também foram observadas nesses nanofluidos, onde a eficiência exergética do coletor foi melhorada em 59,6 % e 49,6 % em comparação com a água para os nanofluidos de 0,1 %vol. de Al_2O_3 e 0,5 %vol. de CuO, respectivamente. Assim foi indicado para desempenho máximo do coletor o nanofluido com 1,0 %vol. de Al_2O_3 .

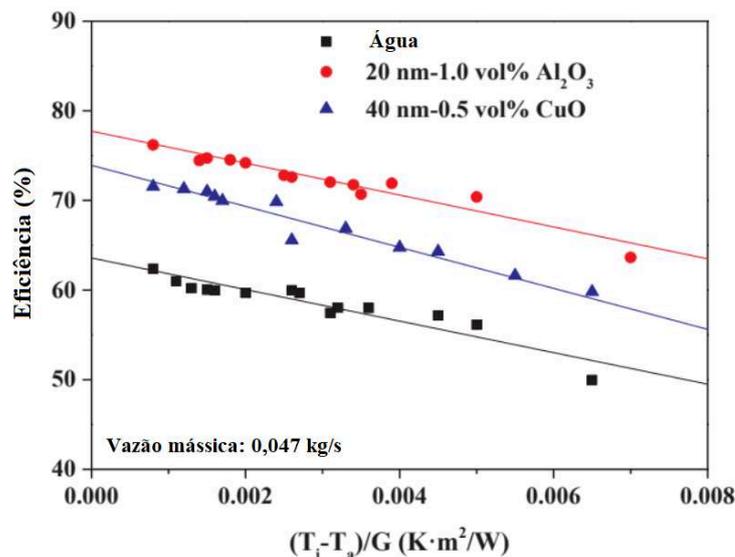


Figura 2.31. Comparação de eficiência para o coletor solar de placa plana usando água, nanofluido de Al_2O_3 e nanofluido de CuO. Fonte: Adaptado de Tong *et al.* (2019)

Eltaweel e Abdel-Rehim (2019) realizaram uma avaliação experimental utilizando nanofluidos de MWCNT/água em um coletor solar de placa plana com termossifão e com circulação forçada, com nanofluidos nas concentrações de 0,01 %, 0,05 % e 0,1 % em peso. Considerando a circulação por termossifão foram verificadas para eficiência energética do coletor os valores de 36,54 %, 51,29 %, 56,41 % e 70,67 % para água, nanofluido de 0,01, 0,05 e 0,1 % em peso respectivamente, evidenciando assim, que mesmo para uma pequena concentração houve um aumento significativo na eficiência, sendo o maior aumento, 34,13 %, visto para o nanofluido de 0,1 % em peso. Para exergia o maior valor observado, 23,35 % também ocorreu no nanofluido com 0,1 % em peso. Nos testes com circulação forçada foram utilizados água e o nanofluido de maior concentração, 0,1 % em peso, com as vazões volumétricas de 0,5, 1 e 1,5 L/min. Os maiores resultados da eficiência para água e nanofluido em circulação forçada, respectivamente, foram de 49,3 % e 76,92 % à 1,5 L/min, o que representou um aumento de 27,62 % na eficiência. Assim, os autores indicaram que a maior eficiência observada ocorreu no sistema de circulação forçada a 1,5 L/min, porém, destacaram que o uso de nanofluido para o sistema com termossifão tem um maior impacto na eficiência do coletor do que o uso de água no sistema de circulação forçada, sendo pontuado que o uso de nanofluido com o coletor por circulação em termossifão, promoveu uma eficiência superior ao uso do coletor com circulação forçada utilizando água como fluido de trabalho.

Dehaja e Mohiabadib (2019) investigaram o uso de nanofluidos de MgO/água em um coletor solar de tubo de calor evacuado. Eles analisaram os efeitos com a variação da vazão volumétrica, com 5, 8, 11 e 14 L/min, e com diferentes frações volumétricas, 0,014 % e 0,032 %. Foi constatado um aumento da eficiência do coletor com aumento da vazão e da fração volumétrica, além disso, de acordo com os resultados obtidos, a eficiência com uso de nanofluidos foi superior a água em todas as condições, visto que a maior eficiência máxima obtida com a água foi de 60 % para taxa de 14 L/min, enquanto a menor eficiência máxima com uso de nanofluidos foi de 62 %, para o nanofluido com 0,014 %vol. a 5 L/min. O maior valor da eficiência máxima, 77 %, ocorreu para o nanofluido com 0,032 %vol. a 14 L/min.

O desempenho térmico e eficiência de um coletor solar de tubo evacuado foram analisados por Sarafraz e Safaei (2019), utilizando nanofluidos de nanoplaquetas de grafeno dispersas em metanol com a presença do surfactante Nonil Fenol Etoxilato 400 (NPE400). A presença do surfactante teve influência expressiva na estabilidade do nanofluido, visto que sem a sua adição a suspensão indicou os primeiros sinais de deposição 7 h após o preparo, e com a adição do NPE400, a suspensão manteve-se estável por 10 dias, com deposição apenas no 11º dia. Para os testes experimentais foi verificado que a eficiência atingiu seu pico às 13:00 h,

sendo este o mesmo momento verificado para o pico de irradiação, que atingiu 920 W/m^2 , conforme discutido no texto, isso ocorre porque com o aumento da temperatura as propriedades termofísicas do fluido de trabalho, como a condutividade térmica, são melhoradas, além da intensificação do movimento browniano e efeito de termoforese. Houve um aumento da eficiência com aumento da vazão volumétrica e da concentração, como visto na Fig.2.32, de forma que a maior eficiência, 95 %, ocorreu para o nanofluido de 0,1 % em peso a 3 L/min.

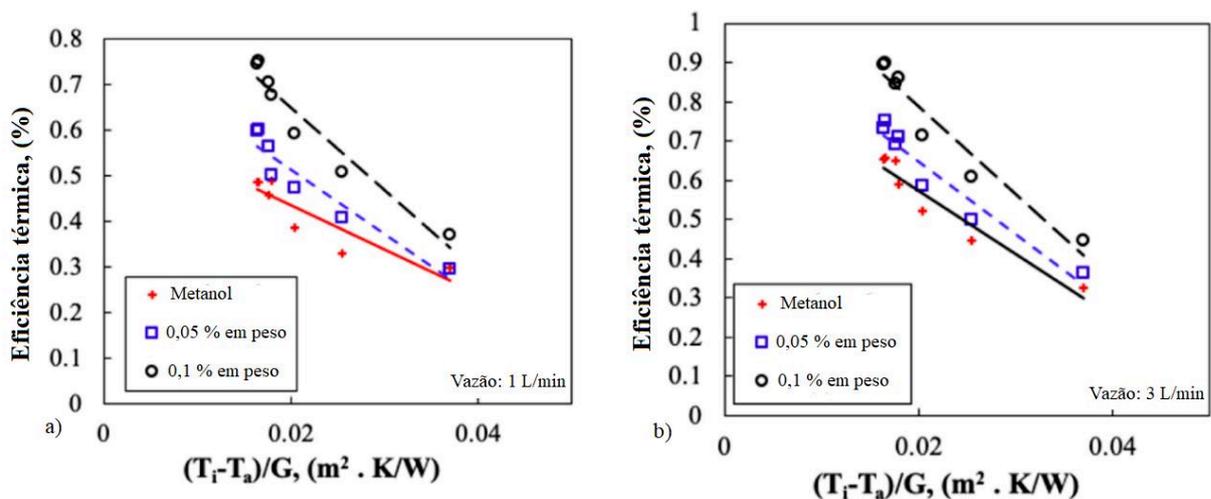


Figura 2.32. Dependência da eficiência térmica do coletor solar da temperatura reduzida para metanol e nanofluidos em duas frações mássicas diferentes: a) vazão: 1 L/min; b) vazão: 3 L/min. Fonte: Adaptado de Sarafraz e Safaei (2019)

Também utilizando um coletor solar de tubo evacuado, Sharafeldin e Gróf (2019) analisaram o uso de nanofluidos de WO_3 / água, com nanopartículas de 90 nm para as frações volumétricas de 0,014 %, 0,028 % e 0,042 % e com variação do fluxo mássico. Foi verificado um aumento na diferença de temperatura diante da adição de mais nanopartículas, os valores máximos de diferença de temperatura ocorreram para o nanofluido na concentração de 0,042 %, sendo obtido $9,5 \text{ }^\circ\text{C}$, $7,8 \text{ }^\circ\text{C}$ e $7,1 \text{ }^\circ\text{C}$ para os fluxos de $0,013$, $0,015$ e $0,017 \text{ kg/s.m}^2$ respectivamente, notou-se que fluxos mássicos mais baixos resultaram em maiores diferença de temperatura, visto que, nessa condição os fluidos levam mais tempo em contato com o tubo absorvedor quente, aumentando assim a temperatura de saída. Os efeitos observados para a eficiência termo-óptica do coletor evidenciaram um aprimoramento da eficiência com aumento do fluxo mássico e da concentração de nanopartículas, sendo o maior valor para eficiência obtido para o nanofluido com concentração de 0,042 % a $0,017 \text{ kg/s.m}^2$, a eficiência nessa condição (72,83 %) representa uma taxa positiva de 19,3 % em relação a água.

Natividade *et al.* (2019) realizaram uma análise experimental do uso de nanofluidos de

multicamadas de grafeno (MLG) em água em um coletor solar de tubo evacuado com concentrador parabólico. A pesquisa foi desenvolvida com uso de nanofluidos em baixas frações volumétricas, 0,00045 % e 0,00068 %, dispensando o uso de surfactantes. As análises realizadas para a água no coletor sem o concentrador parabólico e com o concentrador alcançaram respectivamente as eficiências médias de 4,8 % e 19,1 %, correspondendo a um aumento de 298 % com uso do concentrador. Para a condição experimental do uso de nanofluidos no coletor com concentrador parabólico foram verificadas as eficiências médias de 25,0 % e 33,6% para as concentrações de 0,00045 % e 0,00068 % respectivamente, indicando um aprimoramento da eficiência com a adição de nanopartículas, como mostrado na Fig.2.33. Mesmo em baixas concentrações o uso de nanofluidos trouxeram aumentos na eficiência de até 31 % e 76 %, vistos nas respectivas concentrações de 0,00045 % e 0,00068 %.

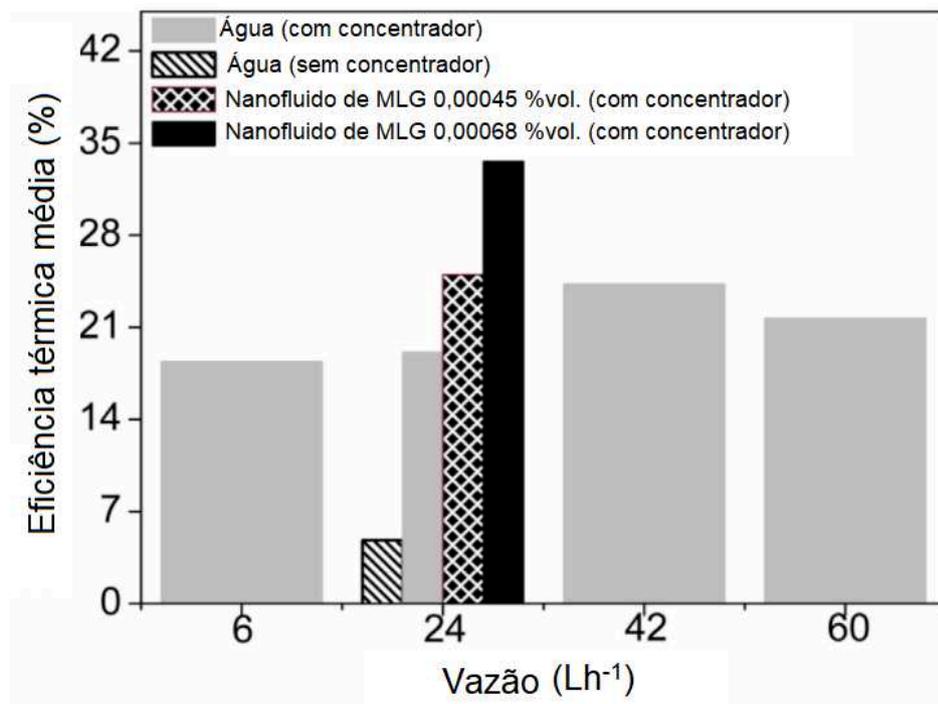


Figura 2.33. Eficiência térmica média do aparato experimental usando água e nanofluido de MLG como fluidos de trabalho. Fonte: Adaptado de Natividade *et al.* (2019)

Rajput *et al.* (2019) analisaram diferentes concentrações de nanofluido de Al_2O_3 em água destilada como fluido de trabalho em um coletor solar de placa plana. O estudo contou com nanofluidos de 0,1, 0,2 e 0,3 % vol., com adição do surfactante dodecil sulfato de sódio, com as vazões volumétricas variando de 1-3 L/min. De acordo com os resultados obtidos, a eficiência do coletor aumentou com o aumento da vazão e da fração volumétrica, apresentando um crescimento de 21,32 % ao aumentar a fração volumétrica de 0,1 % para 0,3 %.

Moravej *et al.* (2020) investigaram o efeito de nanofluidos de TiO_2 e água sobre a eficiência de um coletor solar de placa plana. Foram avaliados nanofluidos com concentrações mássicas de 1 %, 3 % e 5 % para diferentes vazões volumétricas, conforme pode ser visto na Fig.2.34. O estudo indicou que comparado com água pura, o uso do nanofluidos aumenta a eficiência do coletor, sendo destacado que houve aumento da eficiência tanto com o aumento da concentração quanto com o aumento da vazão, chegando a atingir ganhos de eficiência de 33,54 % para o nanofluido com 5 % de concentração mássica com vazão volumétrica de 0,050467 L/s. Os autores discorrem ainda quanto o aumento da lacuna das curvas a medida em que a vazão aumenta, atribuindo essa divergência ao movimento browniano e outros movimentos irregulares entre as partículas, que tendem a promover colisões aumentando assim a transferência de calor.

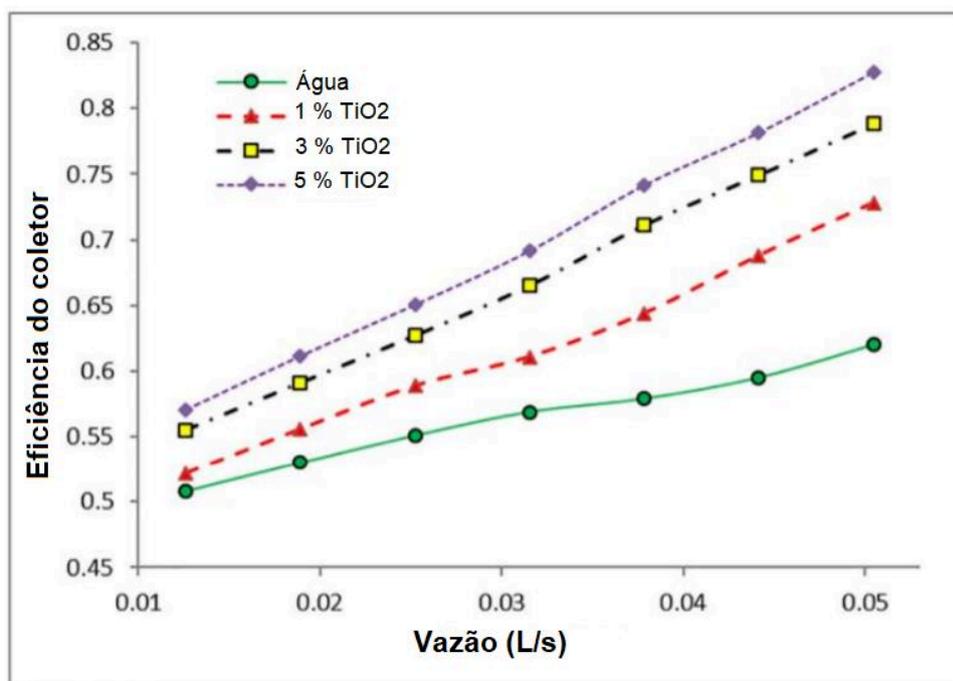


Figura 2.34. Eficiência do coletor em função da vazão para água pura e nanofluidos TiO_2 / água. Fonte: Adaptado de Moravej *et al.* (2020)

Kaya, Alkasem e Arslan (2020) investigaram numericamente o uso de nanofluido de Al_2O_3 e água pura em um coletor solar de tubo em U evacuado, foram analisadas diferentes concentrações de nanopartículas (1,0; 2,0; 3,0; 4,0 % em volume), vazões mássicas e formas de nanopartículas (lâmina, tijolo e plaquetas). De acordo com os resultados, a eficiência do coletor para os nanofluidos são maiores do que com água pura, onde o maior desempenho em termos de eficiência do coletor foi obtido com as nanopartículas com formas de tijolo com

concentração de 4,0 %vol. e vazão mássica de 0,025 kg/s, como indicado na Fig.2.35, atingindo o máximo de 67,1 %, sendo este um resultado 19,1 % maior do que o obtido para a água pura nas mesmas condições, e para as formas em lâminas e plaquetas foram obtidas, nessa ordem, as máximas eficiências de 62,8 % e 60,9 %, sendo 18,2 % e 17,6 % maiores que a do fluido base.

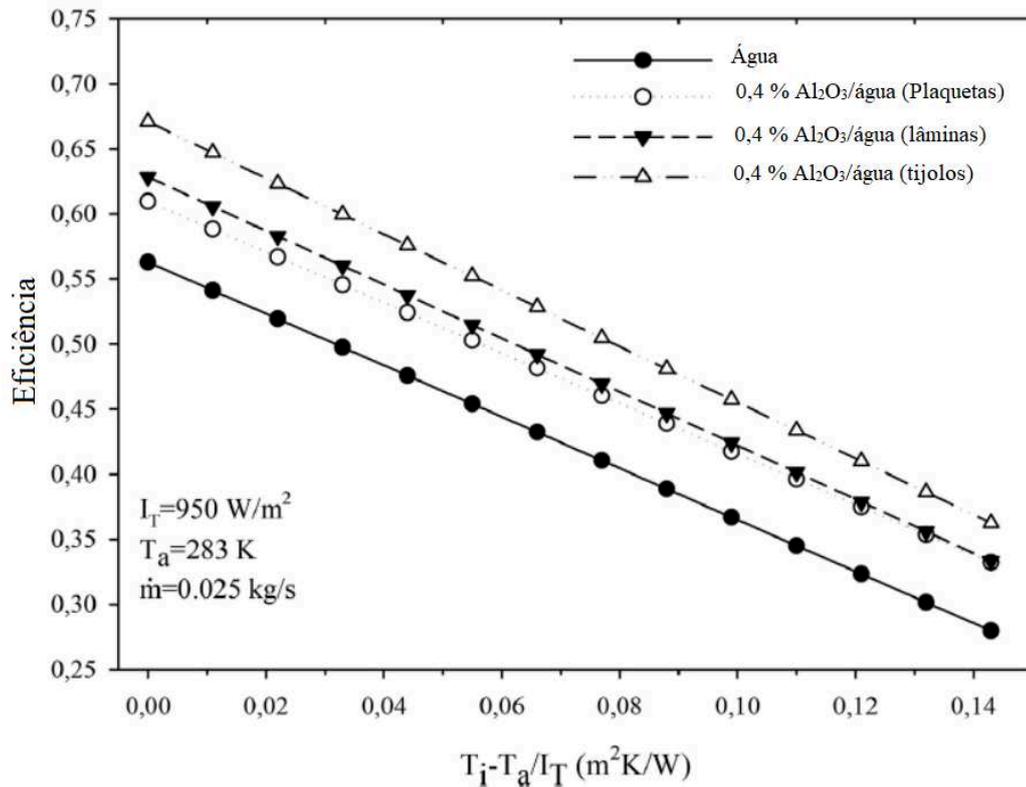


Figura 2.35. Variação da eficiência do coletor. Fonte: Adaptado de Kaya, Alkasem e Arslan (2020)

Kumar *et al.* (2020) investigaram o uso de nanofluidos plasmônicos de ouro e água deionizada com concentração de 0,0002 % em peso a diferentes vazões mássicas em um coletor solar de absorção direta. A máxima temperatura de saída do coletor com uso de nanofluidos foi de 55 °C, sendo 7 °C superior ao obtido pela água. Para os valores de eficiência térmica foi obtido o valor máximo de 95 % na vazão mássica de 0,030 kg/s, sendo este 33 % maior que o obtido para água, para as outras vazões de 0,025 kg/s e 0,017 kg/s o aumento foi de 29 % e 31 % respectivamente. Porém, o estudo revela que o fator de perda de calor máximo para o nanofluido à 0,030 kg/s é 42 % superior ao do fluido base, dessa forma a eficiência térmica do coletor diminuiu mais rapidamente em altas faixas de temperatura para o nanofluido em comparação com a água.

Joseph, Sreekumar e Thomas (2020) apresentaram uma investigação do nanofluido binário plasmônico o SiO₂/Ag-CuO em água em um coletor solar parabólico de absorção direta, foi feita a adição de dodecil sulfonato de sódio como surfactante. Obteve-se uma diferença de temperatura máxima de 11,27 K para o nanofluido, enquanto a maior diferença para a água foi de 2,61 K, ambos ocorrendo na vazão de 60 L/h. O aumento da vazão levou a melhoria da eficiência térmica do coletor, no entanto verificou-se uma diminuição da eficiência exergética, como visto na Fig.2.36. A maior eficiência térmica ocorreu para a vazão de 90 L/h, sendo de 64,13%, enquanto a água na mesma condição alcançou 15,86%, já a eficiência exergética máxima foi obtida para o nanofluido à 60 L/h, onde se verificou um aumento de em 8,4 % em comparação com a água.

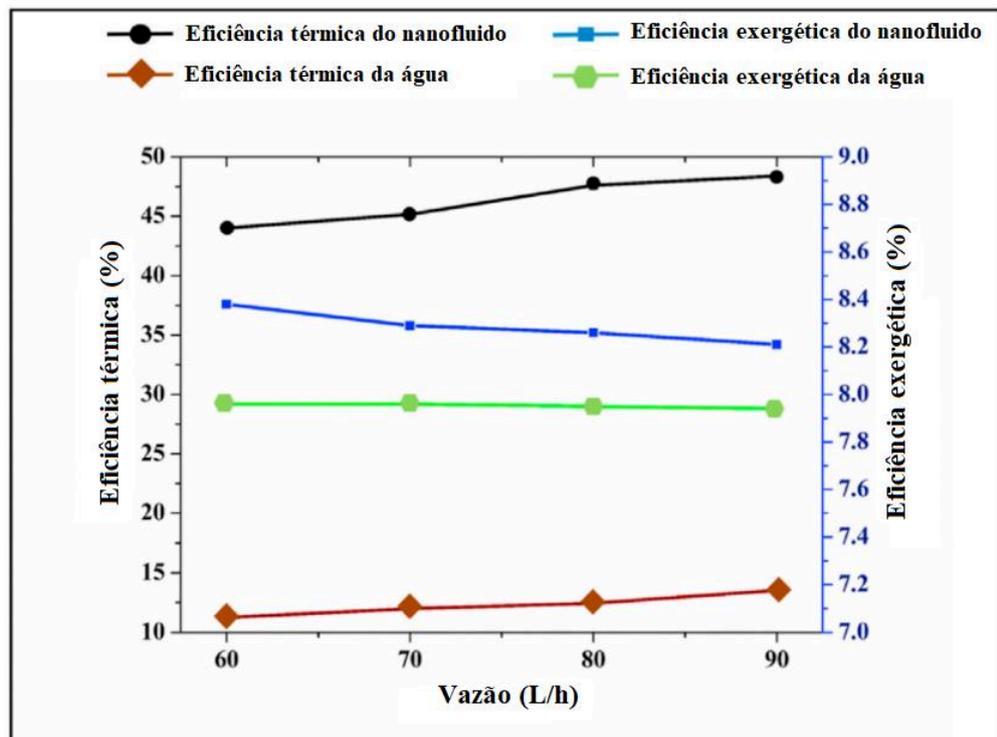


Figura 2.36. Eficiência térmica e eficiência exergética em várias vazões. Fonte: Adaptado de Joseph, Sreekumar e Thomas (2020)

Tong *et al.* (2020) utilizaram um coletor solar de placa plana para avaliar experimentalmente como fluido de trabalho água e nanofluidos de Al₂O₃, CuO, MWCNT e Fe₃O₄, verificando a sensibilidade da eficiência do coletor para variações de concentrações de nanofluidos, tamanho de nanopartículas, temperatura e radiação de energia solar. Foram usados três tamanhos para as nanopartículas de Al₂O₃ e MWCNT e dois tamanhos para as de CuO e Fe₃O₄. Considerando os resultados dos nanofluidos para a concentração ótima, a maior

concentração verificada foi para o nanofluido Al_2O_3 , enquanto a menor foi para o de MWCNT. Para uma redução de 80 % na radiação solar, a diminuição no desempenho foi maior para MWCNT, seguido por água, Fe_3O_4 , Al_2O_3 e CuO , a variação da taxa de redução de eficiência foi de 23,2% a 53,4%. Observando a sensibilidade da eficiência diante da mudança no tamanho das nanopartículas, foi constatado que o nanofluido CuO foi mais sensível, seguido pelos nanofluidos MWCNT, Al_2O_3 e Fe_3O_4 . A maior eficiência verificada nos testes ocorreu para o nanofluido MWCNT (87%), enquanto o menor foi de 62% visto no uso da água.

Hussein *et al.* (2020) desenvolveram um estudo sobre a melhoria do desempenho térmico com uso de nanofluidos híbridos em um coletor solar de placa plana. Os nanofluidos foram preparados em diferentes concentrações (0,05, 0,08 e 0,1 % em peso) utilizando MWCNT funcionalizados covalentes (CF-MWCNTs) e nanoplaquetas de grafeno funcionalizado covalentes (CF-GNPs) com nitreto de boro hexagonal (h-BN) tendo a água como fluido base. Eles concluíram que o desempenho do coletor usando nanofluido híbrido foi melhor do que o uso dos nanofluidos individualmente, tendo obtido nos testes a maior eficiência, 85 %, para o nanofluido híbrido com 0,1% em peso, o correspondente a uma eficiência 20 % maior que a obtida para água.

Sundar *et al.* (2020) avaliaram o uso de nanofluidos de nanodiamantes / água em um coletor solar de placa plana nas concentrações volumétricas de 0,2 %, 0,4 %, 0,6 %, 0,8 % e 1,0 %. Eles obtiveram para essas concentrações, respectivamente, o aumento da eficiência do coletor em comparação com os dados de água de 11,31 %, 18,86 %, 26,41 %, 33,96 % e 39,62 %, na vazão mássica de 0,083 kg/s. Com base no aumento da eficiência térmica, foi calculado o potencial de redução da área coletora, diminuição do peso do coletor e redução da emissão de CO_2 para fabricação dos coletores. Sendo a área do coletor de 3 m², foi obtida uma redução de até 28,66%, para a concentração de 1,0 %, como apresentado na Fig.2.37. Essa redução promove uma economia significativa de materiais para o coletor, passando de 50 kg (vidro: 38 kg e cobre: 12 kg), para 35,81 kg (vidro: 27,21 kg e cobre: 8,59 kg) na condição de 1,0 %vol., o que corresponde a uma redução 28,38 %, impactando diretamente também na redução de custos. Com a redução do tamanho, as emissões de CO_2 referentes à fabricação do coletor reduziram de 880,9 kg, do coletor de 50 kg, para 630,91 kg no coletor da condição de nanofluido de 1,0 %vol.

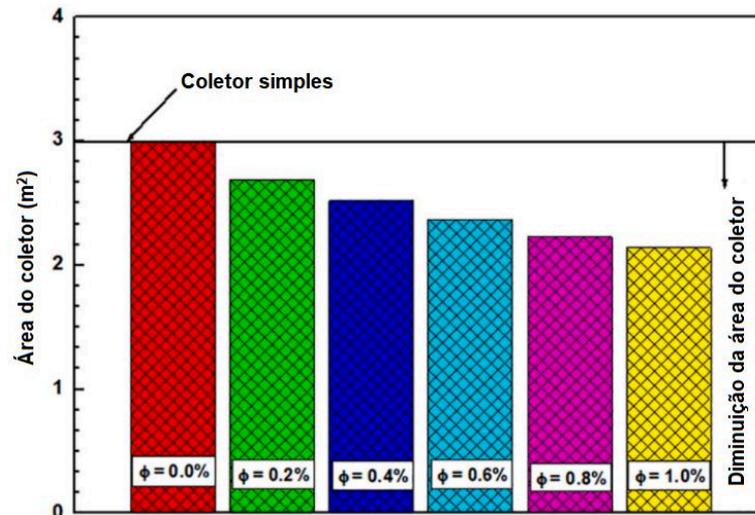


Figura 2.37. Diminuição da área coletora em relação à concentração volumétrica do nanofluido. Fonte: Adaptado de Sundar *et al.* (2020)

Os efeitos na eficiência energética e exergetica do uso de nanofluido de MWCNT / água com três frações de peso (0,005 %, 0,01 % e 0,05 %) em um coletor solar de tubo evacuado foram investigadas por Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2020). Eles destacaram que o aumento da concentração melhora a condutividade térmica, o que reflete na melhoria na eficiência térmica, mas também aumenta a viscosidade, porém, diante das baixas concentrações utilizadas, a viscosidade, na maior concentração utilizada, aumentou apenas 0,5 % em relação à água. O estudo concluiu que a eficiência energética e exergetica aumentam com o aumento da vazão e com o aumento da fração em peso do MWCNT, de forma que foi alcançado como maiores eficiências médias de energia e exergia 55% e 10% respectivamente, na concentração mais alta de 0,05% em peso.

No ano seguinte Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021) apresentaram um estudo comparando o uso de nanofluidos de MWCNT / água em um coletor solar de placa plana e de tubo evacuado, mostrados na Fig.2.38, com as concentrações em peso de 0,005 %, 0,01 % e 0,05 %. De acordo com os resultados obtidos, o aumento da vazão mássica e da fração de peso de MWCNT aumentam as eficiências energética e exergetica, no entanto os valores para essas eficiências foram maiores no coletor solar de placa plana, sendo alcançado para eficiência energética média 55% e 59%, e para a eficiência exergetica média 10% e 11,5%, no coletor de tubo evacuado e placa plana, respectivamente, com 0,05% em peso MWCNT. Os autores justificam que apesar dos coletores possuírem aproximadamente a mesma área bruta, o coletor de placa plana tem maior área ativa, visto que sua composição em serpentina oferece maior tempo de permanência do fluido no coletor. Com base na melhoria da eficiência, o tamanho do

coletor pode ter uma redução de 29,5% e 26,7%, para o coletor solar de tubo evacuado e de placa plana respectivamente.

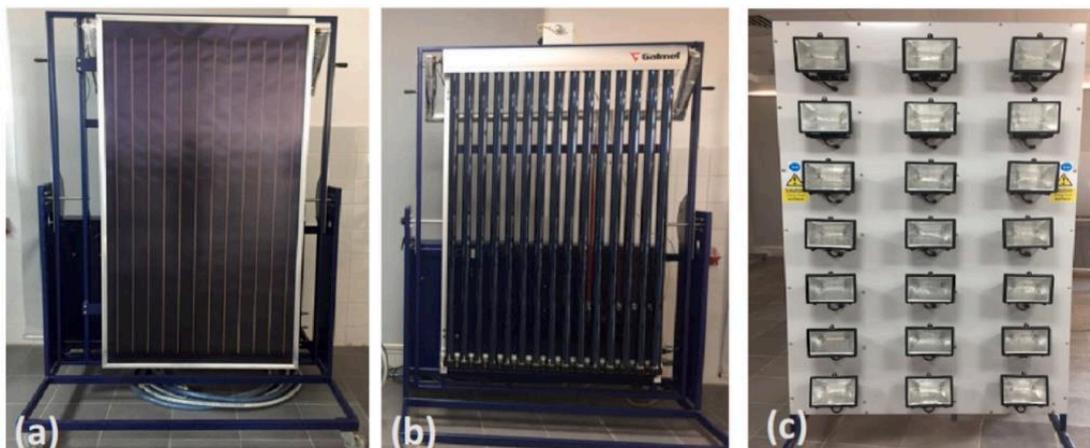


Figura 2.38. Fotografia (a) do coletor solar de placa plana (b) do coletos solar de tubo evacuado (c) da luz solar artificial. Fonte: Adaptado de Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021)

Em um trabalho experimental, Akram *et al.* (2021) analisaram o desempenho de nanofluidos de carbono e óxidos de metal em um coletor solar de placa plana. Os nanofluidos analisados foram composições de nanopartículas de grafeno (GNPs) / água, dióxido de silício (SiO_2) / água e óxido de zinco (ZnO) / água. Os resultados indicaram aumento da eficiência do coletor em comparação com água, para uma concentração de 0,1 % em peso das nanopartículas, os melhores incrementos de eficiência foram obtidos para vazão mássica de 1,6 kg/min sequenciados como GPNs > ZnO > SiO_2 correspondendo respectivamente aos valores 17,45 % > 13,05 % > 12,36 %, essa sequência também foi mantida para as vazões de 0,8 kg/min e 1,2 kg/min.

Em um estudo experimental Hosseini e Dehaj (2021) avaliaram o desempenho de um coletor solar de calha parabólico, utilizando nanofluidos em base aquosa com nanopartículas de alumina (Al_2O_3) e óxido de grafeno (GO). Os resultados para condutividade térmica mostraram que em comparação com a água, o aumento da condutividade térmica do nanofluido de GO é maior do que a do nanofluido de Al_2O_3 , o melhor aumento na condutividade térmica foi obtido no nanofluido GO a 50 °C, sendo 24,3 % maior do que a água, no nanofluido de Al_2O_3 o aumento foi de 12,4%. Para avaliação do desempenho do coletor, os experimentos foram realizados em três vazões volumétricas 1, 3 e 5 L/min, a 1 L/min, a eficiência máxima em comparação com a água aumentou de 32,1 % e 63,2 % para os nanofluidos de Al_2O_3 e GO respectivamente, a 3 L/min, o aumento foi de 16,6 % e 45,9 % e em 5 L/min aprimoramento alcançou 13% e 34,7 %. Os autores discorrem que a diminuição da eficiência térmica dos

nanofluidos com o aumento da vazão, ocorre pelo aumento exponencial na queda de pressão e potência de bombeamento que atuam como uma restrição hidráulica contra a eficiência térmica.

Struchalin *et. al* (2021) analisaram o uso de nanofluido em um coletor solar tubular de absorção direta, conforme esquema apresentado na Fig.2.39. O nanofluido utilizado foi composto por nanotubos de carbono de parede múltiplas (MWCNT) dispersos no fluido base de água-etanol, com concentrações variando de 0,0015 à 0,082 % em peso. Os autores apontam que a concentração das nanopartículas afeta o aquecimento do coletor, foi visto que nanofluidos com concentrações de MWCNT acima de 0,003 % apresentam eficiência maior que uma superfície opaca, sendo ainda identificada a existência de uma concentração ótima, estabelecida como 0,01 % em peso, com esta concentração, foi possível obter um aumento na eficiência do coletor solar de 5,8 - 37,9 % em relação a uma geometria equivalente com superfície opaca.

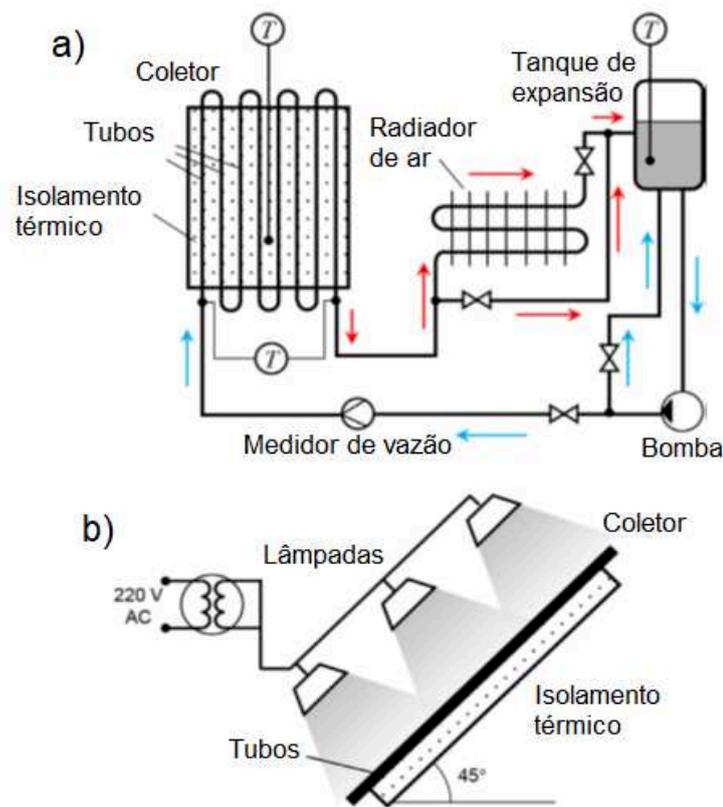


Figura 2.39. Esquema do coletor solar tubular de absorção direta: a) Vista frontal; b) Vista lateral. Fonte: Adaptado de Struchalin *et. al* (2021)

Dehaj *et al.* (2021) realizaram um estudo comparativo do uso de nanofluidos de NiFe_2O_4 / água em um coletor solar de calha parabólica com e sem o uso de tubo absorvedor em U. Foram avaliados nanofluidos com frações volumétricas de 0,01 % e 0,05 %, nas vazões volumétricas de 0,5, 1,5 e 3 L/min. O aumento da vazão (número de Reynolds) e fração

volumétrica dos nanofluidos, refletiram no aumento do coeficiente de transferência de calor e da queda de pressão, no entanto o aumento na queda de pressão foi menor em comparação ao do coeficiente de transferência de calor. De forma geral, a eficiência do coletor foi aprimorada com o aumento da vazão e da concentração, mas os resultados da eficiência para o coletor com o tubo em U foram maiores. Como apresentado na Fig.2.40, a eficiência máxima do coletor para água, e os nanofluidos de 0,01% e 0,05 % alcançaram 34%, 40% e 47% respectivamente, no coletor com o tubo em U a 3 L/ min, enquanto para o coletor sem o tubo em U a eficiência alcançou 28 %, 38 % e 40 %.

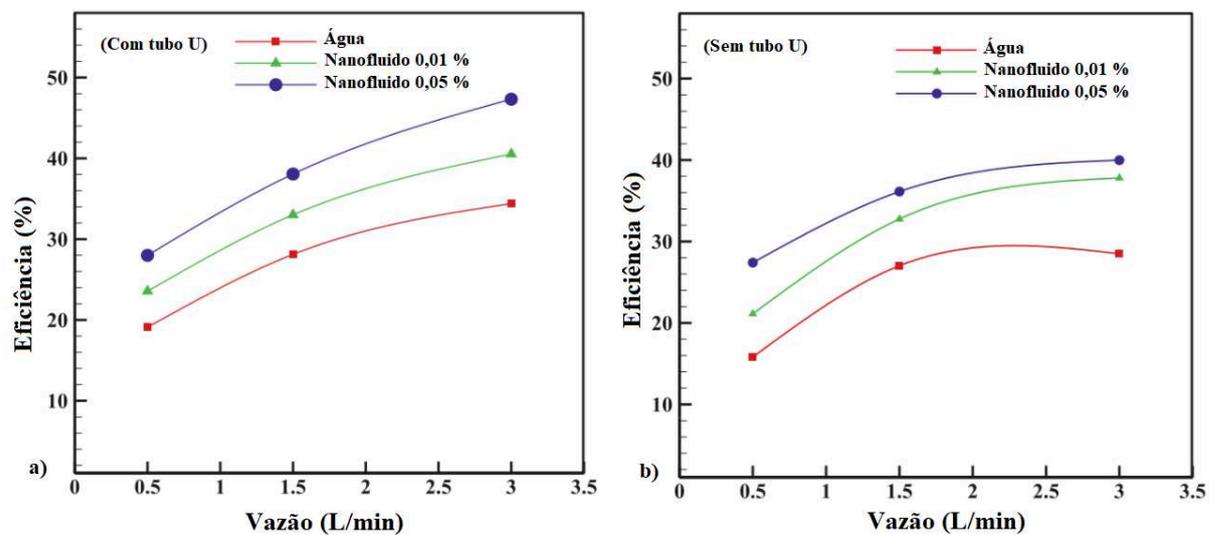


Figura 2.40. Efeito do fluido de trabalho e vazão na eficiência do coletor: a) Com tubo em U b) sem tubo em U. Fonte: Adaptado de Dehaj *et al.* (2021)

Farhana *et al.* (2021), avaliaram o uso de nanofluidos de Al_2O_3 e de cristal de nanocelulose (CNC) em um coletor de placa plana, destacando a relevância do uso de CNC principalmente devido a sua biodegradabilidade e aspecto ecológico. Os fluidos foram produzidos tendo como fluido base etilenoglicol (EG) com água (A:EG 60:40), sendo preparados para cada tipo de nanopartículas, nanofluidos com frações volumétricas de 0,1 %, 0,3 % e 0,5 %, embora as avaliações de aplicação no coletor tenham sido feitas apenas para as concentrações de 0,3 % e 0,5 %, diante de resultados inconsistentes nas propriedades termofísicas para a concentração de 0,1 %. A maior eficiência foi alcançada no nanofluido de 0,5 % de CNC, alcançando um incremento da eficiência de até 5,8 %. Embora tenha sido verificado um boa estabilidade para os nanofluidos de Al_2O_3 , os autores destacaram que o tamanho e a forma das nanopartículas possuem influência na eficiência térmica, visto que as nanopartículas de CNC possuíam tamanho abaixo de 50 nm, e as de Al_2O_3 , abaixo de 80 nm,

sendo geralmente verificado que nanopartículas menores resultam em melhor eficiência.

Wang *et al.* (2021), realizaram um estudo comparativo de propriedades e conversão fototérmica em um sistema térmico de absorção direta com nanofluidos de dois nanomateriais bidimensionais, o grafeno e o MXene ($\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$), sendo o segundo com comprovado efeito de ressonância plasmônica de superfície localizada (LSPR). Para cada material foram produzidos nanofluidos de 5, 10, 20, 40, 60 ppm dispersos em água, e usando citrato de sódio como antioxidante e dispersante. A condutividade térmica do grafeno foi superior a do MXene, no entanto, o MXene exibiu melhor estabilidade e capacidade de absorção de energia solar. Como apresentado na Fig.2.41, o nanofluido de $\text{Ti}_3\text{C}_2\text{T}_x$ atingem a máxima eficiência de conversão fototérmica de 63,35% a 20 ppm, que foi 4,34 % superior ao máximo obtido para o grafeno, de 60,92 % a 40 ppm.

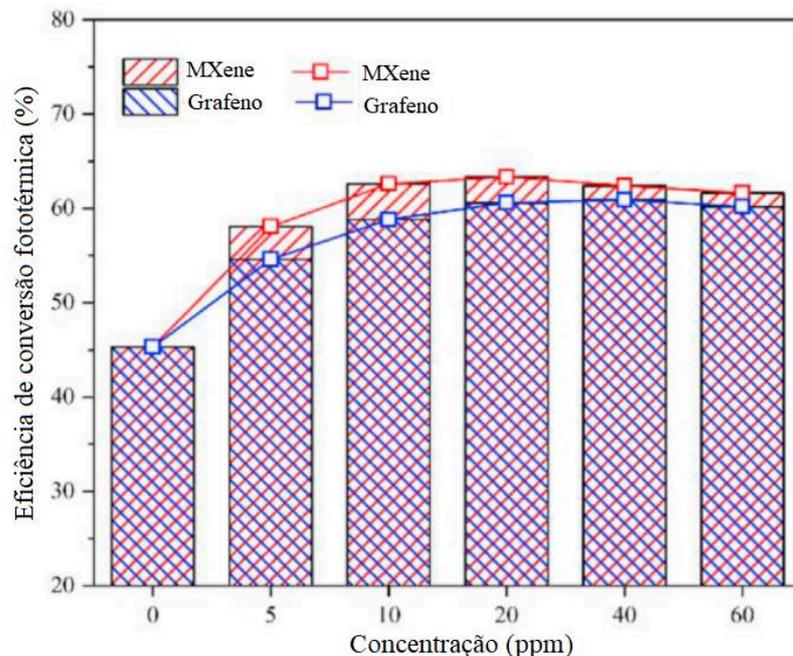


Figura 2.41. Eficiência de conversão fototérmica dos nanofluidos de MXene e grafeno. Fonte: Adaptado de Wang *et al.* (2021)

Guo *et al.* (2022) utilizaram nanofluidos de Ti_3C_2 (MXene), GO e MWCNT dispersos em um líquido iônico ($[\text{BMIM}]\text{BF}_4$) como fluido de trabalho em um coletor solar de absorção direta. Os nanofluidos de $\text{Ti}_3\text{C}_2/[\text{BMIM}]\text{BF}_4$ foram preparado nas frações mássicas de 0,001, 0,002, 0,005, 0,02 e 0,04 %, enquanto os nanofluidos de $\text{GO}/[\text{BMIM}]\text{BF}_4$ e $\text{MWCN}/[\text{BMIM}]\text{BF}_4$ apenas nas concentrações de 0,02 % em peso. Os resultados para variações das concentrações no nanofluido de Ti_3C_2 mostraram que a variação de 0,001 a 0,004 % em peso culminou em um aumento nas maiores temperaturas de 356,1 K para 416,2 K, com

maior eficiência de conversão fototérmica, 75,7 %, obtida na concentração de 0,04 % em peso. Para o comparativo entre as diferentes composições de nanofluidos, com concentrações de 0,02 % em peso, as temperaturas mais altas foram 376,4 K, 401,5 K e 413,4 K para os nanofluidos de GO, MWCNT e Ti_3C_2 , nessa ordem, e de 56,7 %, 53,7 % e 69,4 % para as eficiências de conversão fototérmica, revelando assim, que o nanofluido de Ti_3C_2 foi 20 % e 29 % superior aos nanofluidos de GO e MWCNT, respectivamente.

Zidan, Maia e Safaei (2022) avaliaram numericamente o uso de oito diferentes composições de nanofluidos operando como fluido de trabalho em um coletor solar de calha parabólica, foram comparados os nanofluidos de Fe_3O_4 , $MnFe_2O_4$, CuO, Fe_2O_3 , Al_2O_3 , MgO, SiO_2 e TiO_2 dispersos em terminol VP-1. O coletor atuava como fonte de calor de um ciclo orgânico Rankine, os melhores desempenhos para resultados de eficiência do ciclo foram obtidos pela aplicação dos nanofluidos de TiO_2 e MgO, as quais levaram o sistema a atingir eficiências médias anuais de 28,56 % e 28,53 %, respectivamente, devendo ainda destacar que o nanofluido de TiO_2 atingiu 33,20 MW, 14,48 MW, 95,35 %, 43,90 % respectivamente a energia útil, exergia útil, eficiência média anual e eficiência exergética.

Ham, Shin e Cho (2022) realizaram um estudo experimental avaliando o uso de água e nanofluido Fe_3O_4 /água em um coletor solar de absorção superficial e um coletor solar de absorção volumétrica, apresentados na Fig.2.42. O desempenho térmico de dois coletores solares foi investigado usando um simulador solar com lâmpadas halógenas, nanofluidos com concentrações em peso de 0,01, 0,05 e 0,1%, nas vazões mássicas de 0,0025 e 0,005 kg/s. Para o coletor de absorção superficial o calor útil máximo atingiu o pico no nanofluido de 0,05 % em peso, os valores obtidos a 0,0025 e 0,005 kg/s foram de 73,69 e 74,28 W, respectivamente, correspondendo a uma melhora de 3,67 % e 2,26 % em relação à água. O calor útil diminuiu para a concentração mais alta (0,1 %), indicando que existe um limite na concentração de nanopartículas para melhora térmica. Já para o coletor de absorção volumétrica o calor útil foi aumentado com o aumento a concentração, de forma que o aumento da concentração de 0 a 0,1 % em peso, proporcionou o salto de 62,51 W para 71,78 W e 67,25W para 76,91 W nas vazões mássicas de 0,0025 e 0,005 kg/s, respectivamente, representando uma melhora de 14,84 % e 14,36 % em comparação com a água.

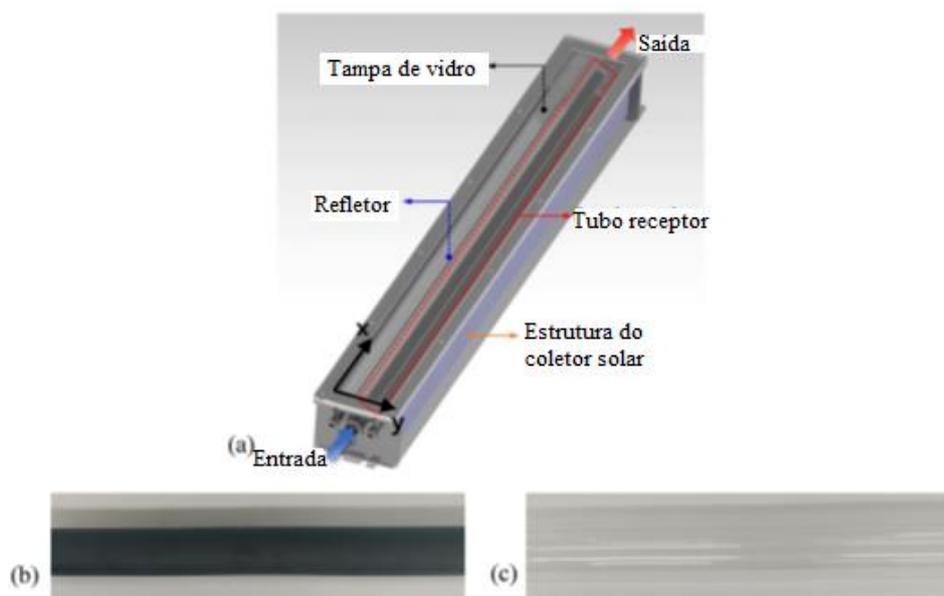


Figura 2.42. a) Esquema do coletor solar; b) Tubo receptor de absorção superficial (tubo de cobre revestido de grafite); c) Tubo receptor de absorção volumétrica (tubo de policarbonato). Fonte: Adaptado de Ham, Shin e Cho (2022).

Utilizando um coletor solar parabólico de absorção direta, apresentado na Fig.2.43, Joseph e Thomas (2022) avaliaram nanofluidos produzidos com materiais de ponto quântico de carbono (CQD), que tratam-se de uma nanoestrutura emergente com tamanho inferior a 10 nm, conforme discutido na pesquisa, o movimento browniano, mecanismo responsável pela melhora da condutividade, é predominante em partículas menores, assim como uma melhor estabilidade. Os nanofluidos de C-dot / água foram produzidos pelo método de uma etapa obtendo nanopartículas com tamanhos de 4 – 8 nm. Os resultados obtidos para absorvidade solar na profundidade de 1,5 cm, que corresponde ao diâmetro do absorvedor, foi de aproximadamente 94 % de absorção. Os testes foram conduzidos nas vazões volumétricas de 60 L/h à 90 L/h, sendo obtido a temperatura máxima de saída de 43,49 °C à 60 L/h com uso do nanofluido, enquanto para água o máximo valor foi de 33,33 °C. Para a eficiência térmica do coletor o máximo valor obtido, 73,41 %, ocorreu para o nanofluido a 90 L/h, e corresponde a uma melhora de 57,62 % em relação à água. Os autores ainda compararam o uso do nanofluido com a água em relação a taxa de corrosão do aço obtendo uma taxa de corrosão de 0,094 mm/ano para o C-dot/água, e para a água de 0,372 mm/ano, além disso o custo estimado por eficiência do nanofluido foi menor do que o do fluido base.

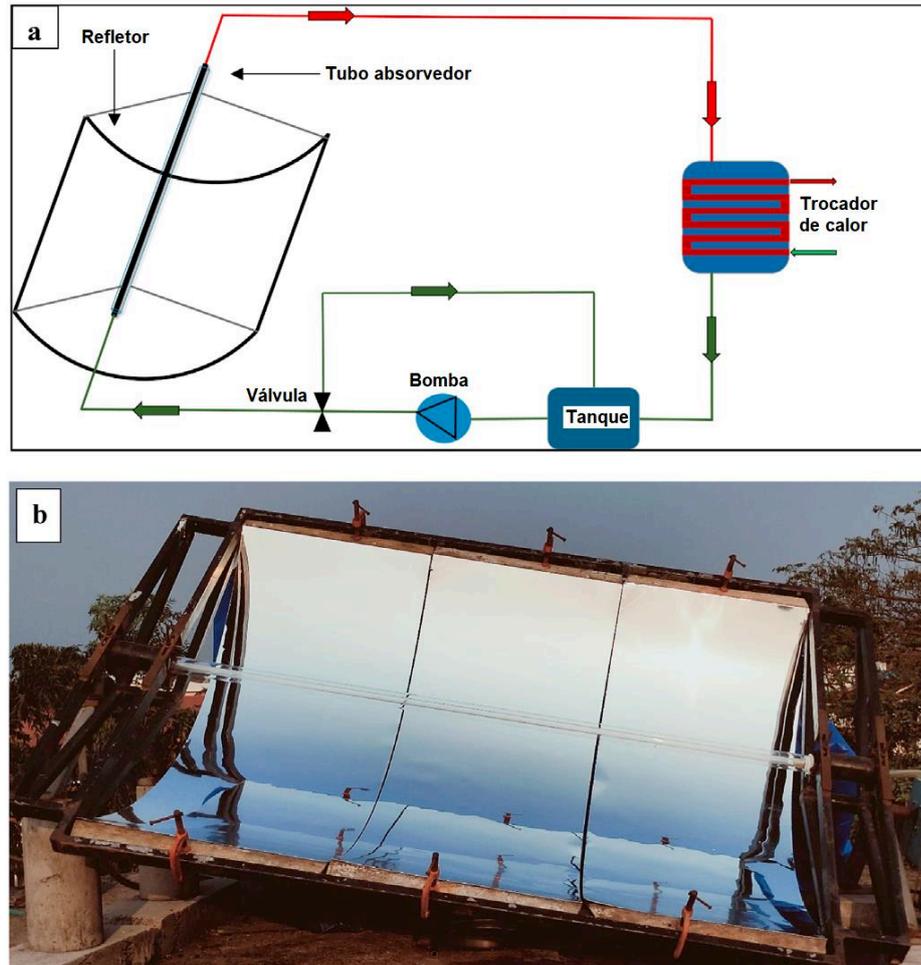


Figura 2.43. a) Esquema de instalação do coletor solar parabólico de absorção direta b) Coletor parabólico.
Fonte: Adaptado de Joseph e Thomas (2022)

A Tabela 2.1 apresenta um resumo dos trabalhos contemplados nessa revisão sobre aplicação de nanofluidos em coletores solares no período de 2012 a 2022.

Tabela 2.1. Resumo dos trabalhos revisados de aplicação de nanofluidos em coletores solares

Autores	Nanofluido	Concentração	Tema	Tipo de estudo	Resultados e comentários
Yousefi <i>et al.</i> (2012a)	MWCNT/ água	0,2 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Quanto maior a diferença entre pH do nanofluido e do ponto isoelétrico maior o aumento da eficiência
Yousefi <i>et al.</i> (2012b)	MWCNT/ água	0,2 e 0,4 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Sem uso de surfactante o aumento da eficiência foi verificado apenas para maior concentração
Yousefi <i>et al.</i> (2012c)	Al ₂ O ₃ / água	0,2 e 0,4 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência com ou sem uso de surfactante

Faizal <i>et al.</i> (2013)	CuO, SiO ₂ , TiO ₂ , Al ₂ O ₃ / água	-	Aplicação em coletor solar de placa plana	Teórico	Potencial para redução do tamanho e peso de coletores solares com uso de nanofluidos
He <i>et al.</i> (2013)	Cu / água	0,01, 0,02, 0,04, 0,1 e 0,2 % em peso	Propriedades	Experimental	Aumento da temperatura em até 25,3 % em comparação com água
Ladjevardi <i>et al.</i> (2013)	Grafite / água	0,000025, 0,00025 e 0,0025 % vol.	Aplicação em coletor solar volumétrico	Teórico	Melhor custo benefício para uso da fração de volume de 0,00025 %
Zamzamian <i>et al.</i> (2014)	Cu / etilenoglicol	0,2 e 0,3 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Dependência da eficiência com a vazão e concentração do nanofluido
Karami <i>et al.</i> (2014)	f-CNT / água	5, 10, 25, 50, 100 e 150 ppm	Propriedades	Experimental	Aumento de 32,2 % na condutividade térmica para o nanofluido de 150 ppm em comparação com a água
Moghadam <i>et al.</i> (2014)	CuO / água	0,4 % vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência do coletor em 16,7 % em comparação com a água
Bandarra Filho <i>et al.</i> (2014)	Ag / água	1,6, 3,2, 6,5, 65 e 650 ppm	Aplicação em sistema térmico solar de absorção direta	Experimental	Aumento de 144 % da energia térmica máxima armazenada.
Meibodi <i>et al.</i> (2015)	SiO ₂ / água + etilenoglicol	0,5, 0,75 e 1 % vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento de 4 a 8 % da eficiência do coletor
Sabiha <i>et al.</i> (2015)	SWCNT / água	0,05, 0,1 e 0,2 % vol.	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Aumento da eficiência do coletor em até 71,84 % comparado com a água
Tong, Kim e Cho (2015)	MWCNT / água	0.2 vol%	Aplicação em coletor solar de tubo U evacuado	Teórico e experimental	Coefficiente de transferência de calor superior em 8 % comparado com a água
Gupta, Agrawal, Mathur (2015)	Al ₂ O ₃ / água	0,001, 0,005, 0,01 e 0,05 % vol.	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Aumento da eficiência de 39,6 % obtido na concentração de 0,005 %
He, Zeng, Wang (2015)	Cu / água	0,01, 0,02, 0,04, 0,1 e 0,2 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Maior aumento da eficiência para nanopartículas menores e em menor fração de massa

Said <i>et al.</i> (2015)	TiO ₂ / água	0,1 e 0,3 % vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento de até 76,6 % e 16,9 % para eficiência energética e exergética respectivamente em comparação com a água.
Noghrehabadi, Hajidavalloo e Moravej (2016)	SiO ₂ / água	1% em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência com aumento da radiação solar incidente e da vazão
Ghasemi e Ranjbar (2016)	Al ₂ O ₃ , CuO/ água	0,5, 1 e 3 %vol.	Aplicação em coletor solar de calha parabólico	Teórico	Aumento do número de Nusselt relativo
Chen <i>et al.</i> (2016)	Ag / água	0 – 0,1 %vol.	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Teórico e experimental	Identificação de valores práticos de fração volumétrica e altura do coletor para resultados ótimos de eficiência
Menbari, Alemrajabi e Rezaei (2016)	CuO / água	0,002, 0,004 e 0,008 %vol.	Aplicação em coletor solar parabólico de absorção direta	Teórico e experimental	Aumento da eficiência com o aumento da fração volumétrica e vazão
Vincely e Natarajan (2016)	GO / água	0,005, 0,01 e 0,02 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento de 11,5% do coeficiente de transferência de calor
Verma, Tiwari e Chauhan (2016)	MgO / água	0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,25 e 1,5 %vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento de 9,34 % e 32,23 % na eficiência energética e exergética respectivamente. Redução da área do coletor em até 12,5 %
Verma, Tiwari e Chauhan (2017)	MWCNT, grafeno, CuO, Al ₂ O ₃ , TiO ₂ , SiO ₂ / água	0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,25, 1,5 e 2,0 %vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência energética em até 23,5 % em comparação com fluido base
Iranmanesh <i>et al.</i> (2017)	GNP / água	0,025, 0,5, 0,075 e 0,1% em peso	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Eficiência de 90,7 % usando nanofluido com 0,1 % em peso a 1,5 L/min
Kim <i>et al.</i> (2017)	Al ₂ O ₃ / água	0,5, 1 e 1,5 %vol.	Aplicação em coletor solar de tubo em U	Experimental	Aumento da eficiência de até 24,1 % em relação água
Sharafeldin, Grof e Mahian (2017)	WO ₃ / água	0,0167, 0,0333 e 0,0666 %vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Maior eficiência obtida para uso do nanofluido, 71,87 %
Kasaeian <i>et al.</i>	MWCNT, nanosflica /	0,1, 0,2 e 0,3	Aplicação em coletor solar	Experimental	Aumento da eficiência de até 30,4 % em relação ao

(2017)	etilenoglicol	%vol.	de calha parabólica de absorção direta		fluido base
Kaya, Arslan, Eltugral (2018)	ZnO / água + etilenoglicol	1 %, 2 %, 3 % e 4 %vol.	Aplicação em coletor solar de tubo em U	Experimental	Aumento de 26,42 % na eficiência em relação ao fluido base
Mahbubul <i>et al.</i> (2018)	SWCNT / água	0,05 %, 0,1 % e 0,2 %vol.	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Maior eficiência obtida para uso do nanofluido de 0,2 %vol.
Sharafeldin e Gróf (2018)	CeO ₂ / água	0,015, 0,025 e 0,035 %vol.	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Diferença de temperatura, ganho de calor útil e eficiência superiores para o nanofluido em comparação a água
Farajzadeh, Movahed e Hosseini (2018)	Al ₂ O ₃ , TiO ₂ / água	0,1 % e 0,2 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Teórico e experimental	Aumento da eficiência em comparação com a água de 19 %, 21 % e 26 % para os nanofluidos com 0,1 % em peso de Al ₂ O ₃ e TiO ₂ e a sua mistura respectivamente
Verma <i>et al.</i> (2018)	MgO-MWCNT, CuO-MWCNT, MgO, CuO, MWCNT / água	0,25, 0,5, 0,75, 1,0, 1,25, 1,5 e 2,0 %vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência de 20,52 % para nanofluido híbrido MgO + MWCNTs / água
Beicker <i>et al.</i> (2018)	Au, MWCNT / água	0,0001–0,004% (Au) 0,0001–0,03% (MWCNT)	Aplicação em sistema térmico solar de absorção direta	Experimental	Identificação de concentração ótima para nanofluidos de Au (0,002 %) e MWCNT (0,001 %)
Tong <i>et al.</i> (2019)	Al ₂ O ₃ , CuO/ água	0,5, 1,0 e 1,5 %vol. (Al ₂ O ₃) 0,1, 0,3, 0,5 e 0,7 %vol. (CuO)	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência energética e exérgica com uso de nanofluido de até 21,9 % e 59,6 %, respectivamente, em comparação com a água
Eltaweel e Abdel-Rehim (2019)	MWCNT / água	0,01 %, 0,05 % e 0,1 % em peso.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência energética e exérgica em relação ao fluido base
Dehaja e Mohiabadib (2019)	MgO / água	0,014 % e 0,032 % vol.	Aplicação em coletor solar de tubo de calor	Experimental	Aumento da eficiência com aumento da vazão e fração volumétrica

evacuado					
Sarafraz e Safaei (2019)	Nanoplaqueta de grafeno / metanol	0,05 % e 0,1 % em peso	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Aumento da eficiência com aumento da vazão e fração volumétrica
Sharafeldin e Gróf (2019)	WO ₃ / água	0,014 %, 0,028 % e 0,042 % vol.	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Aumento da eficiência com aumento do fluxo mássico e fração volumétrica, atingido taxa positiva de até 19,3 %
Natividade <i>et al.</i> (2019)	Multicamadas de grafeno / água	0,00045 % e 0,00068 % vol.	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Aumentos na eficiência de até 31 % e 76 %, nas concentrações de 0,00045 % e 0,00068 % respectivamente
Rajput <i>et al.</i> (2019)	Al ₂ O ₃ / água	0,1, 0,2 e 0,3 % vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência térmica de 21,32 % ao aumentar a fração volumétrica de 0,1 % para 0,3 %.
Moravej <i>et al.</i> (2020)	TiO ₂ / água	1,3 e 5 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência de 33,54 % para o nanofluido com 5 % de concentração
Kaya, Alkasem e Arslan (2020)	Al ₂ O ₃ / água	1, 2, 3 e 4 vol%	Aplicação em coletor solar de tubo em U evacuado	Teórico	Eficiência 19,1 % maior obtido para nanopartículas em forma de tijolo em comparação com a água
Kumar <i>et al.</i> (2020)	Au / água	0,0002 % em peso	Aplicação em coletor solar de absorção direta	Experimental	Aumento de até 33 % na eficiência em comparação com o fluido base
Joseph, Sreekumar e Thomas (2020)	SiO ₂ +Ag-CuO / água	-	Aplicação em coletor solar parabólico de absorção direta	Experimental	Aumento da eficiência térmica e exergética em comparação ao fluido base
Tong <i>et al.</i> (2020)	Al ₂ O ₃ , MWCNT, CuO, Fe ₃ O ₄ / água	-	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência do coletor com uso de diferentes nanofluidos, sendo maior eficiência alcançada para o uso de MWCNT
Hussein <i>et al.</i> (2020)	CF-MWCNT+CF-GNP+h-BN / água	0,05 %, 0,08 % e 0,1 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Eficiência para o nanofluido híbrido até 20 % maior que a obtido para água.

Sundar <i>et al.</i> (2020)	Nanodiamante / água	0,2%, 0,4%, 0,6%, 0,8% e 1,0% vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência no coletor com uso de nanofluidos, possibilitando diminuição da área, materiais, custos e emissões para produção do coletor
Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2020)	MWCNT / água	0,005 %, 0,01 % e 0,05 % em peso	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado	Experimental	Maiores eficiências energética e exergética vista no nanofluido com maior concentração
Eltaweel, Abdel-Rehim e Attia (2021)	MWCNT / água	0,005 %, 0,01 % e 0,05 % em peso	Aplicação em coletor solar de tubo evacuado e em coletor solar de placa plana	Experimental	Aumento da eficiência exergética e energética no coletor com uso de nanofluidos, possibilitando diminuição dos coletores em até 29,5% e 26,7%, para coletor de tubo evacuado e placa plana respectivamente.
Akram <i>et al.</i> (2021)	GNP, SiO ₂ , ZnO / água	0,025, 0,05, 0,075 e 0,1 % em peso	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Incrementos de eficiência de até 17,45 % em relação a água
Hosseini e Dehaj (2021)	Al ₂ O ₃ , GO / água	0,2 % em peso	Aplicação em coletor solar de calha parabólico	Experimental	Aumento de 32,1 % e 63,2 % para os nanofluidos de Al ₂ O ₃ e GO respectivamente em comparação com a água
Struchalin <i>et. al</i> (2021)	MWCNT/ água-etanol	0,0015 – 0,082 % em peso	Aplicação em coletor solar tubular de absorção direta	Teórico e experimental	Aumento na eficiência do coletor solar de 5,8 - 37,9 % na concentração ótima
Dehaj <i>et al.</i> (2021)	NiFe ₂ O ₄ / água	0,01 e 0,05 % vol.	Aplicação em coletor solar de calha parabólica	Experimental	Maior eficiência verificada com uso do nanofluido e com tubo absorvedor em U
Farhana <i>et al.</i> (2021)	Al ₂ O ₃ , CNC / água + etilenoglicol	0,1 %, 0,3 % e 0,5 % vol.	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Incremento da eficiência de até 5,8% com uso do nanofluido de CNC / água-EG
Wang <i>et al.</i> (2021)	Mxene (Ti ₃ C ₂ T _x), grafeno / água	5, 10, 20, 40, 60 ppm	Aplicação em sistema térmico de absorção direta	Experimental	Maior eficiência de conversão fototérmica para o nanofluido de Ti ₃ C ₂ T _x , 63,35% a 20 ppm
Guo <i>et al.</i>	Ti ₃ C ₂ , GO, MWCNT /	0,001, 0,002, 0,005, 0,02 e	Aplicação em sistema	Experimental	Melhores eficiências obtidas para o nanofluido

(2022)	[BMIM]BF ₄	0,04 % em peso (Ti ₃ C ₂) 0,02 % em peso (GO e MWCNT)	térmico de absorção direta		de Ti ₃ C ₂ , sendo 20 % e 29 % superior aos nanofluidos de GO e MWCNT
Zidan, Maia e Safaei (2022)	Fe ₃ O ₄ , MnFe ₂ O ₄ , CuO, Fe ₂ O ₃ , Al ₂ O ₃ , MgO, SiO ₂ e TiO ₂ / terminol VP-1.	0,5, 1,0, 1,5 e 2 % vol.	Aplicação em coletor solar de calha parabólica	Teórico	Melhor desempenho verificado para o nanofluido de TiO ₂
Ham, Shin e Cho (2022)	Fe ₃ O ₄ / água	0,01, 0,05 e 0,1% em peso	Aplicação em coletor solar de absorção superficial e coletor solar de absorção volumétrica	Experimental	Melhoria de desempenho com uso de nanofluidos, tendo maiores incrementos com uso no coletor solar de absorção volumétrica
Joseph e Thomas (2022)	C-dot / água	-	Aplicação em coletor solar parabólico de absorção direta	Experimental	Incremento da eficiência de 57,62 % com uso do nanofluido
Presente trabalho	Grafeno / água	5, 10 e 20 ppm	Aplicação em coletor solar de placa plana	Experimental	Maior diferença de temperatura com uso do nanofluido, e aumento da eficiência em 6,80 % para nanofluido na concentração de 5 ppm

CAPÍTULO 3

3. MATERIAIS E MÉTODOS

Este trabalho foi desenvolvido por meio de uma pesquisa experimental conduzida na Área de Ensaio de Energias Renováveis do Laboratório de Energia, Sistema Térmicos e Nanotecnologia (LEST-Nano), no Campus Santa Mônica da Universidade Federal de Uberlândia. Este capítulo descreve os materiais e procedimentos utilizados para realização desta pesquisa, detalhando os materiais e configuração da bancada experimental, produção dos nanofluidos utilizados, condições de instalação e realização dos testes, e as equações governantes utilizadas para análise e discussão dos dados coletados.

3.1. Bancada experimental

Para a avaliação da conversão fototérmica de nanofluidos de grafeno em água foi construída uma bancada experimental considerando os fatores relacionados à exposição da mesma à radiação solar, e sua instrumentação para aquisição de dados. Os elementos de composição da bancada são descritos a seguir.

- Coletores solares

Foram construídos 3 coletores de placa plana, de duas configurações de montagem diferentes, sendo dois com tubulação vertical e placa absorvedora, visto na Fig.3.1 e um coletor apenas com a tubulação vertical, conforme Fig.3.2.

Os coletores foram construídos com base metálica de aço (240 mm x 415 mm x 20 mm), cobertura da superfície frontal com placa de acrílico (280 mm x 435 mm x 5 mm), tubulações de cobre de 3/8" e placa absorvedora de alumínio conformada sob os tubos verticais. A tubulação e placa absorvedora foram pintados com tinta preta fosca, objetivando aumento da absorção da radiação solar e minimizando a reflexão dos raios solares, e as superfícies laterais e inferior dos coletores foram isoladas com manta isolante de espuma elastomérica, visando reduzir as perdas térmicas destas superfícies.

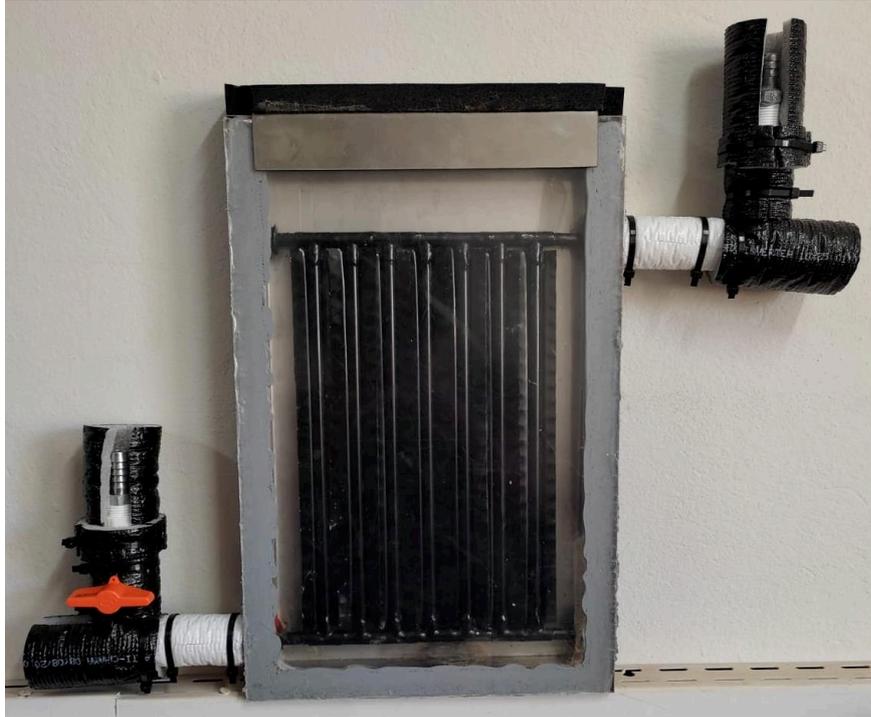


Figura 3.1. Foto do coletor solar com placa absorvedora

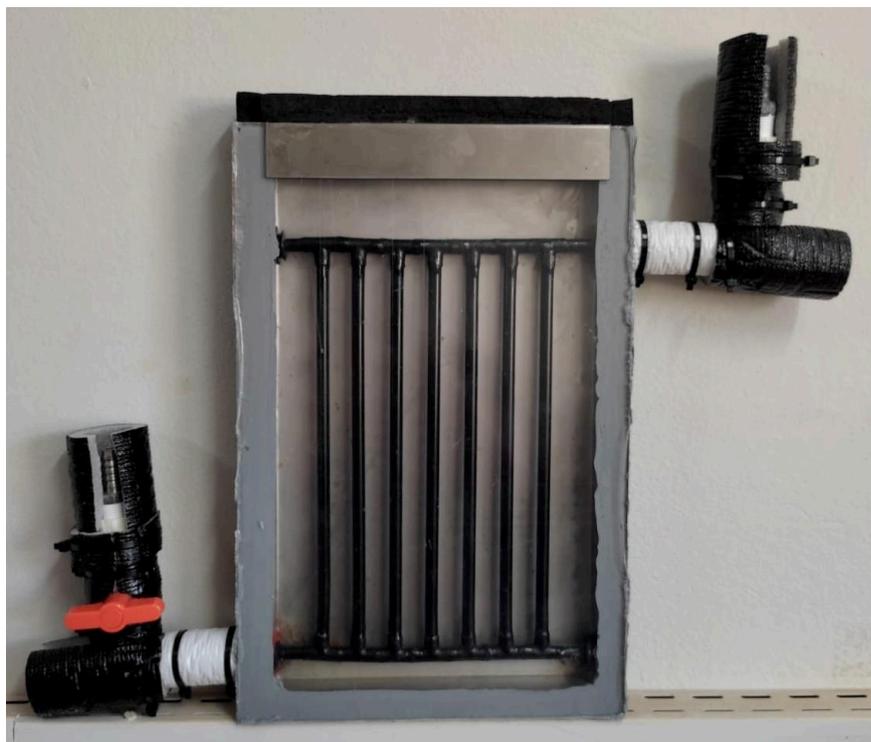


Figura 3.2. Foto do coletor solar sem placa absorvedora

- Reservatórios de água

Foram utilizados 3 reservatórios de água, conectando um reservatório a cada coletor solar. Cada reservatório possui capacidade de 22,5 L e foram construídos utilizando galões plásticos isolados externamente por manta isolante de espuma elastomérica. Foram inseridas conexões nas laterais próximas ao fundo e topo do recipiente, em faces opostas, para ligações de entrada e saída de água. Uma imagem do reservatório é vista na Fig.3.3.



Figura 3.3. Foto do reservatório de água

- Mangueiras e conexões hidráulicas

Nas entradas e saídas de cada coletor foram instaladas conexões hidráulicas para ligação entre coletor e reservatório e inserção dos sensores de temperatura, destaca-se que em seguida as conexões foram isoladas por tubos isolantes de polietileno. A ligação entre coletor e reservatório foi feita por uma mangueira de 1/2" isolada por tubo isolante de espuma elastomérica.

- Sensores de temperatura

Foram utilizados termopares do tipo T, devidamente calibrados, nas entradas e saídas dos coletores, e para medição da temperatura ambiente. Os termopares conectados aos coletores, conforme visto na Fig.3.4, foram confeccionados com uma base roscável e uma haste de 10 cm para possibilitar o seu acoplamento.



Figura 3.4. Foto do termopar tipo T utilizado nas entradas e saídas dos coletores solares

- Chassi e módulo de aquisição

Para aquisição dos dados de temperatura foram utilizados chassi NI cDAQ-9178 e módulo de aquisição NI 9213 da National Instruments, apresentados na Fig.3.5.a e Fig.3.5.b.



Figura 3.5. Sistema de aquisição de temperatura: a) Chassi NI cDAQ-9178, b) Módulo de aquisição NI 9213

- Medidor de radiação solar

Para coleta dos dados de radiação foi utilizado o Medidor de Energia Solar – MES 200 da Instrutherm, visto na Fig.3.6.



Figura 3.6. Foto do Medidor de Energia Solar – MES 200 / Instrutherm

- Computador

O equipamento foi utilizado para monitoramento e aquisição de dados, sendo conectado ao módulo de aquisição da temperatura e ao medidor de radiação solar. A aquisição dos dados de temperaturas foi realizada em um programa desenvolvido no LabView®, conforme visto na Fig.3.7, onde os dados de temperaturas de entrada e saída de cada coletor, bem como a do ambiente, foram armazenadas a cada segundo do teste. Os dados de radiação solar foram armazenados pelo programa Run Solar Meter, sendo medido também a cada segundo, a interface do programa é apresentada na Fig.3.8.

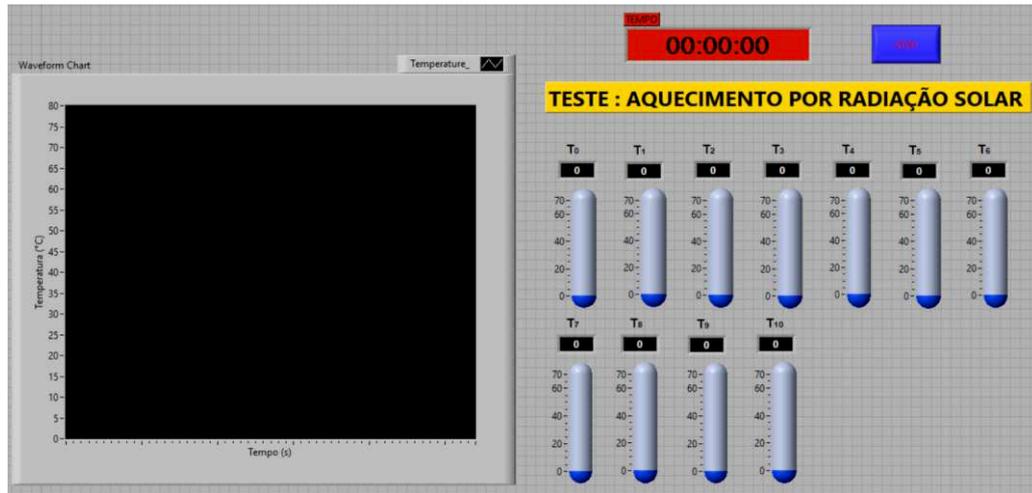


Figura 3.7. Interface do programa no LabView para aquisição de temperatura



Figura 3.8. Interface do programa Run Solar Meter para aquisição de radiação solar

- Estruturas metálicas para suporte dos coletores e reservatórios

A montagem do aparato experimental foi realizada sobre duas estruturas metálicas, uma para acomodação dos coletores, ajustada com a inclinação necessária para instalação dos equipamentos, e outra estrutura para o sistema de aquisição de dados e os reservatórios, realizando sua elevação em relação aos coletores, viabilizando assim o efeito termossifão.

A Fig.3.9 apresenta uma imagem da bancada experimental montada em sua configuração para os dias de teste.



Figura 3.9.Foto da bancada experimental montada nos dias de teste

3.2.Calibração e análise de incertezas

3.2.1. Termopares

Foram calibrados 11 termopares do tipo T na faixa de 18 a 68°C em intervalos de 10°C. A calibração foi realizada com uso do banho térmico e com termômetros padrão de bulbo de mercúrio. Para cada ponto de temperatura avaliado foram utilizadas seis medições para determinação da curva de calibração de cada sensor. Posteriormente, foi calculada a incerteza de medição associada a cada termopar. As curvas de calibração e procedimentos da análise de incertezas são apresentadas nos Apêndices A e B deste trabalho. Na Tabela 3.1 a seguir são apresentados os valores de incerteza de medição para cada termopar.

Tabela 3.1. Valores das incertezas de medição associadas aos termopares

Termopar	Incerteza de medição (°C)
0	0,16
1	0,17
2	0,20
3	0,19
4	0,20
5	0,20
6	0,20
7	0,20
8	0,19
9	0,18
10	0,17

3.2.2. Medidor de radiação solar

Utilizando o processo de análise de incertezas descrito no Apêndice B foi determinada a incerteza associada as medições do medidor de radiação solar utilizado, obtendo para este uma incerteza de 11 W/m².

3.3. Nanofluido

Foram produzidos nanofluidos de grafeno e água destilada em três concentrações, 0,0005 %, 0,0010 % e 0,0020 % em volume, ou seja, 5 ppm, 10 ppm e 20 ppm respectivamente. Para produção dos nanofluidos foi utilizada uma amostra mais concentrada de grafeno/água destilada cedida pela Universidade Federal do Triângulo Mineiro, as características dessa amostra são detalhadas na Tabela 3.2.

Foi realizada a diluição da amostra inicial em água destilada, seguida pelo processo de sonicação por sonda, realizada no sonicador Q500 da Qsonica, ilustrado na Fig.3.10. O equipamento possui frequência de 20 kHz, e potência ajustável até 500 W, a dispersão foi realizada com a potência de 250 W por 20 min.

Tabela 3.2. Características da amostra inicial mais concentrada de nanofluido

Tipo de nanopartícula	ρ_{np} (g/cm ³)	Fluido base	$\rho_{\text{água}}$ (g/cm ³)	ϕ_m (%)	ϕ_v (%)
Grafeno	2,200	Água destilada	0,997	0,01	0,0045



Figura 3.10. Foto do Sonicador Q500 / Qsonica

Foram preparados 5 L de cada concentração a ser analisada, as proporções da amostra concentrada e de água destilada adicionada para preparação dos nanofluidos nas concentrações desejadas são detalhadas na Tabela 3.3.

Tabela 3.3. Dados para produção das amostras de nanofluido

ϕ_v (%) Amostra inicial	ϕ_v (%) Amostra final	Volume da amostra inicial utilizado (ml)	Volume de água adicionado (ml)
0,0045	0,0005	550	4450
	0,0010	1100	3900
	0,0020	2200	2800

A Fig.3.11 apresenta os nanofluidos das três concentrações ao final da produção.

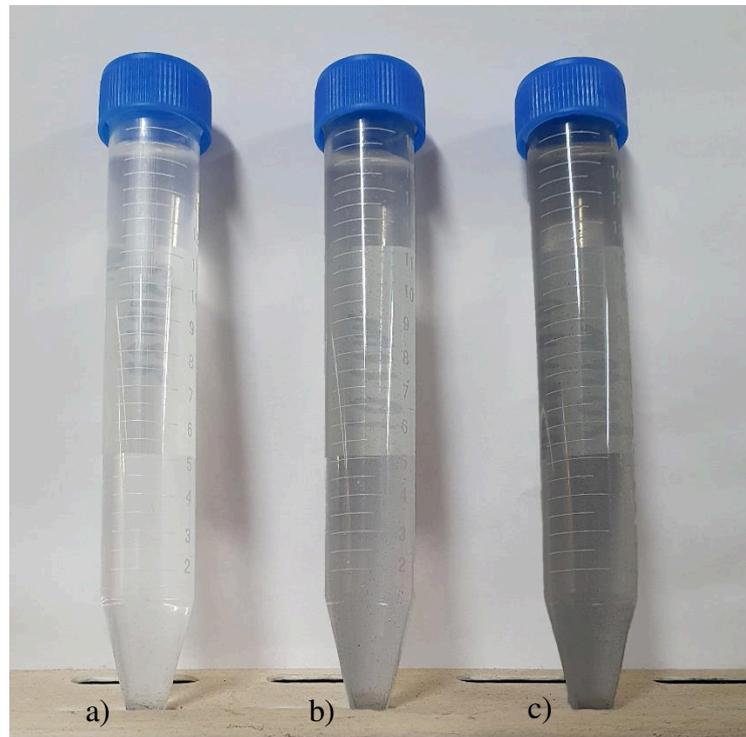


Figura 3.11. Foto dos nanofluidos produzidos: a) 0,0005 %; b) 0,0010 % e c) 0,0020 %

3.4. Procedimentos experimentais

3.4.1. Instalação da bancada experimental

A bancada foi instalada na cidade de Uberlândia, Minas Gerais – Brasil, tendo desta forma as coordenadas de localização com latitude $18^{\circ} 55' 07''$ Sul e longitude de $48^{\circ} 16' 38''$ Oeste. Para o local de instalação da bancada experimental foi verificada a não ocorrência de sombras oriundas de vegetação, estruturas ou edificações sobre a bancada no período determinado para os testes.

O posicionamento da bancada foi realizado com a superfície frontal para o Norte, e com inclinação de 28° em relação ao solo, destaca-se que essa inclinação é decorrente de recomendações técnicas de instalações de coletores solares de acordo com ABNT – NBR 15569 Sistema de aquecimento solar de água em circuito direto – Requisitos de projeto e instalação (ABNT, 2020), onde deve-se considerar a latitude local mais 10° adicionais para compensação do inverno.

Os coletores foram dispostos na estrutura metálica com a inclinação determinada e os reservatórios instalados no suporte posterior a estrutura. A forma adotada para circulação da água entre o reservatório e coletor foi o sistema por efeito termossifão, promovendo desta forma uma circulação natural.

Os testes foram realizados nos meses de Julho, Agosto e Setembro de 2022, aproximadamente nos horários de início e finalização de 08:00 h e 17:00h respectivamente.

3.4.2. Validação da bancada experimental

A validação da bancada experimental foi realizada em duas etapas, considerando 3 dias de teste para cada condição avaliada, de tal forma que:

- 1ª condição: 22/07/22, 25/07/22 e 26/07/22
- 2ª condição: 27/07/22, 29/07/22 e 30/07/22

A primeira condição consistiu na exposição da bancada a radiação solar com os coletores operando com circulação de água na tubulação, e tendo apenas ar preenchendo o interior dos três coletores. Essa condição objetivou avaliar o funcionamento do efeito termossifão, além de estabelecer o comparativo entre os dois coletores iguais, para comprovação de resultados semelhantes entre eles.

Na segunda condição o coletor sem placa absorvedora, e um dos coletores com placa absorvedora foram preenchidos com água em seu interior. Nesse caso é possível a comparação de um coletor de uso tradicional (apenas com ar) e um coletor com preenchimento de fluido no interior, em duas condições, sem placa absorvedora e com placa absorvedora, além disso o teste possibilita avaliação da estanqueidade do sistema, quando exposto a radiação solar.

3.4.3. Condições de realização dos testes experimentais

Os testes foram conduzidos avaliando três condições experimentais dos coletores, sendo mantidas essas condições para cada concentração avaliada, como descrito na Tabela 3.4:

Tabela 3.4. Condições de avaliação dos coletores nos testes experimentais

Coletor solar	Condição avaliada
Coletor 1	Coletor possui placa absorvedora, circulação de água na tubulação e preenchimento por ar no interior do coletor.
Coletor 2	Coletor sem uso da placa absorvedora, com circulação de água na tubulação e preenchimento do interior do coletor por nanofluido.
Coletor 3	Coletor possui placa absorvedora e circulação de água na tubulação, no entanto o interior do coletor é preenchido por nanofluido.

O coletor 1 representa a condição de coletor de placa plana tradicional, a condição do coletor 2 avalia a capacidade do nanofluido como substituição da placa absorvedora na configuração original, e o coletor 3, com condição construtiva igual ao coletor 1, avalia a contribuição do uso de nanofluido em conjunto com a placa absorvedora.

A Fig.3.12 traz o posicionamento destes na bancada experimental, nas condições de realização dos testes.

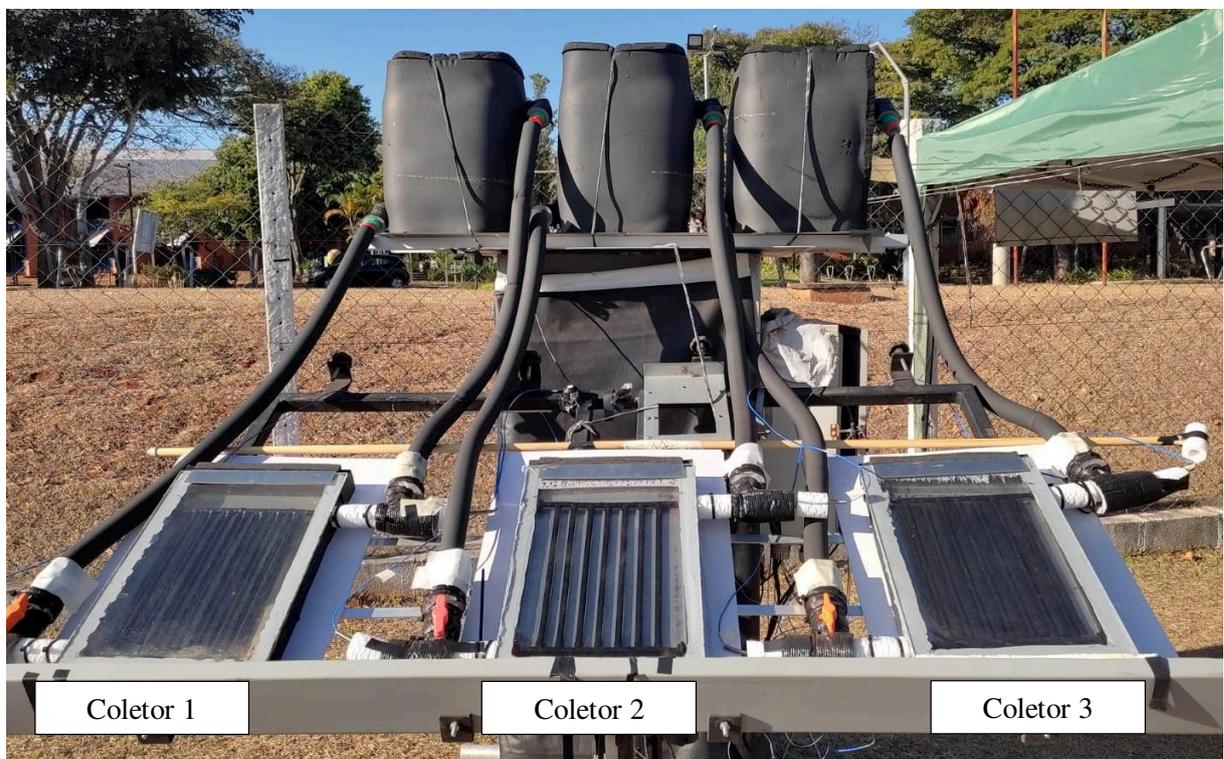


Figura 3.12. Posicionamento dos coletores na banca experimental

Para cada concentração avaliada foram realizados cinco dias consecutivos de testes, os nanofluidos dos coletores 2 e 3 foram colocados no primeiro dia de teste e mantidos no coletor até o último dia. Os testes foram realizados conforme o seguinte cronograma:

- 5 ppm: 24/08/22 à 28/08/22
- 10 ppm: 29/08/22 à 02/09/22
- 20 ppm: 03/09/22 à 07/09/22

Foram coletadas amostras do nanofluido imediatamente após a produção e ao final do período de 5 dias para cada concentração, destaca-se que as amostras de fim de teste foram retiradas diretamente do interior dos coletores, utilizando uma pipeta para não promover agitação do nanofluido. Estas amostras foram utilizadas para determinação da absorbância inicial e final do nanofluido aplicado nos coletores, para esta avaliação foi utilizado o espectrofotômetro modelo UV – 1900 da Shimadzu, apresentado da Fig.3.13.



Figura 3.13. Espectrofotômetro UV – 1900 / Shimadzu

Deve-se ainda pontuar o monitoramento dos teste pela inspeção visual realizada para acompanhando das deposições aparentes do nanofluido nos coletores 2 e 3, com realização de registros fotográficos diários.

3.5. Equações governantes

Foram coletados diariamente mediante os sistemas de aquisição de dados valores correspondentes para radiação, temperatura de entrada e temperatura de saída dos coletores para cada segundo de teste. Inicialmente foram construídos gráficos desses valores avaliando: o perfil de temperatura de entrada e saída dos coletores, perfil de radiação dos coletores e comparativos dos perfis de temperatura e radiação.

Destacando-se aqui a observação do comportamento da temperatura de saída, visto que o aumento desta é de fato o principal objetivo do uso de coletores solares.

A taxa de calor útil (Q_u), Eq. (3.1), do coletor solar é baseado na vazão mássica (\dot{m}), calor específico (c_p) e diferença entre a temperatura de entrada e a temperatura de saída do fluido.

$$Q_u = \dot{m} c_p (T_{saí} - T_{ent}) \quad (3.1)$$

Verifica-se então que a taxa de calor é proporcional a variação de temperatura (ΔT) no coletor:

$$\Delta T = T_{saí} - T_{ent} \quad (3.2)$$

Desta forma a diferença de temperatura do fluido é um parâmetro importante para avaliação do desempenho do coletor, sendo então utilizada na discussão de resultados deste trabalho.

A vazão mássica foi calculada de acordo com o método descrito por Siqueira (2003), como uma estimativa teórica com base na equivalência da perda de carga ao longo do circuito operando em regime de termossifão e à diferença de pressão, a qual é função da massa específica da água na entrada e saída dos coletores. Com o seguinte equacionamento para vazão mássica:

$$\dot{m} = \frac{(\rho_{ent} - \rho_{sai})gH\pi D^4 \rho}{128 L\mu} \quad (3.3)$$

Onde:

D: diâmetro da tubulação do coletor [m]

g : gravidade [m/s^2]

H: altura representativa [m]

L: comprimento da tubulação do coletor [m]

μ : viscosidade [Ns/m^2]

ρ_{ent} , ρ_{sai} e ρ : massa específica de entrada, saída e média [kg/m^3]

A altura representativa H obtida pela Eq.(3.4), foi aplicada de acordo com os parâmetros de distâncias no circuito de aquecimento ilustrados na Fig.3.14.

$$H = \frac{H_c}{2} + \Delta H + \frac{H_r}{2} \quad (3.4)$$

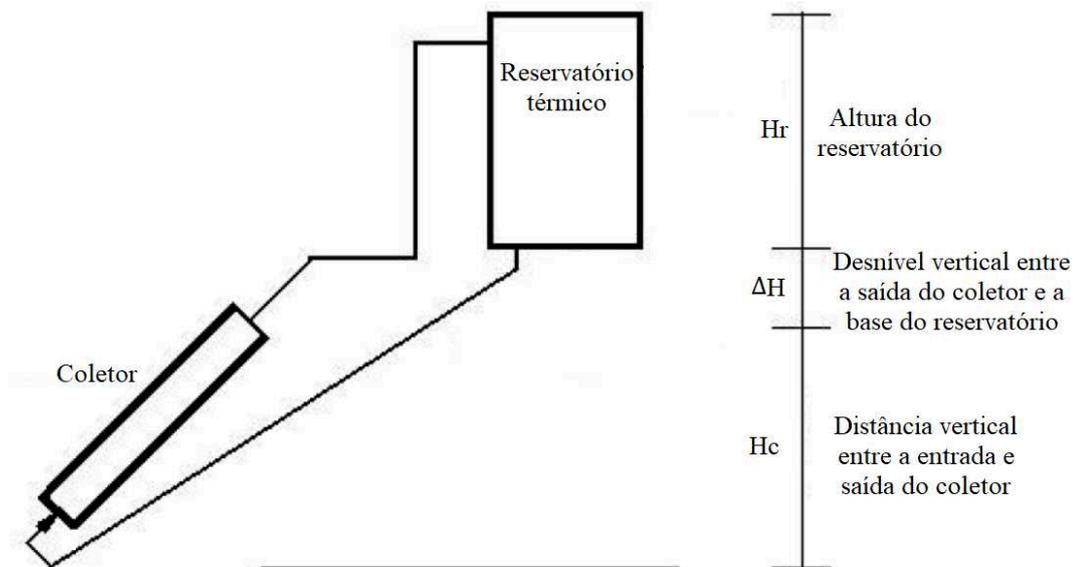


Figura 3.14. Desenho esquemático do sistema de aquecimento. Fonte: Adaptado de Siqueira (2003).

Considerando o coeficiente de expansão térmica (β), o qual mensura a extensão da variação da densidade com a variação da temperatura a uma pressão constante, tem-se:

$$\beta = -\frac{1}{\rho} \left(\frac{\partial \rho}{\partial T} \right) \quad (3.5)$$

Ou aproximadamente:

$$\beta \cong -\frac{1}{\rho} \frac{(\rho_{sai} - \rho_{ent})}{(T_{sai} - T_{ent})} \quad (3.6)$$

Sendo a massa específica média dada por:

$$\rho = \frac{\rho_{ent} + \rho_{sai}}{2} \quad (3.7)$$

Logo, pode-se obter a vazão mássica expressa como:

$$\dot{m} = \frac{\pi D^4 g H \beta \rho_{ent}^2 \Delta T (2 - \beta \Delta T)}{256 L \mu} \quad (3.8)$$

Assim, conforme descrito por Siqueira (2003), nesta condição a vazão mássica é dada em função da diferença de temperatura ao longo dos coletores e dos parâmetros geométricos, diâmetro, comprimento e altura representativa, os quais podem ser facilmente medidos.

O desempenho dos coletores também foi mensurado com base na eficiência térmica. A eficiência térmica instantânea, (η_i), do coletor é calculada pela razão entre a taxa de calor útil e a taxa de energia solar fornecida ao coletor, sendo expressa pela relação:

$$\eta_i = \frac{\dot{m} \text{ cp } (T_{sai} - T_{ent})}{A_c G} \quad (3.9)$$

Onde

A_c : área absorvedora do coletor [m^2]

G : radiação solar sobre o coletor [W/m^2]

Conforme descrito na ABNT/ NBR17003 (2021), Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Requisitos e métodos de ensaio, os ensaios para avaliação de desempenho térmico devem ser realizados com níveis de radiação superiores a 700 W/m^2 , com duração mínima de 3 h, não necessariamente consecutivas, podendo ser constituídas de partes com mínimo de 30 min de duração, desconsiderando trechos com variações acima de 50 W/m^2 . Assim, considerando esses requisitos foram selecionados intervalos representativos dentro dos dias de teste para avaliação da eficiência dos coletores.

CAPÍTULO 4

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. Validação

Os resultados para os testes de validação na 1ª condição (com ar em todos coletores), como verificado na Fig. 4.1, indicaram proximidade entre os resultados de temperatura de entrada e saída dos coletores 1 e 3 dentro da faixa de 4%, permitindo a confirmação da semelhança construtivas dos coletores 1 e 3. O coletor 2 mostrou os menores resultados para as temperaturas em comparação aos outros coletores. Nos gráficos de perfis de temperatura tem-se os valores superiores correspondendo a saída dos coletores e os valores inferiores correspondentes as entradas nos coletores.

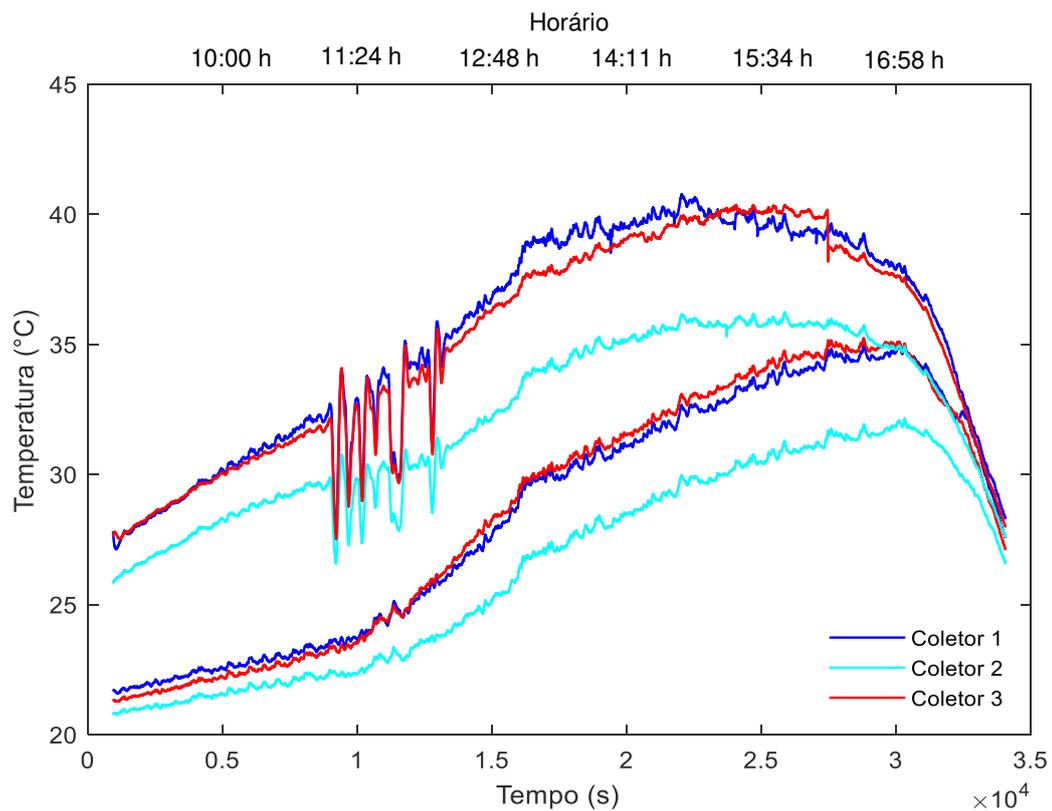


Figura 4.1. Perfis de temperatura dos testes 1ª condição de validação dia 22/07/22

A comparação dos perfis de temperatura dos coletores com o perfil de radiação, Fig. 4.2, indica por meio dos picos de variação a sensibilidade das temperaturas de saída dos coletores com a variação da radiação, sendo bastante evidente nos momentos nublados, essa característica foi vista nos três coletores.

Para um dia ensolarado e sem nuvens, como visto no 2º dia de teste de validação os perfis mantêm-se estáveis, não sendo detectados picos. A Fig.4.3 apresenta os perfis de temperatura e radiação para o 2º dia de testes de validação.

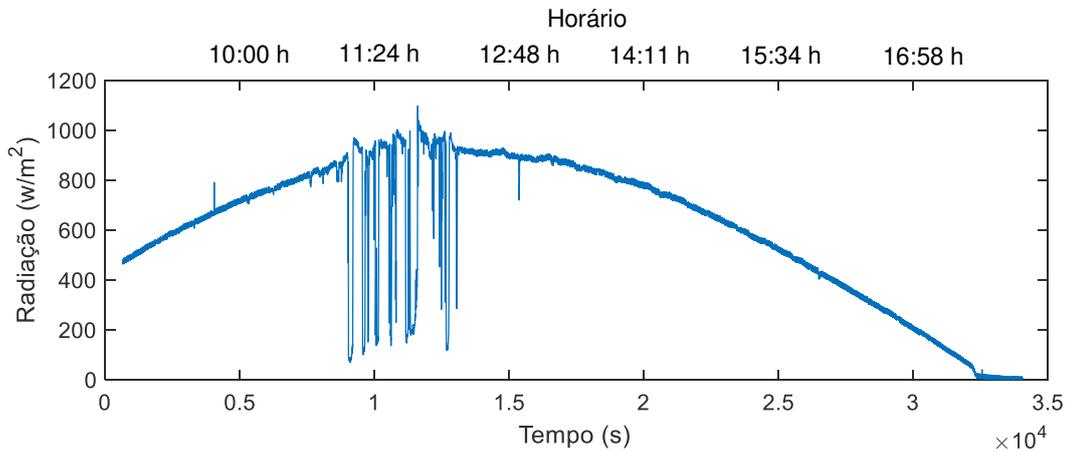


Figura 4.2. Perfil de radiação do dia 22/07/22

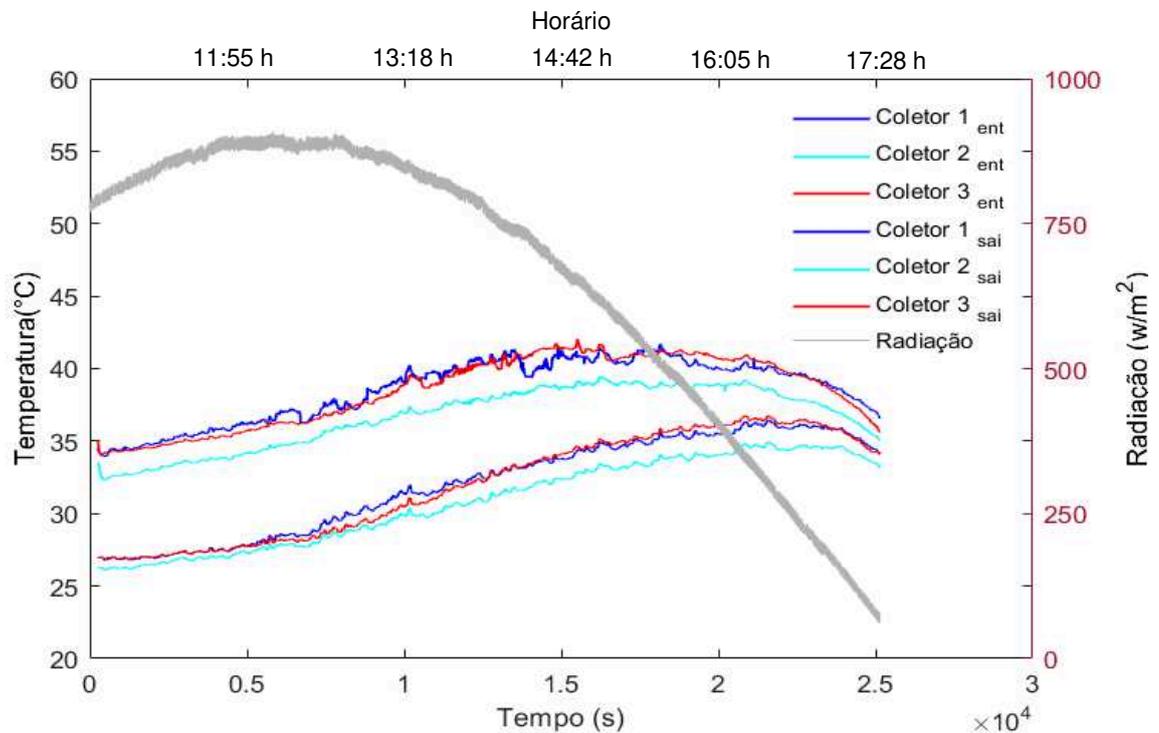


Figura 4.3. Perfis de temperatura e radiação dos testes na 1ª condição de validação dia 25/07/22

A validação na 2ª condição, mantém o indicativo de temperaturas inferiores para o coletor 2. Esta condição de validação mostra que para o coletor sem preenchimento do seu interior com água, é verificado um grande pico na temperatura de saída no início do teste, sendo

posteriormente reestabelecida a semelhança com o perfil dos resultados do coletor de mesma característica construtiva.

Os coletores 1 e 3 foram alternados durante os dias de teste quanto ao preenchimento com água, sendo verificado comportamento semelhante quanto a ocorrência deste pico inicial nos dois coletores, conforme visto nas Fig.4.4 e 4.5. Entende-se que ao iniciar a exposição da bancada à radiação, a energia absorvida pelo coletor é utilizada para o aquecimento do fluido até uma temperatura em que seja estabelecido o efeito termossifão, desta forma o pico torna-se mais evidente diante da menor inércia térmica do coletor sem líquido em sua cavidade, o qual reage de forma rápida a exposição solar, normalizando a troca logo em seguida. Os coletores com água possuem uma resposta mais lenta à exposição solar, diante da necessidade de aquecimento de todo o fluido externo a tubulação, para em seguida trazer efeito sobre a seção de troca do coletor (tubulação no coletor 2 e tubulação + placa absorvedora no coletor 1 ou 3).

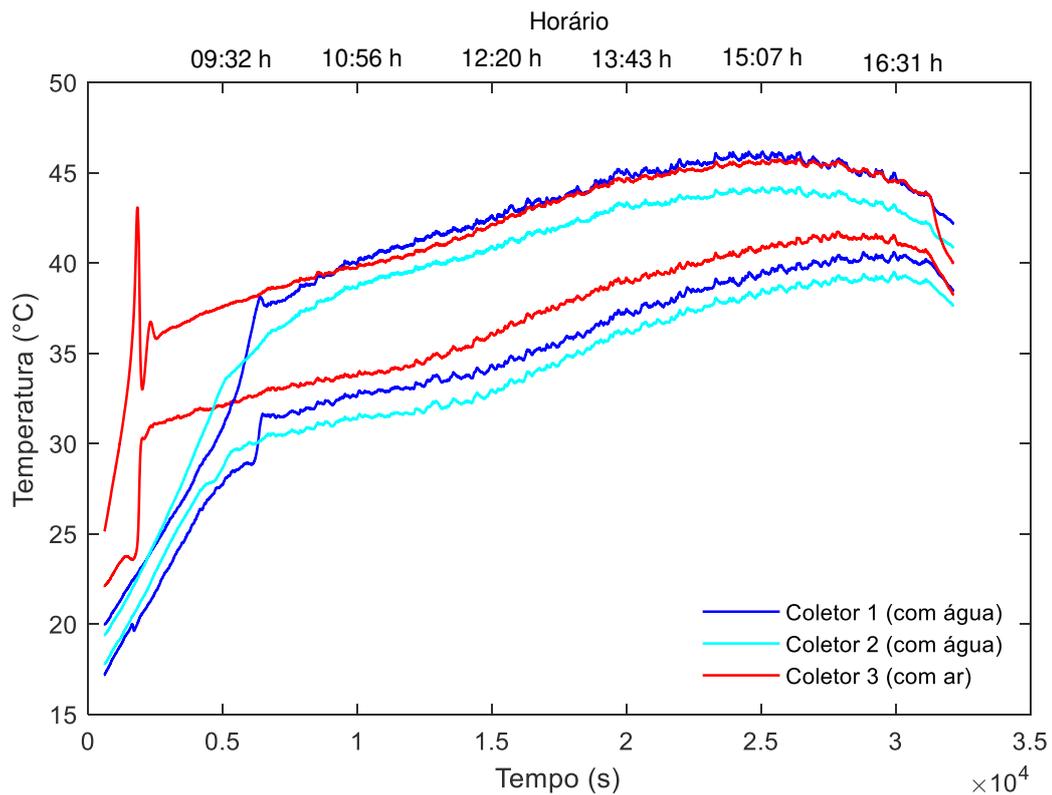


Figura 4.4. Perfis de temperatura dos testes 2ª condição de validação dia 27/07/22

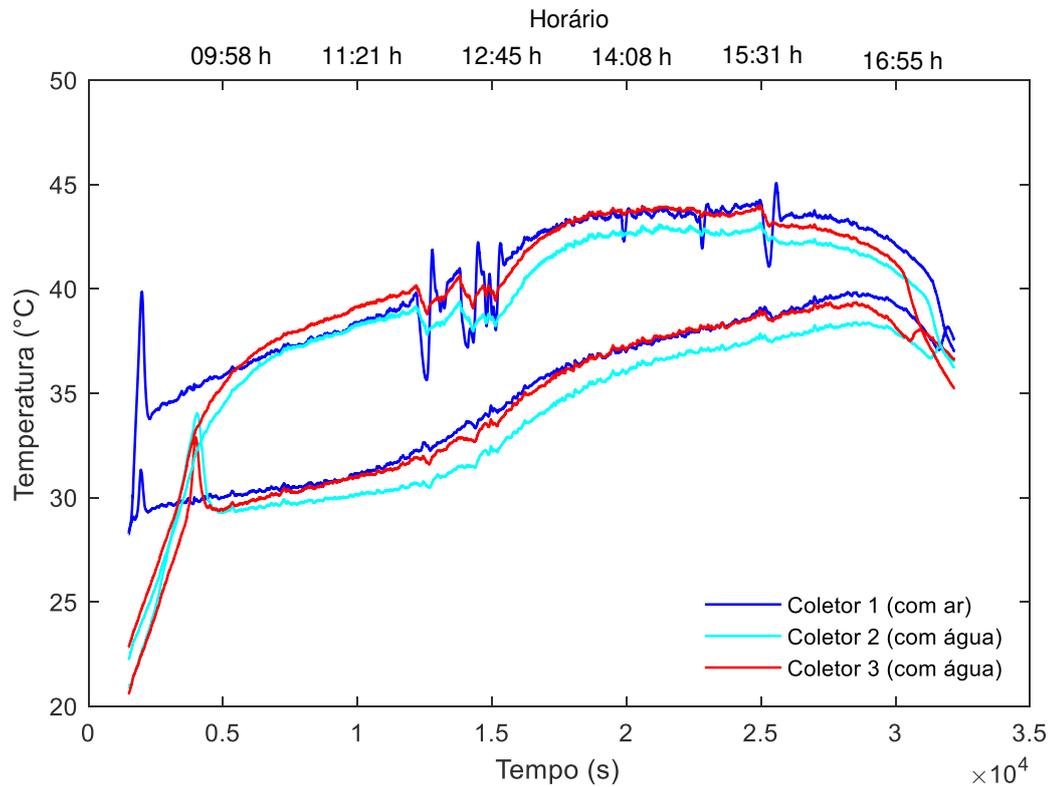


Figura 4.5. Perfis de temperatura dos testes 2ª condição de validação dia 29/07/22

Outro aspecto a ser destacado durante o período de teste é o comparativo da sensibilidade dos coletores as variações de radiação ao longo do teste. Como comentado anteriormente, no coletor apenas com ar, a temperatura de saída é influenciada rapidamente por variações de radiação, reproduzindo de forma semelhante em seu perfil de temperatura de saída os aumentos e quedas vistos no perfil da radiação. Para os coletores em que há o preenchimento com água, essa resposta é mais lenta, tendo aumentos e quedas de maneira mais gradual, mesmo para bruscas mudanças na radiação, como os trechos de períodos nublados vistos na Fig. 4.6.

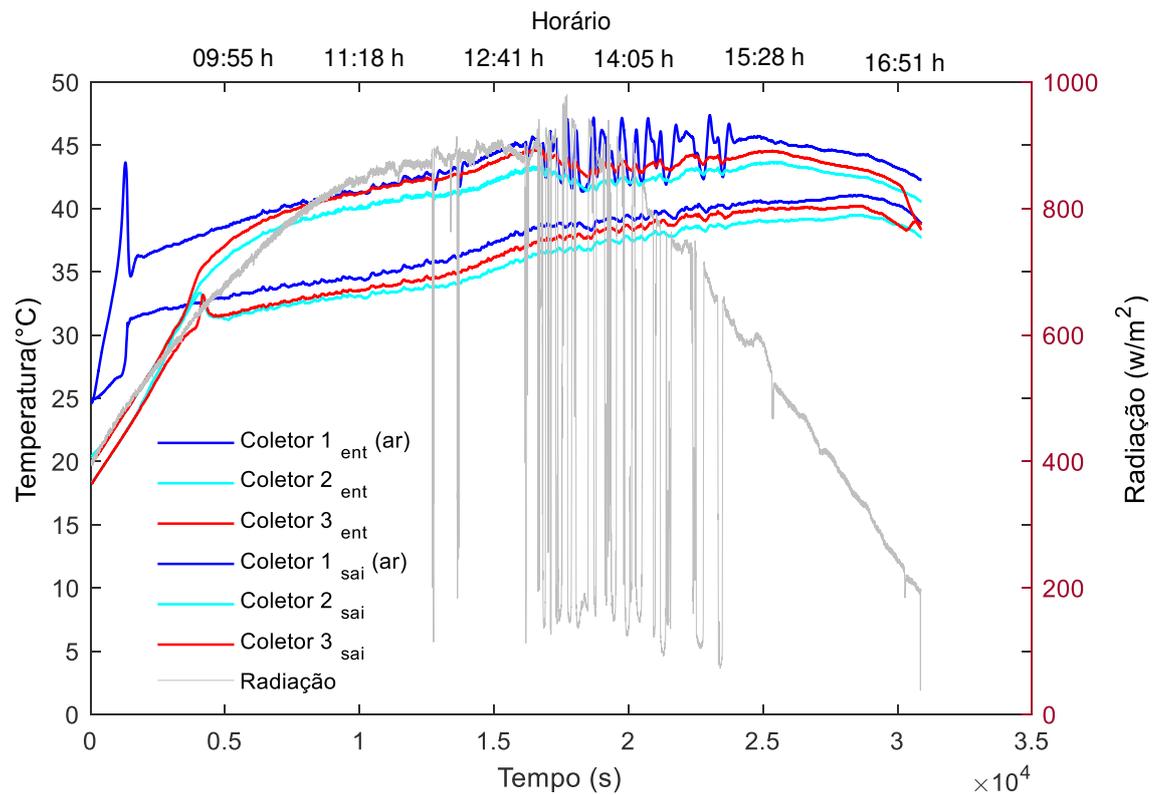


Figura 4.6. Perfis de temperatura e radiação dos testes 2ª condição de validação dia 30/07/22

4.2. Testes experimentais

4.2.1. Concentração de 5 ppm

A realização dos testes experimentais foi iniciada com a concentração de 5 ppm. A Fig.4.7 traz o perfil de temperatura para entradas e saídas dos coletores no 1º dia de teste dessa concentração.

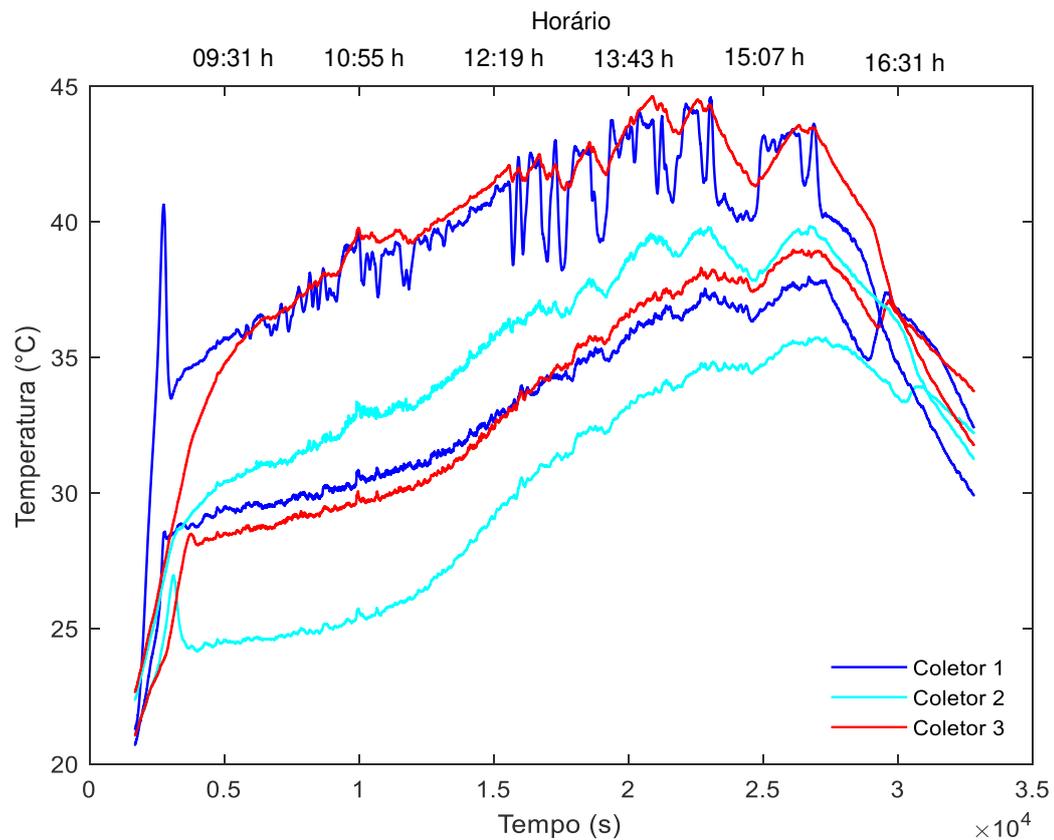


Figura 4.7. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 1: 24/08/22

O primeiro dia de teste para essa concentração, apesar dos altos picos de radiação em alguns momentos, chegando a atingir 1173 W/m^2 , foi um dia com muitas nuvens, trazendo muitas variações da radiação ao longo do dia, como apresentado na Fig.4.8.

Dessa forma, o perfil de temperatura, assim como ocorreu nos testes de validação, indicam uma resposta mais rápida às variações de radiação para o coletor 1, sem líquido em sua cavidade. O coletor 2 apresenta as menores temperaturas de entrada e saída, atingindo um máximo valor para saída de $39,84^\circ\text{C}$. Quanto ao coletor 3, é visto que ele inicia os testes com temperaturas de entrada e saída inferiores ao coletor 1, porém para a temperatura de saída é observada uma aproximação dos valores do coletor 1 a partir das 09:30 h, superando em seguida o coletor 1, em alguns trechos. A maior temperatura de saída deste dia foi atingida no coletor 3, sendo de $44,64^\circ\text{C}$, um valor bem próximo foi atingido no coletor 1 de $44,60^\circ\text{C}$. Quanto a temperatura de entrada, o coletor 3 supera o coletor 1 a partir das 12:55 h.

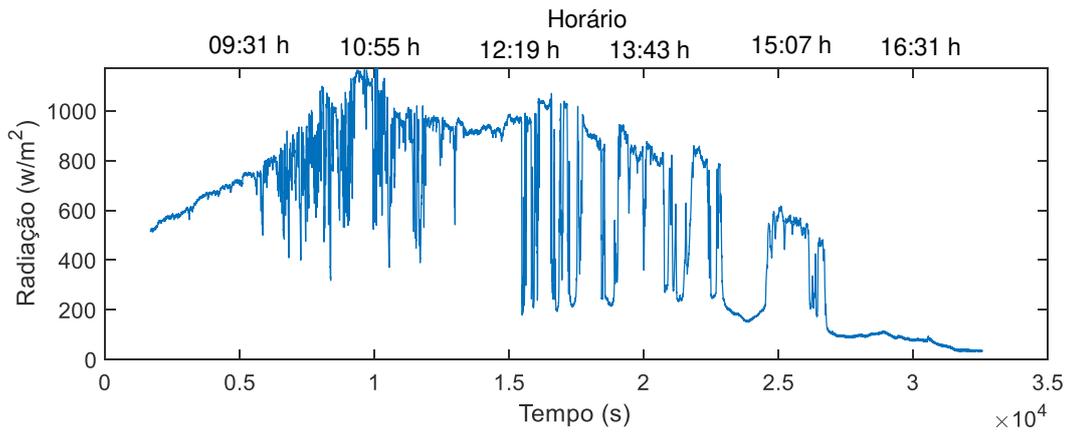


Figura 4.8. Perfil de radiação do dia 24/08/22

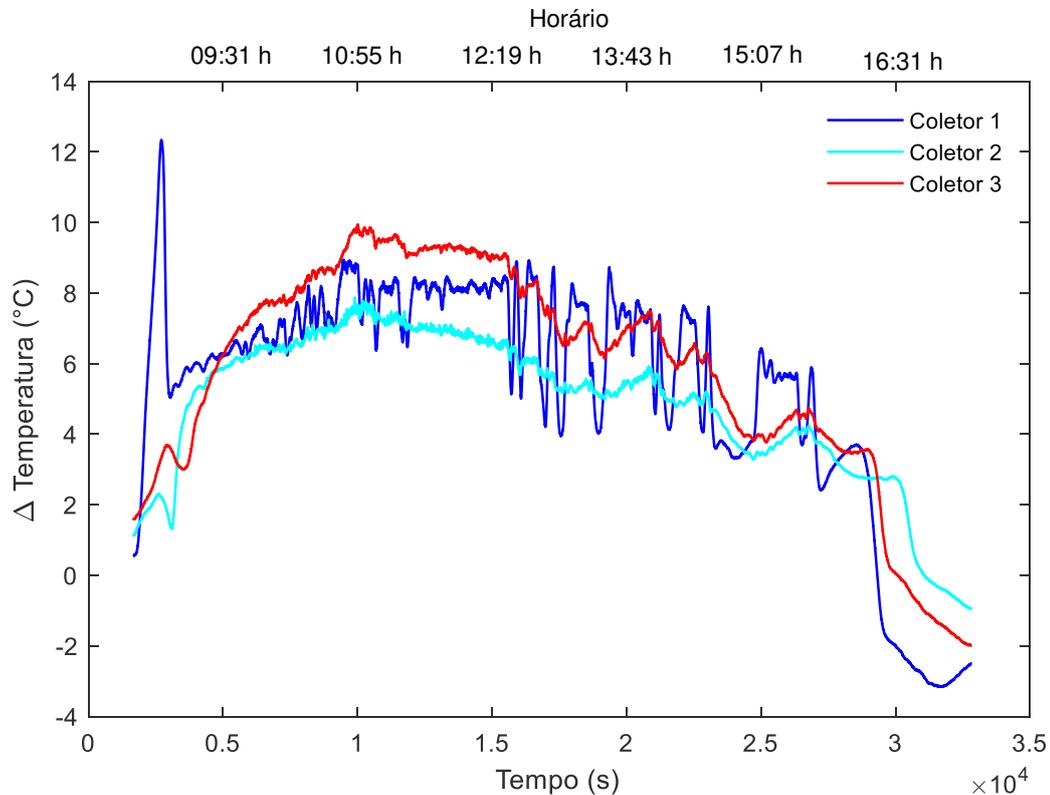


Figura 4.9. Diferença de temperatura dos coletores do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 1: 24/08/22

Observando quanto as diferenças de temperatura de entrada e saída dos coletores (ΔT), visto na Fig.4.9, retirando o pico inicial do coletor 1, é visto que o maior valor ocorre para o coletor 3, de 9,95 °C, no entanto apesar da ocorrência dos maiores valores neste coletor, é percebido que ele supera o coletor 1 no período de 09:30 h à 12:35 h, o que corresponde ao período próximo do meio-dia solar, após esse período, o coletor 1 volta a apresentar valores superiores para ΔT , visto que apesar de atingir maiores temperaturas de saída no coletor 3, sua

entrada está muito mais aquecida, dessa forma o ganho de temperatura passa a ser mais significativo no coletor 1, que tem nesse momento menores temperaturas de entrada.

Apresenta-se agora o comportamento das temperaturas para um dia ensolarado, Fig. 4.10, ocorrido em 28/08/22, conforme evidenciado na Fig.4.11.

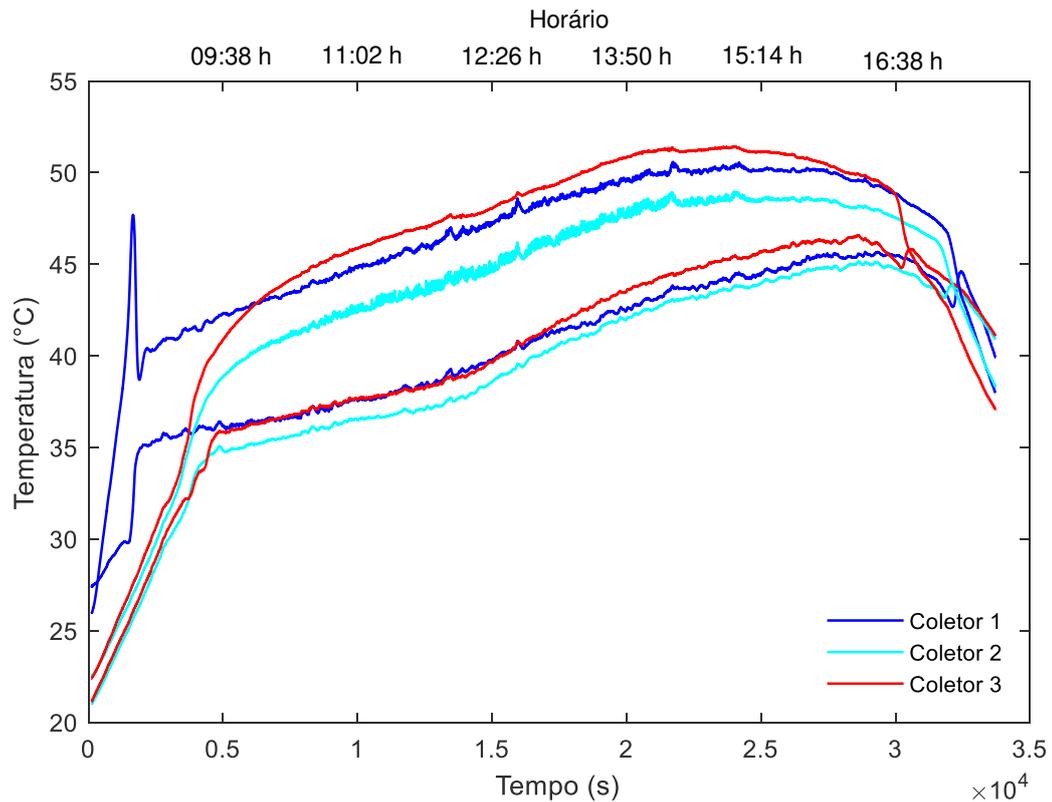


Figura 4.10. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 5: 28/08/22

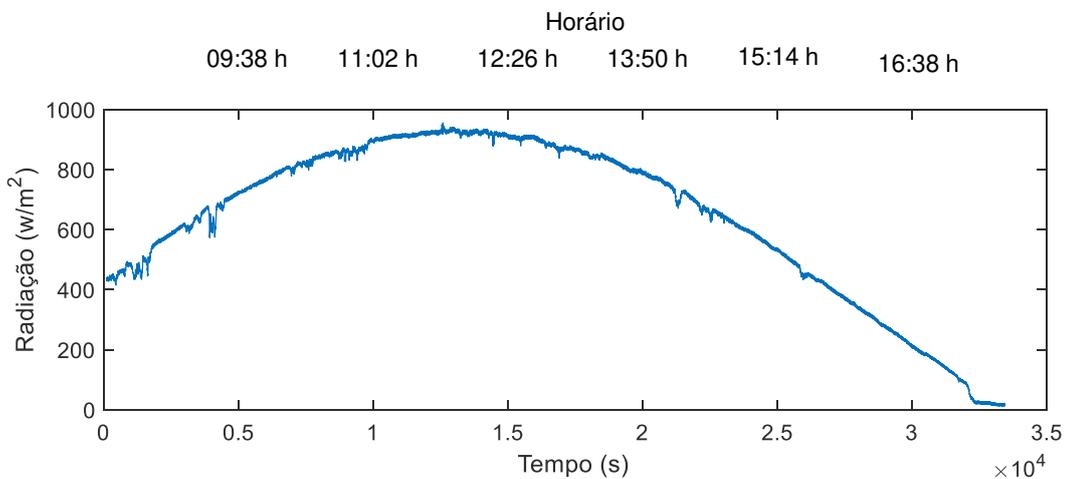


Figura 4.11. Perfil de radiação do dia 28/08/22

Os resultados evidenciam que as maiores temperaturas de saída ocorrem no coletor 3, sendo atingido nesse dia a temperatura máxima de 51,44 °C, e novamente trazem para este coletor o comportamento de temperaturas de saída superando o coletor 1 a partir das 10:00 h, mantendo-se assim até as 16:40h, quando as quedas de radiação são mais expressivas ao final do dia, de forma que o coletor 1 segue com seu aproveitamento de radiação solar por um período um pouco mais longo, trazendo o ponto de igualdade entre entrada e saída posteriormente aos coletores 2 e 3. Deve-se pontuar também o aumento da temperatura de entrada do coletor 3 após às 12:40 h, superando o coletor 1, com o qual mantinha temperaturas próximas até então.

Tendo assim os resultados para ΔT conforme apresentados na Fig.4.12, o maior valor é atingido para o coletor 3, sendo de 8,92°C. Porém verifica-se que os valores de ΔT do coletor 3, superam o coletor 1 no período de 10:00 h às 14:20 h. O coletor 1 atingiu ΔT máximo de 7,81 °C, e o coletor 2 de 7,08 °C.

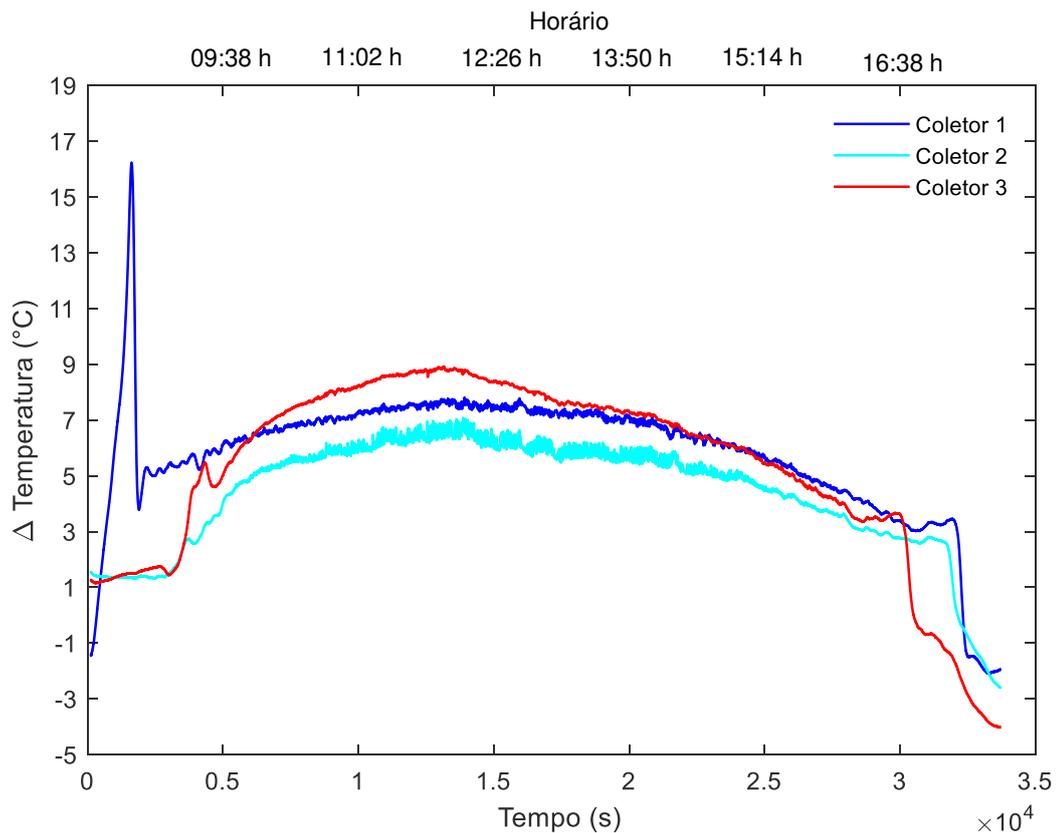


Figura 4.12. Diferença de temperatura dos coletores com nanofluido de 5 ppm – dia 5: 28/07/22

4.2.2. Concentração de 10 ppm

Prosseguindo para os testes com a concentração de 10 ppm, os resultados do 1º dia de teste para os perfis de temperatura e de ΔT são apresentados nas Fig.4.13 e 4.14 a seguir.

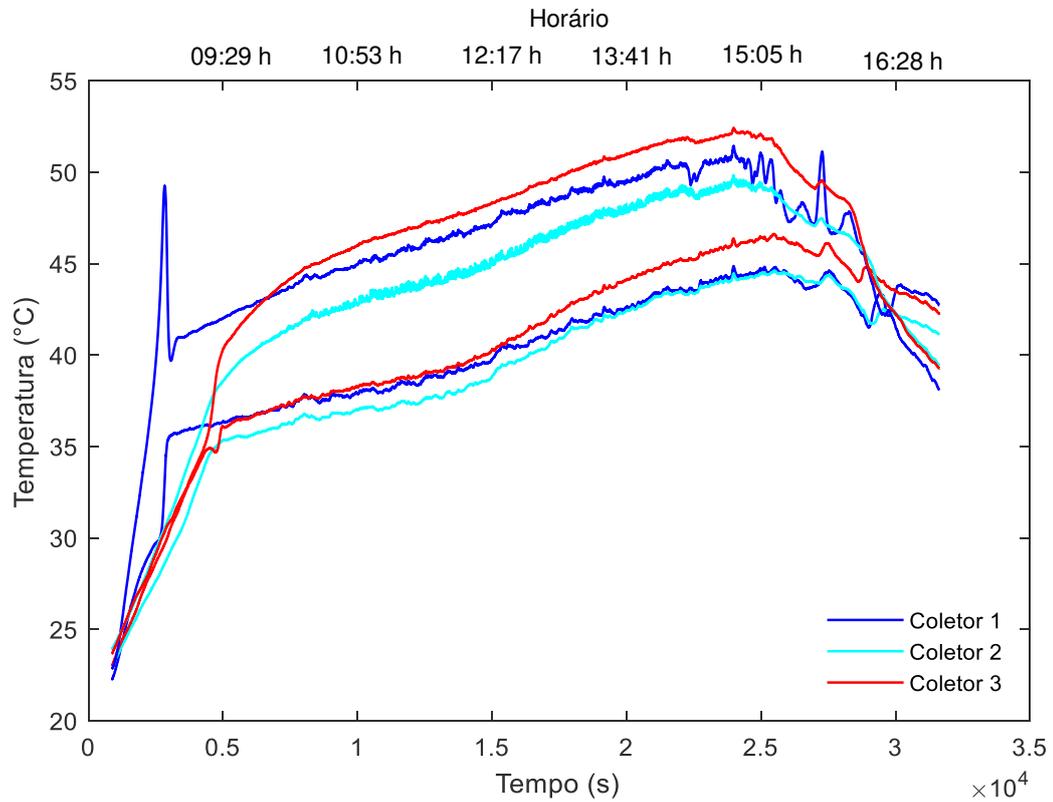


Figura 4.13. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 1: 29/08/22

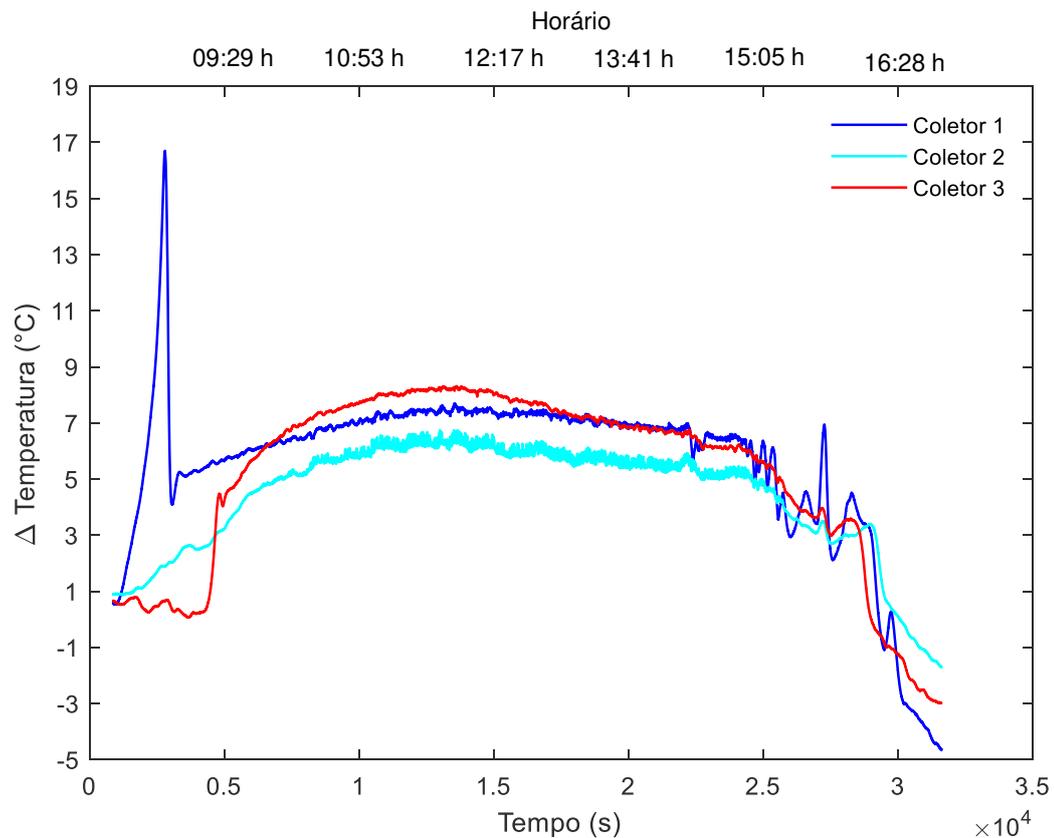


Figura 4.14. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 1: 29/08/22

Os resultados trazem para essa etapa dos testes, maiores temperatura para o coletor 1, sendo superadas pelo coletor 3 a partir das 09:55 h, tendo a maior temperatura de saída atingida neste dia como 52,42 °C no coletor 3, isso é refletido no gráfico de diferença de temperatura onde tem-se maior ΔT visto no coletor 3, de 8,31 °C.

O coletor 3 possui maiores ΔT entre 10:00 h à 13:10 h, chama-se a atenção para o período a partir das 15:00 h, caracterizado como nublado e com grande variação na radiação, como visto na Fig.4.15 o coletor 1 nos momentos de alta na radiação responde de maneira mais rápida, o que lhe confere picos significativos de ΔT nesse período em comparação aos demais coletores.

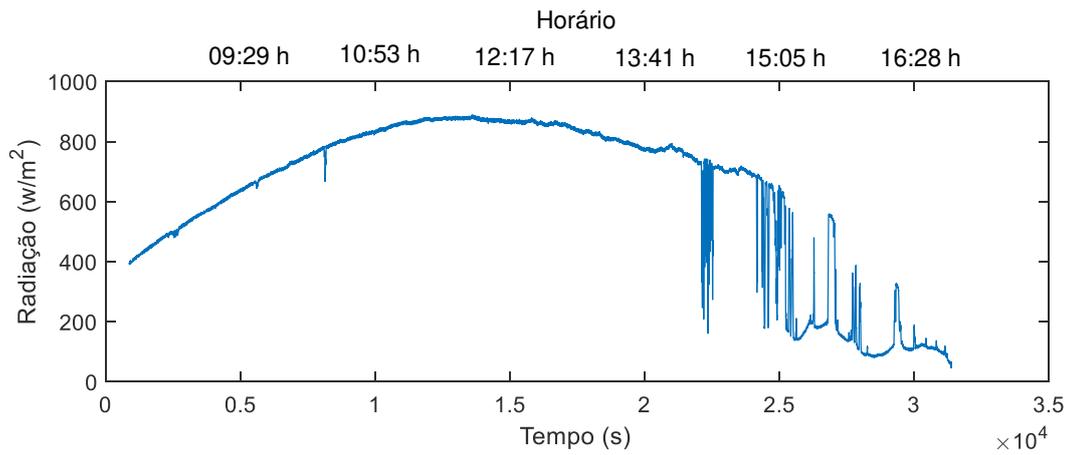


Figura 4.15. Perfil de radiação dia 29/08/22

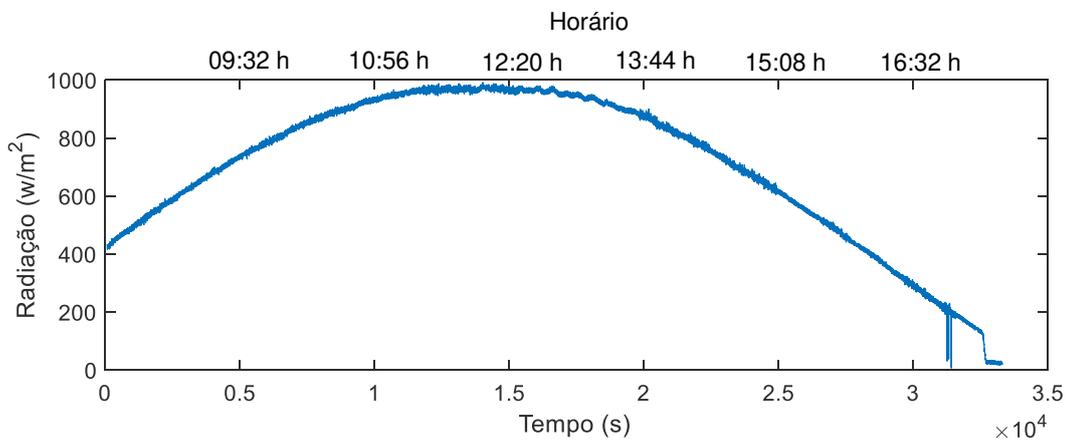


Figura 4.16. Perfil de radiação dia 02/09/22

Para o dia 02/09/22, como visualizado na Fig.4.16, o teste foi realizado sob a condição de dia ensolarado, e basicamente sem nuvens, trazendo os resultados vistos na Fig.4.17.

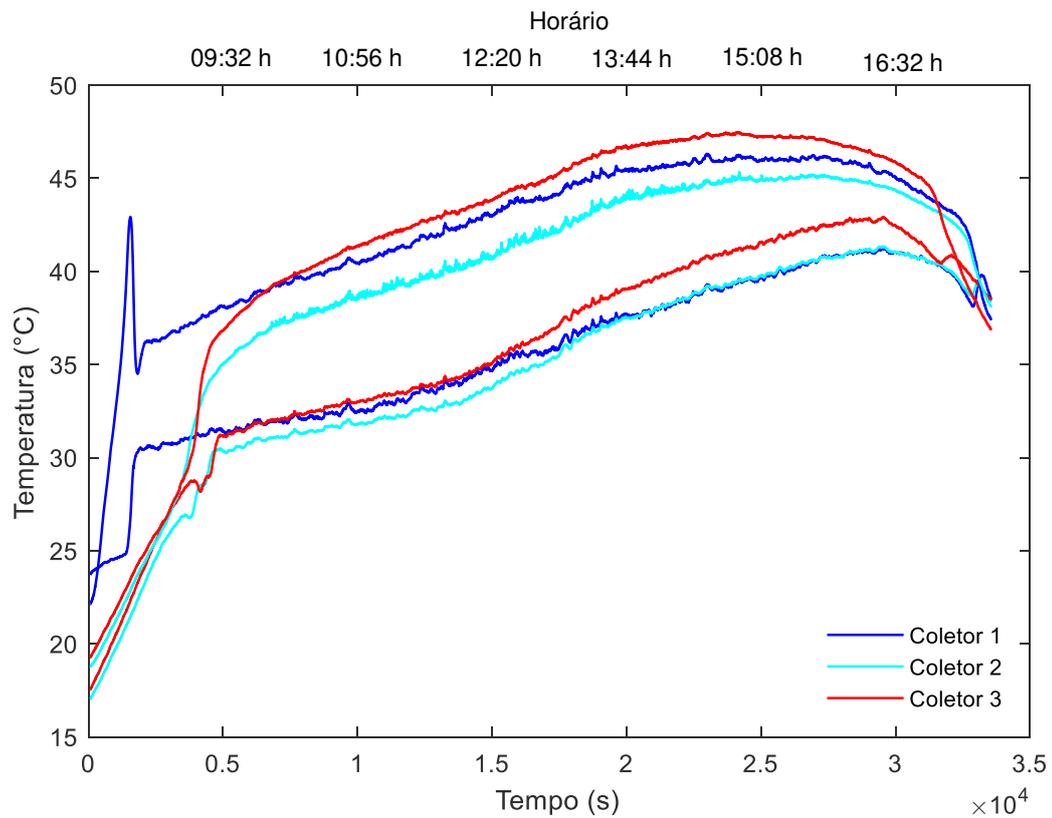


Figura 4.17. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 5: 02/09/22

Verifica-se que a concentração de 10 ppm mantém o comportamento de maiores temperatura de saída para o coletor 3 depois das 10:00 h, atingindo uma temperatura máxima para este dia de 47,47 °C. Enquanto para temperatura de entrada este coletor passa a ter um crescimento mais expressivo, distanciando-se do coletor 1 e 2 a partir das 12:20 h.

Conforme observado na Fig.4.18, tem-se resultados superiores de ΔT no coletor 3 entre às 10:20 h e 12:50 h, identificado como região de proximidade ao meio dia solar. A maior diferença de temperatura atingida neste dia foi de 9,04 °C, ocorrendo no coletor 3, os coletores 1 e 2 atingiram respectivamente os máximos de 8,52 °C e 7,67 °C.

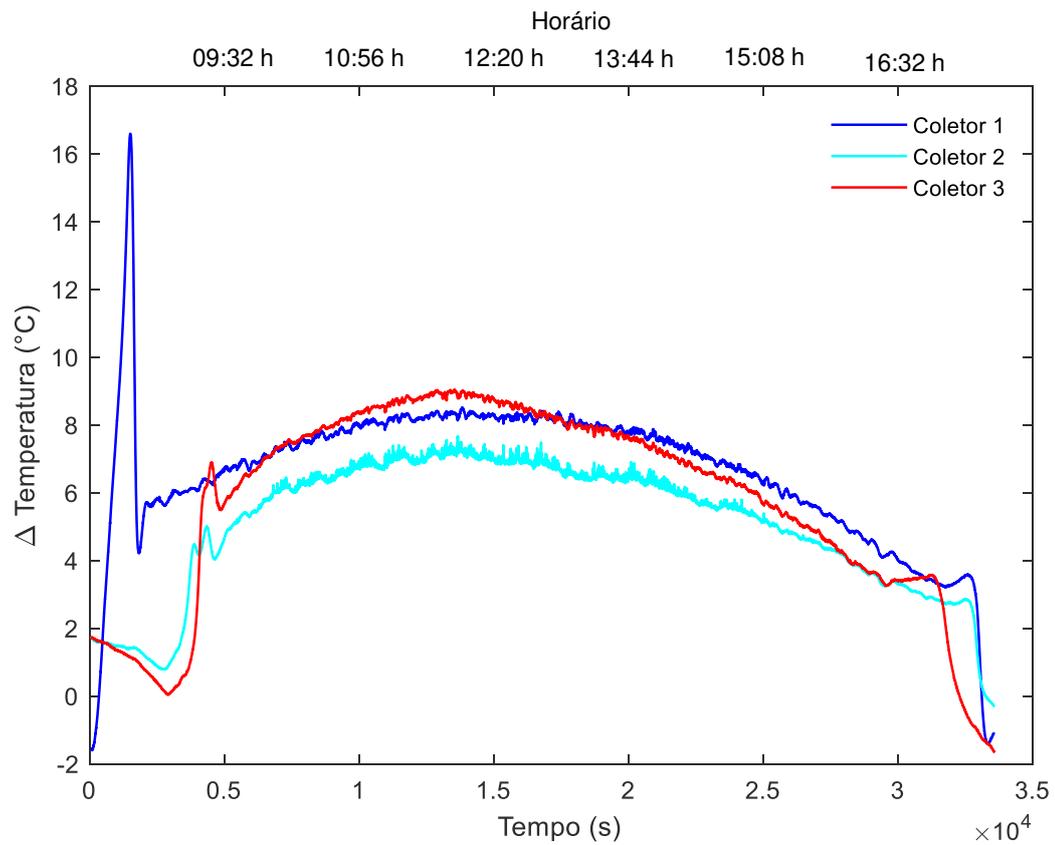


Figura 4.18. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 5: 02/09/22

4.2.3. Concentração de 20 ppm

Considerando a última concentração avaliada, de 20 ppm, para o dia 03/09/22, tem-se os resultados dos perfis de temperatura na Fig.4.19.

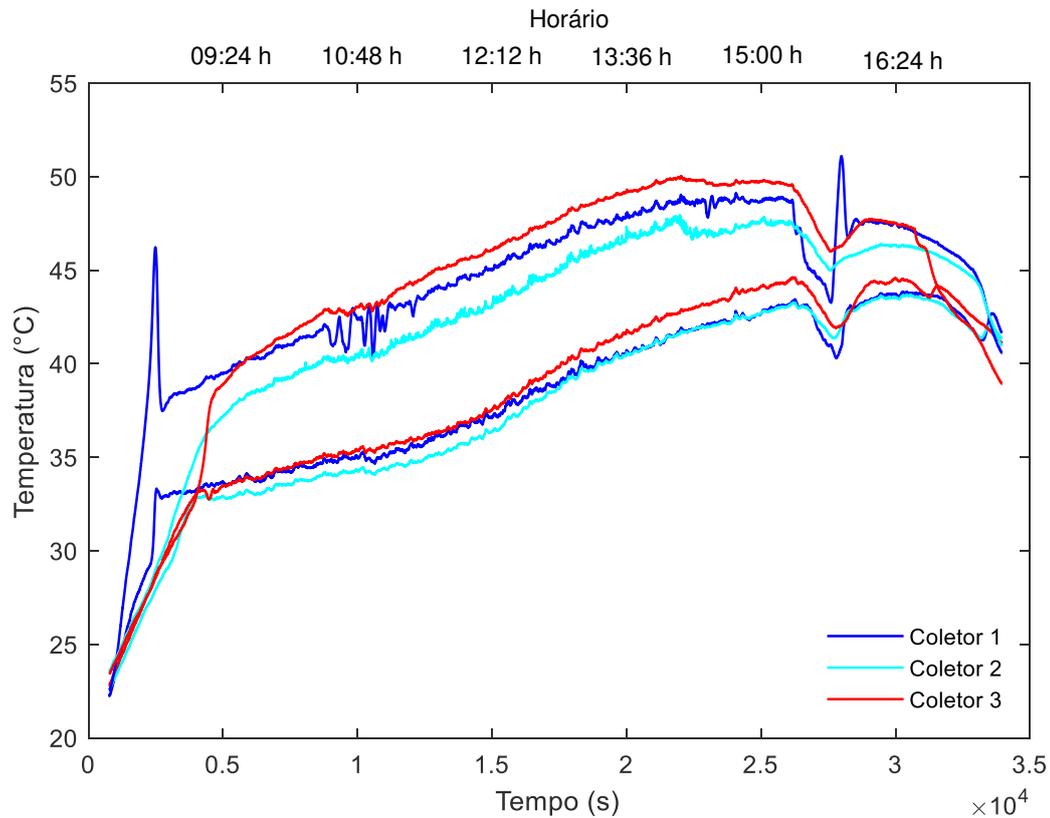


Figura 4.19. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 1: 03/09/22

Os perfis de temperatura mantêm o comportamento visto para as demais concentrações, indicando maiores valores de temperatura de saída para o coletor 3 após as 09:40 h. No entanto, é visto um pico favorecendo a temperatura de saída do coletor 1, próximo às 15:50 h, trazendo um comparativo dos perfis de temperatura com o perfil radiação deste dia, apresentado na Fig.4.20, é possível evidenciar que após um período de queda da radiação, a retomada para radiações mais altas refletem significativamente no coletor 1, enquanto os coletores 2 e 3 respondem de forma mais lenta, esse pico também é visualizado na Fig.4.21 nos resultados para as diferenças de temperatura de entrada e saída.

Observa-se semelhança desse trecho com o comportamento do coletor 1 ao início do teste, onde a exposição inicial a radiação causa um pico na temperatura de saída, assim é visto que após um período de queda brusca nos valores da radiação, a retomada para valores maiores, trazem efeito semelhante nesse coletor. Pode-se entender que, no coletor 1, quedas na radiação por um período maior levam a uma brusca redução da temperatura, de forma que torna-se necessário novamente o aquecimento para reestabelecer o efeito termossifão durante a operação do sistema. Neste dia, a maior temperatura de saída ocorreu nesse ponto, no coletor 1, sendo atingido 51,09 °C, o coletor 3 obteve temperatura máxima de saída de 50,03 °C.

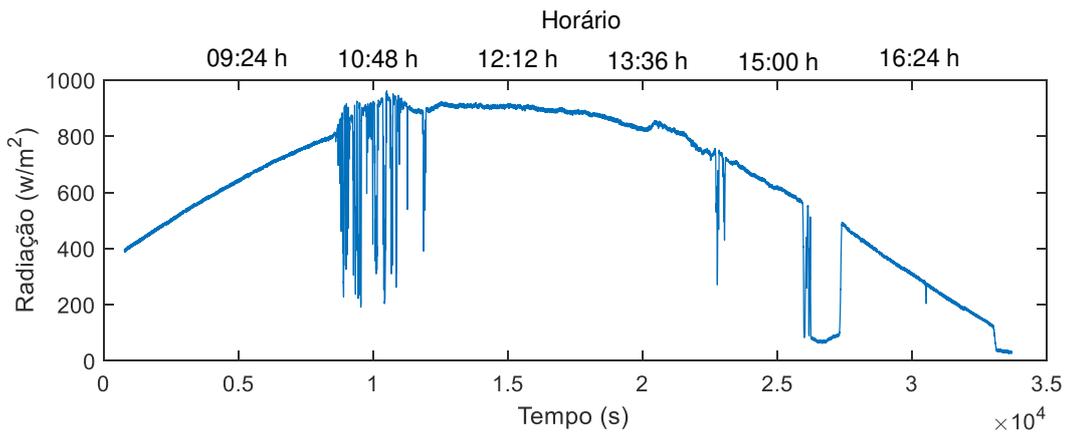


Figura 4.20. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 1: 03/09/22

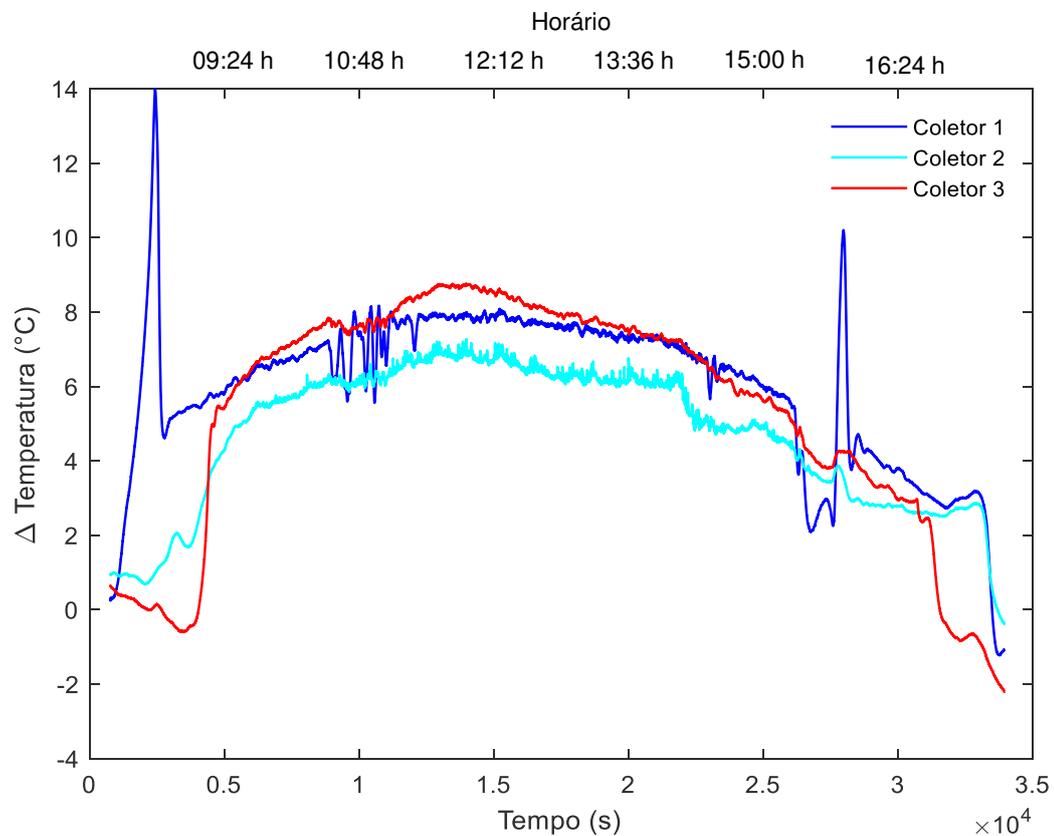


Figura 4.21. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 1: 03/09/22

O coletor 3 inicia seu comportamento de maiores valores para ΔT às 09:35 h, porém o intervalo nublado a partir das 10:30 h favorece em alguns instantes os valores do coletor 1, de forma que o coletor 3 volta a apresentar maiores valores somente depois das 11:10 h até as 13:45 h.

Nota-se que para os trechos nublados ao longo do dia, as variações trazem quedas e aumentos mais significativos para os resultados de ΔT no coletor 1, o qual atinge um segundo

pico ao longo do dia com ΔT de $10,20\text{ }^{\circ}\text{C}$. Porém, excetuando a ocorrência desses picos, inicial e às $15:50\text{ h}$, a ocorrência da maior diferença de temperatura é mantida para o coletor 3, assim como nas outras concentrações, chegando a atingir $8,76\text{ }^{\circ}\text{C}$ nesse dia, e coletor 1 atingiu máximo ΔT de $8,17\text{ }^{\circ}\text{C}$, e o coletor 2 de $7,28\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Os resultados do dia 07/09/22 referentes à concentração de 20 ppm são apresentados nas Fig.4.22 a 4.24.

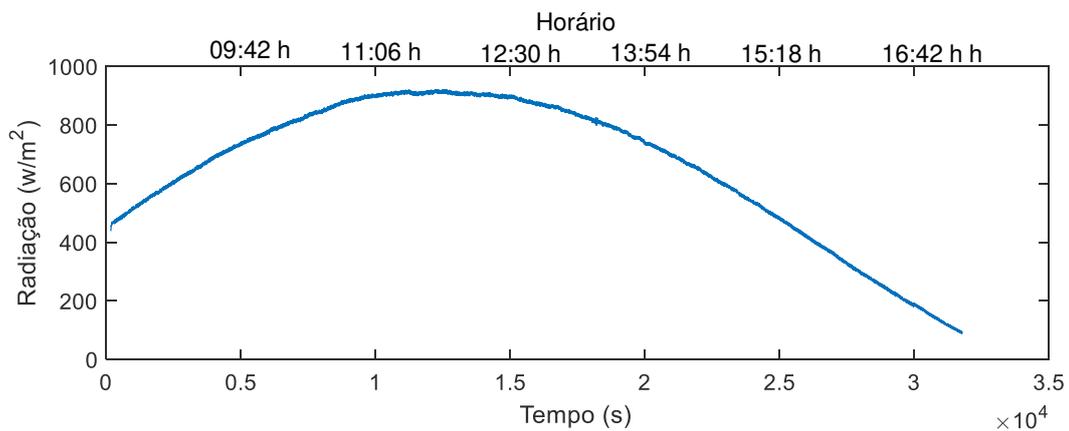


Figura 4.22. Perfil de radiação do dia 07/09/22

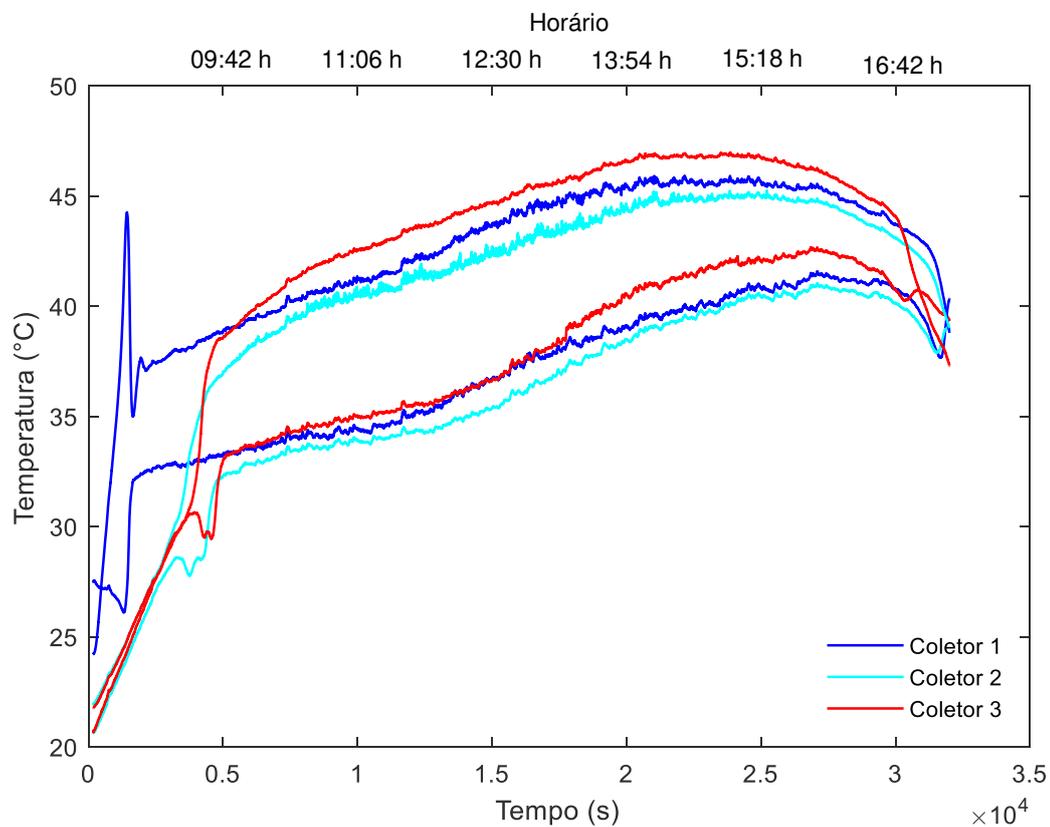


Figura 4.23. Perfis de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 5: 07/09/22

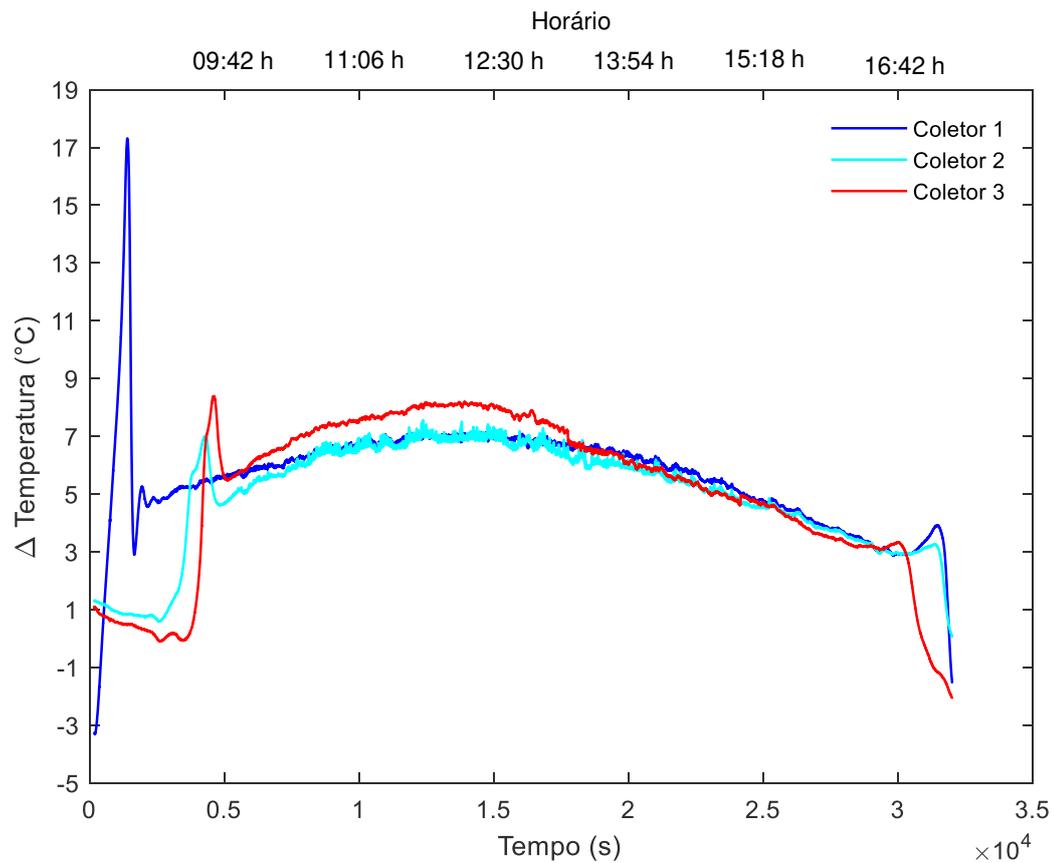


Figura 4.24. Diferenças de temperatura do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 5: 07/09/22

Novamente são verificados maiores valores para temperatura de saída no coletor 3 a partir das 09:50 h, onde se atingiu a maior temperatura do dia neste coletor, de 46,99 °C, os coletores 1 e 2 atingiram máximos de temperatura de saída 45,93 °C e 45,27 °C respectivamente.

Para os resultados de diferenças de temperatura foi obtido maior ΔT no coletor 3, de 8,39 °C, enquanto os valores máximos para os coletores 1 e 2 foram de 7,17 °C e 7,57 °C. Observa-se para este dia, que a curva do coletor 2 encontra-se próxima ao coletor 1, ocorrendo pontos em que tem-se até valores maiores para este coletor. Deve-se destacar também que neste dia a ocorrência de picos nos momentos iniciais nos coletores 2 e 3, embora não tão expressivos como os ocorridos no coletor 1, trouxeram neste caso valores próximos e até maiores do que o máximo ocorrido ao longo do dia para seus respectivos coletores, após esses picos observa-se maiores temperaturas no coletor 3 no período de 09:50 h à 13:20 h.

Convém pontuar que esses picos também foram verificados nos últimos dias de teste das concentrações de 5 ppm e 10 ppm, no entanto, os valores vistos ao longo do dia foram superiores a estes, no caso desta concentração, este pico apresentou maior destaque.

4.2.4. Comparativo entre as concentrações

Considerando as três etapas de realização dos testes, identifica-se que as maiores temperaturas de saída foram obtidas no coletor 3, com uso de nanofluido preenchendo o interior do coletor com placa absorvedora, realizando um comparativo quanto a concentração, foi obtida a maior temperatura com uso do nanofluido de concentração de 10 ppm, atingindo 52,42 °C, seguida da concentração de 5 ppm, onde atingiu-se a temperatura de 51,44 °C e por fim com uso do nanofluido de 20 ppm, com 50,47 °C.

No entanto, observando em relação as diferenças de temperatura, conforme detalhado na Tabela 4.1, que contempla as máximas diferenças de temperatura após retirados os picos adversos, apesar da manutenção dos maiores valores para o coletor 3, tem-se que em relação a concentração os melhores resultados de ΔT foram verificados para o uso do nanofluido de 5 ppm, atingindo um máximo de 9,95 °C. Os menores resultados foram obtidos para o coletor 2.

Tabela 4.1. Valores máximos obtidos para as diferenças de temperatura (ΔT) de entrada e saída dos coletores

Concentração	Dia de teste	Data	Coletor 1 (°C)	Coletor 2 (°C)	Coletor 3 (°C)
5 ppm	1	24/08/22	8,94	7,87	9,95
	2	25/08/22	9,40	6,99	9,48
	3	26/08/22	9,43	7,30	9,47
	4	27/08/22	7,66	7,02	9,06
	5	28/08/22	7,81	7,08	8,92
10 ppm	1	29/09/22	7,70	6,75	8,31
	2	30/08/22	8,86	7,00	8,59
	3	31/08/22	8,13	7,21	8,86
	4	01/09/22	8,35	7,58	8,92
	5	02/09/22	8,52	7,67	9,04
20 ppm	1	03/09/22	8,17	7,28	8,76
	2	04/09/22	8,22	7,54	8,56
	3	05/09/22	8,09	6,96	7,98
	4	06/09/22	8,08	7,19	8,12
	5	07/09/22	7,17	7,57	8,39

Quanto ao coletor 1 verificou-se que para dias ensolarados e sem nuvens, este possui valor inferior ao coletor 3, sendo superado em até 1,4 °C, como visto no dia 27/08/22. No entanto para dias com períodos nublados, os valores máximos mostram-se com maior

proximidade do coletor 3, ocorrendo nos pontos de variação brusca da radiação, como visto no 2º e 3º dia dos teste para concentração de 5 ppm, ou ainda para dias predominantemente nublados como os dias 30/08/22 e 05/09/22, o coletor 1 alcança os maiores valores de ΔT .

A Tabela 4.2 e a Fig.4.25 apresentam os valores médios para as máximas diferenças dos coletores, agrupando em relação as concentrações avaliadas nos testes.

Tabela 4.2. Valores médios das máximas diferenças de temperatura nos coletores

Coletor	Concentração	$(\bar{x} \pm s)$ °C
Coletor 1	Etapa 5 ppm	$8,65 \pm 0,86$
	Etapa 10 ppm	$8,31 \pm 0,43$
	Etapa 20 ppm	$7,95 \pm 0,44$
Coletor 2	5 ppm	$7,25 \pm 0,37$
	10 ppm	$7,24 \pm 0,39$
	20 ppm	$7,31 \pm 0,25$
Coletor 3	5 ppm	$9,38 \pm 0,40$
	10 ppm	$8,74 \pm 0,29$
	20 ppm	$8,36 \pm 0,32$

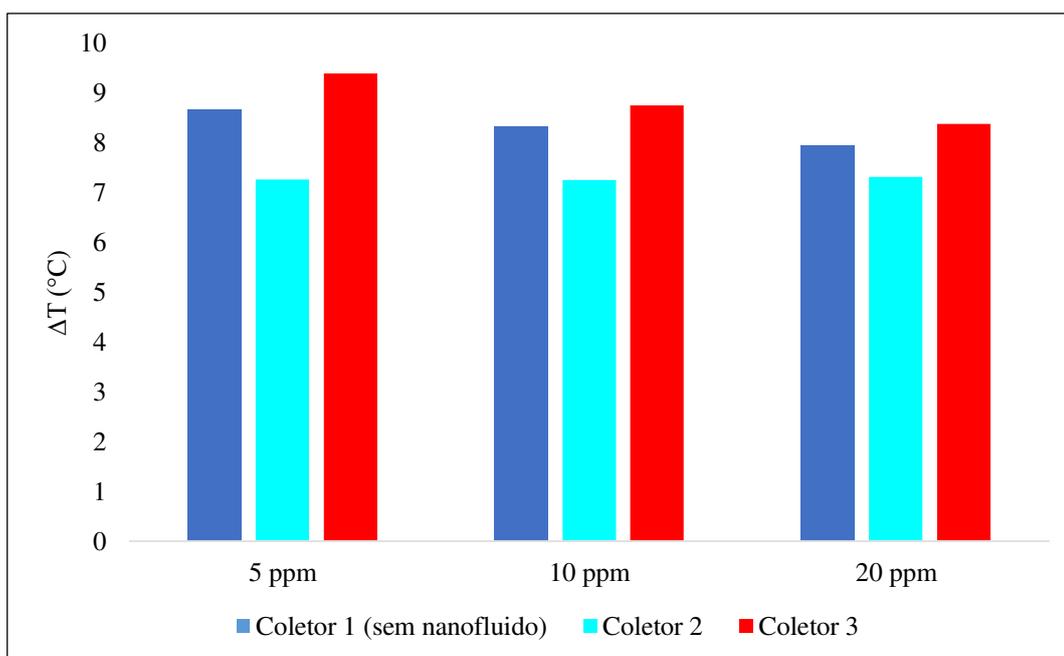


Figura 4.25. Valores médios de máximas diferenças de temperaturas para os coletores

O coletor 1, operou apenas sem o uso de nanofluido, devendo destacar-se que o desvio padrão dos valores avaliados nesse coletor foram superiores aos desvios dos outros dois coletores em todas as concentrações, visto que o coletor apenas com ar apresentou variações mais significativas conforme as condições de radiação dos dias de ensaios.

Os resultados indicaram o maior valor de ΔT , 9,38 °C, no coletor 3 utilizando o nanofluido na concentração de 5 ppm. O coletor 2 apresentou valores menores para diferença de temperatura em comparação ao coletor 1 e ao coletor 3 em todas as concentrações.

Analisando quanto as etapas de testes para cada concentração, conforme pontuado anteriormente, o coletor 3 atingiu os maiores valores de diferença de temperatura, de modo que na etapa com nanofluidos de 5 ppm, o coletor 3 superou respectivamente os coletores 1 e 2 em 8,44 % e 29,38 %, em 5,17 % e 20,71 % para a etapa de 10 ppm, e em 5,16 % e 14,36 % para a etapa com a concentração de 20 ppm.

Estas informações revelam uma diminuição do desempenho do coletor 3 sobre os outros coletores com o aumento da concentração. Considerando um comparativo com a configuração representativa do coletor tradicional (coletor 1), o desempenho entre as concentrações de 10 ppm e 20 ppm são bastante próximos.

A Fig. 4.26 apresenta um comparativo entre as diferenças de temperatura dos coletores 2 e 3 com relação as concentrações de nanofluido avaliadas.

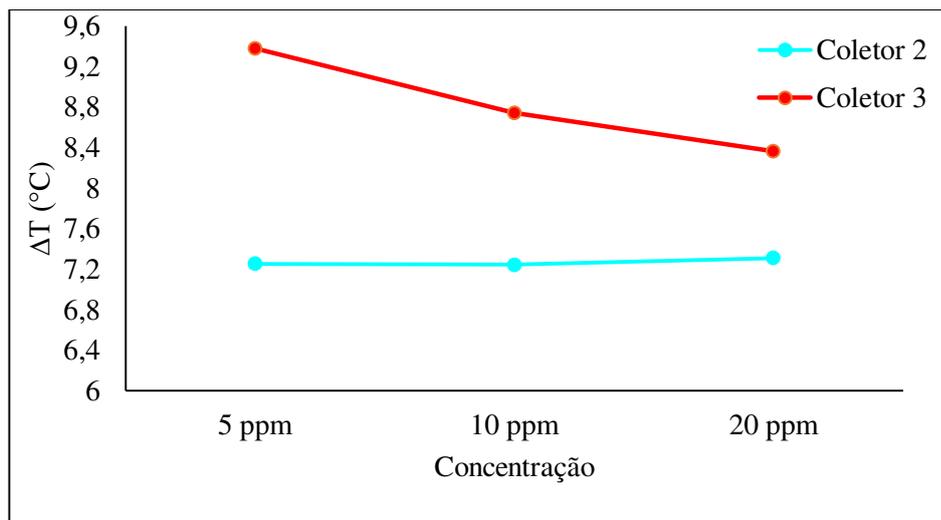


Figura 4.26. Diferenças de temperaturas dos coletores 2 e 3 de acordo com concentração do nanofluido

Percebe-se que o coletor 3 teve um comportamento decrescente para as diferenças de temperaturas considerando um aumento na concentração, com 5 ppm, 10 ppm e 20 ppm, os

quais obtiveram médias de 9,38 °C, 8,74 °C e 8,36 °C respectivamente, chegando dessa forma a uma redução de até 10,87 % no valor de ΔT . É possível, que parte desta queda esteja associada a uma redução dos altos níveis de radiação vistos na primeira etapa dos testes, como pode ser percebido pela variação das diferenças de temperatura no coletor 1. No entanto, para o coletor 2, a variação da concentração do nanofluido não trouxe impactos expressivos para o comportamento do coletor quanto a diferença de temperatura, mantendo-se muito próxima para as três concentrações. Assim, infere-se que o uso do nanofluido pode diminuir a sensibilidade no coletor frente às variações de radiação.

Logo, aponta-se que o comportamento de diminuição do ganho de temperatura do coletor 3 em relação aos coletores 1 e 2 estão associados a uma diminuição da diferença de temperatura do coletor 3 com o aumento da concentração.

4.2.5. Eficiência

De forma a consolidar a comparação do desempenho dos coletores solares de uso tradicional (coletor 1) e com uso de nanofluidos (coletores 2 e 3), foi calculada a eficiência térmica destes coletores, com base nos intervalos representativos segundo a ABNT/NBR 17003, (2021). A critério de comparação são apresentados nas Fig.4.27 a 4.29 intervalos do quarto dia de teste de cada etapa, contemplando trechos com radiação máxima variando entre 960 W/m² e 970 W/m², demais resultados podem ser consultados no Apêndice C.

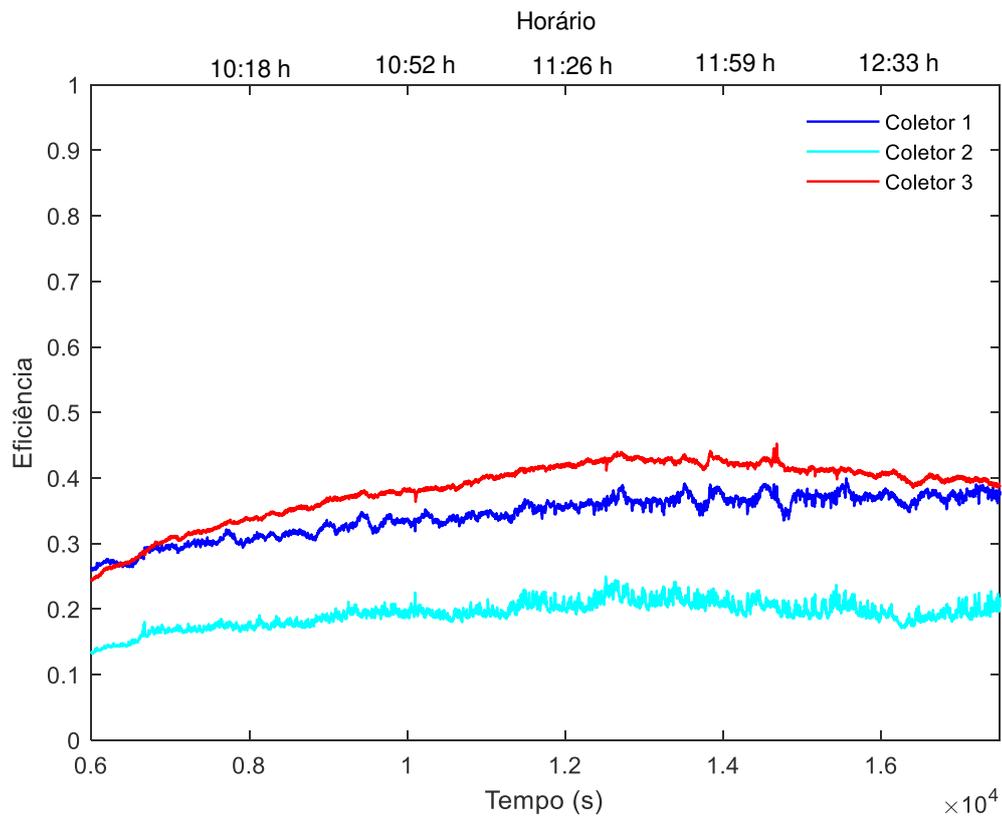


Figura 4.27. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 5 ppm – 27/08/22

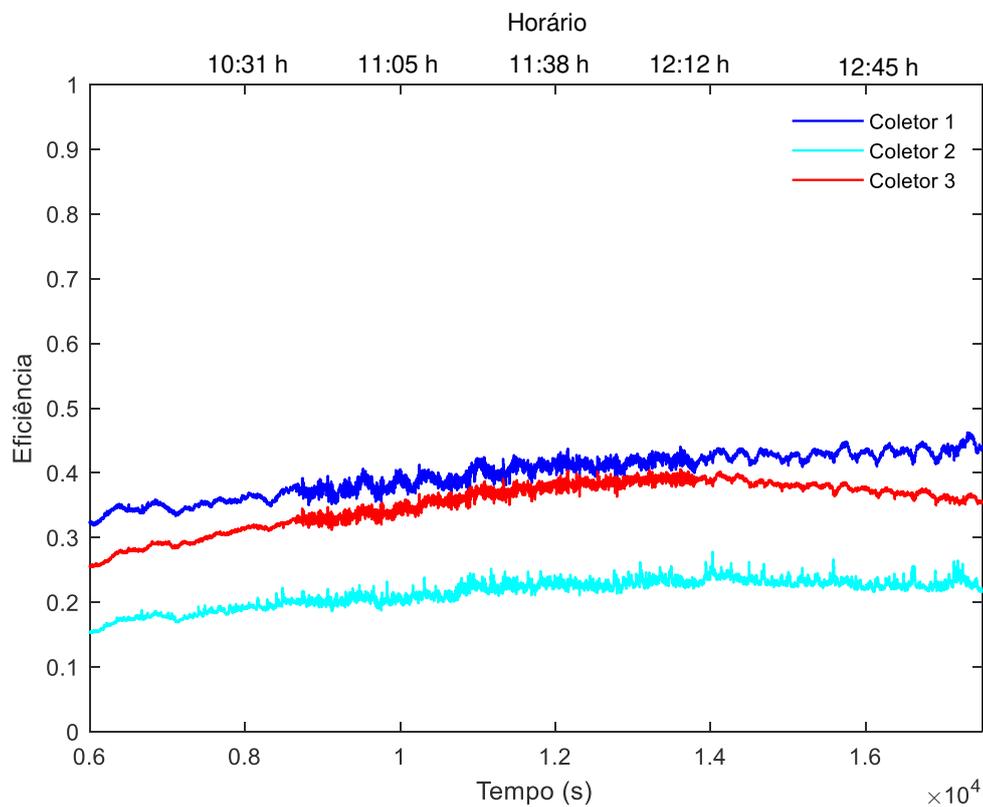


Figura 4.28. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 10 ppm – 01/09/22

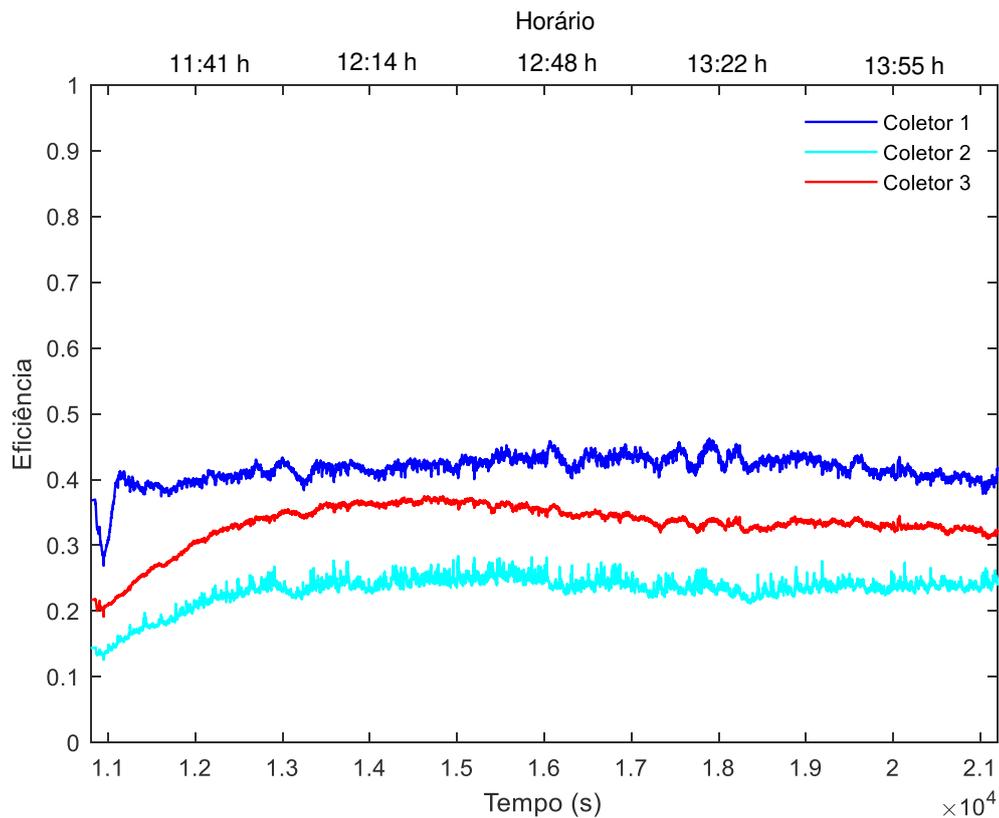


Figura 4.29. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 20 ppm – 06/09/22

Considerando, que o funcionamento por termossifão possui relação direta com os níveis de radiação por influência da vazão mássica do sistema, além da contribuição da radiação no próprio equacionamento da eficiência, verifica-se que esta oscila ao longo do dia de acordo com os níveis de radiação.

Na concentração de 5 ppm notou-se um melhor desempenho do coletor 3, seguido do coletor 1, principalmente nos intervalos de maiores radiações. Como visto nas Fig.4.28 e 4.29, para a etapa de 10 ppm e 20 ppm o melhor desempenho ocorreu no coletor 1.

Os resultados reforçam o menor desempenho do coletor 2 em comparação aos coletores 1 e 3, para todas as concentrações avaliadas. Para o coletor 3 foi evidenciado um melhor desempenho em relação ao coletor 1 apenas na concentração de 5 ppm. Assim considerando, as relações de custo-benefício, para as concentrações de 10 ppm e 20 ppm, o coletor 1, que representa a configuração tradicional, mostra-se mais vantajosa, visto que possui configuração construtiva igual ao coletor 3, porém sem o custo adicional do nanofluido.

Cabe destacar que maiores temperaturas de operação levam ao aumento das perdas térmicas, uma maior eficiência térmica é obtida para temperaturas de entrada próximas as condições do ambiente, visto que assim tem-se uma redução de perdas para o meio. Esse ponto

pode ser elencado como justificativa do comportamento da eficiência do coletor 3, no qual o aumento das temperaturas não foram suficientes para compensar o aumento das perdas térmicas, levando a uma redução da eficiência. Outro ponto de relevância para o cálculo da eficiência trata-se da área absorvedora dos coletores, considerando que os coletores com uso de nanofluido possuem maior área de absorção em comparação ao tradicional, tem-se também a ocorrência de maior radiação incidente disponível ao coletor, pois o coletor 1 conta com a área da placa absorvedora e a planificação dos tubos, enquanto para os coletores 2 e 3, a área de absorção contempla toda a superfície ocupada pelo nanofluido.

A Fig. 4.30 apresenta a comparação entre as médias das eficiências máximas verificadas nos coletores.

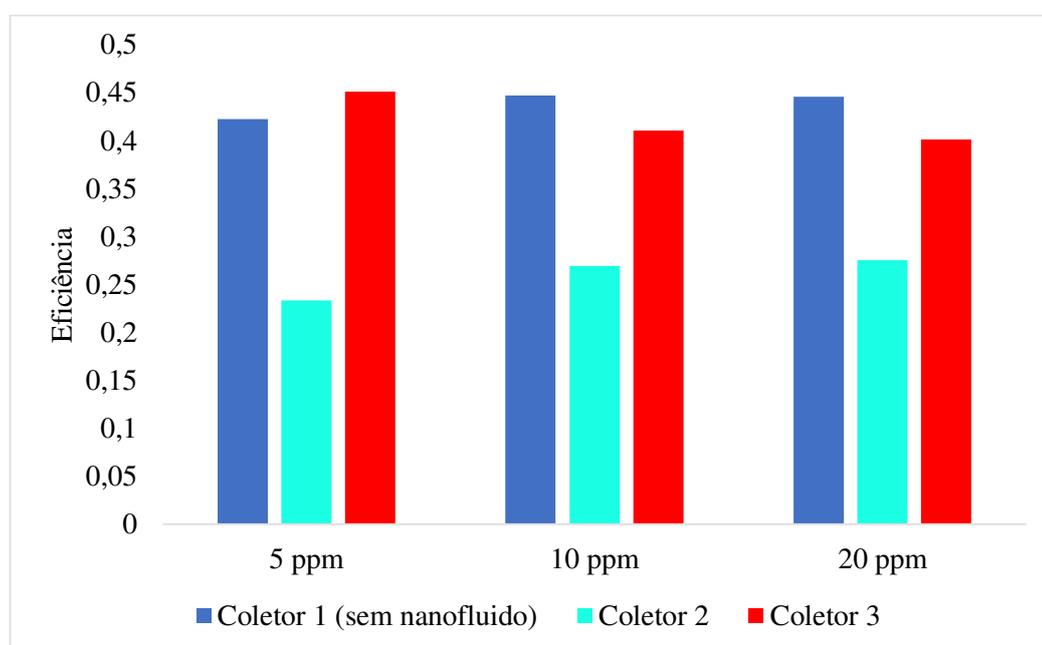


Figura 4.30. Comparativo das eficiências térmicas máximas dos coletores

Para concentração de 5 ppm o coletor 3 atingiu um máximo de 45,10 %, nessa etapa as médias dos valores máximos dos coletores 1 e 2 foram 42,23 % e 23,31 %, dessa forma o desempenho do coletor 3 foi superior ao coletor 1 em 6,80 %, o coletor 2 teve um desempenho inferior ao coletor tradicional (coletor 1), sendo superado por este em 81,17 %.

Para as concentrações de 10 ppm e 20 ppm o coletor 1 atingiu os maiores valores de eficiência térmica, com 44,65 % e 44,55 %, respectivamente, o que garantiu valores superiores em 65,95 % e 62,01 % em relação ao coletor 2, e de 8,82% e 11,05 % comparado ao coletor 3 em cada concentração avaliada.

Esses resultados, explicitam que a máxima eficiência térmica foi verificada no coletor 3 utilizando o nanofluido na concentração de 5 ppm.

4.3. Avaliação da estabilidade

A avaliação da estabilidade do nanofluido foi realizada com base na medição da absorvância, sendo feito um comparativo entre os valores logo após a produção e ao final dos testes.

A Fig.4.31 apresenta os resultados para absorvância nos nanofluidos logo após a produção, trazendo um comparativo entre as amostras utilizadas de 5, 10 e 20 ppm. É verificada maior absorvância para a concentração de 20 ppm, em seguida 10 ppm e com menor absorvância tem-se a amostra de 5 ppm. Esse resultado concorda com o esperado, visto que para maiores concentrações tem-se mais nanopartículas na dispersão, aumentando dessa forma a absorvância do nanofluido avaliado.

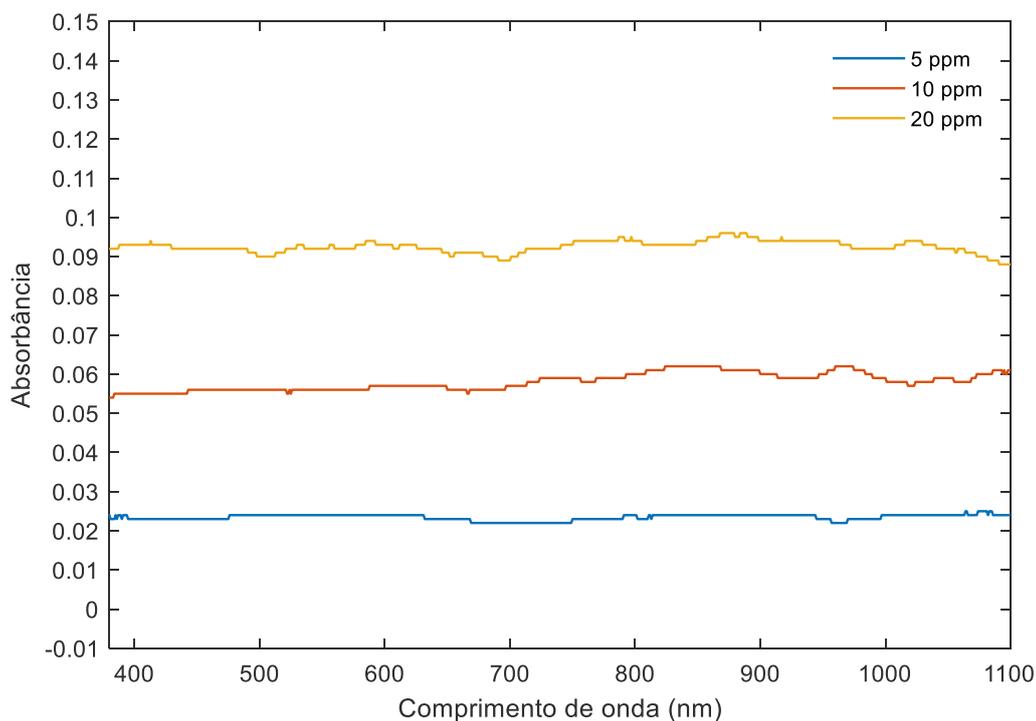


Figura 4.31. Comparativo de absorvância entre amostras iniciais

Após os 5 dias de teste para cada concentração, foram realizadas as medições da absorvância de uma amostra sem uso nos coletores, com uso no coletor 2 e com uso no coletor 3. As Fig. 4.32, 4.33 e 4.34 trazem os resultados dos comparativos de absorvância inicial e final

para as concentrações de 5 ppm, 10 ppm e 20 ppm respectivamente.

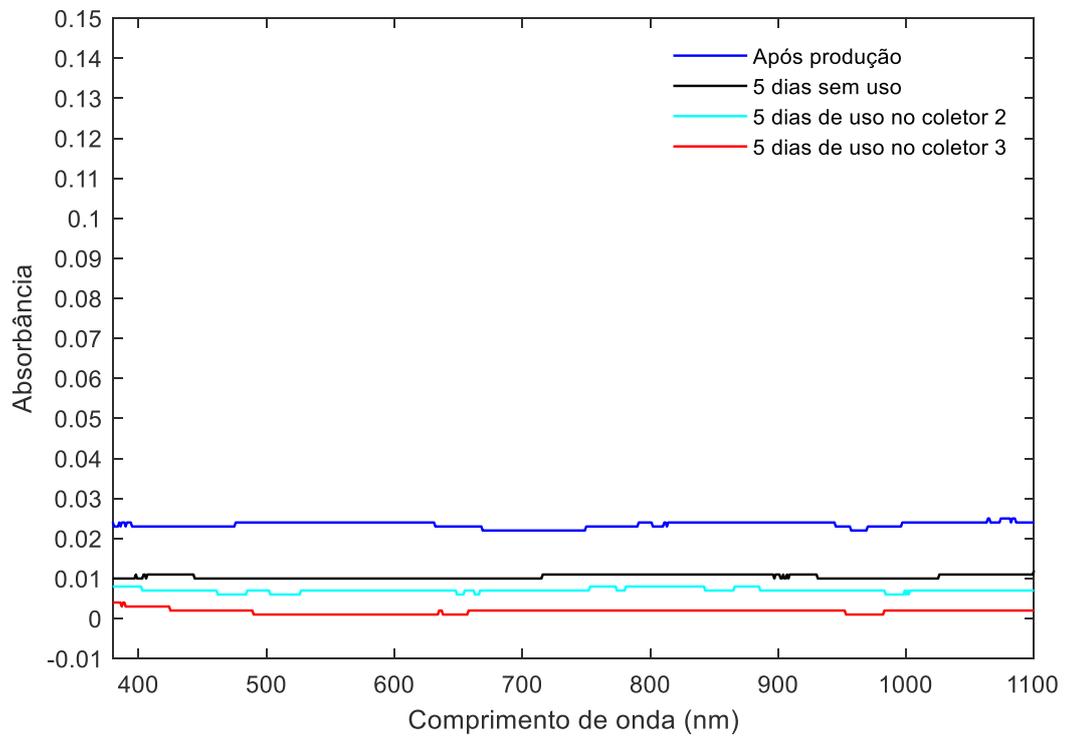


Figura 4.32. Resultados da absorvância do nanofluido de 5 ppm

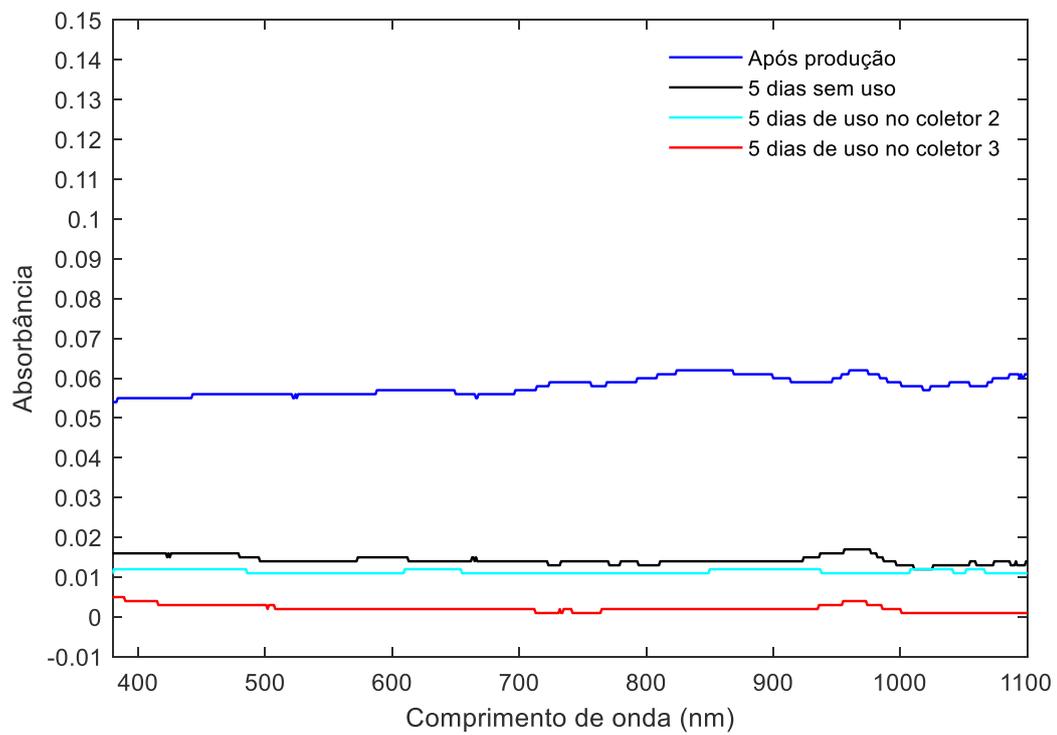


Figura 4.33. Resultados da absorvância do nanofluido de 10 ppm

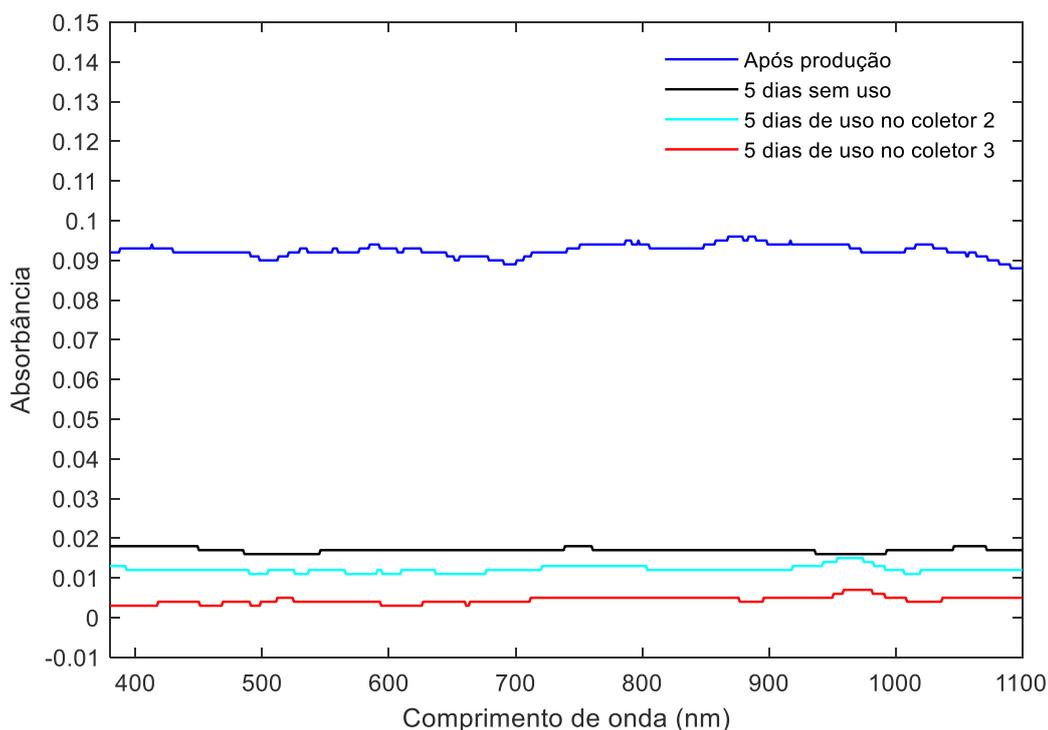


Figura 4.34. Resultados da absorbância do nanofluido de 20 ppm

Os resultados revelam uma redução da absorbância para todas as amostras produzidas, sendo percebida uma redução mais acentuada na amostra de 20 ppm, indicando esta como a condição de menor estabilidade entre os nanofluidos produzidos, de acordo com as condições das amostras após os 5 dias foi verificada uma redução na absorbância de 81,62 % para a mostra sem uso, 86,86 % para amostra com uso no coletor 2 e 96,32 % para amostra com uso no coletor 3. A redução menos acentuada ocorre para a amostra de 5 ppm, sendo verificadas reduções na absorbância de 55,45 %, 69,86 % e 92,31 % para as amostras sem uso e as utilizadas nos coletores 2 e 3 respectivamente, para as amostras de 10 ppm as reduções da absorbância nesta mesma ordem corresponderam a 75,28 %, 80,36 % e 95,20 %.

Deve-se destacar que os nanofluidos utilizados no coletor 3 apresentaram os menores valores de absorbância para as três concentrações. Comparando as amostras sem uso e com uso no coletor 2 é indicada uma absorbância levemente superior para a amostra sem uso. Esse resultado indica que o uso dos nanofluidos nos coletores solares promoveu uma maior degradação das amostras produzidas, tendo um impacto mais significativo no coletor 3, sendo este o coletor que além das tubulações verticais, contidas no coletor 2, possui placa absorvedora, tem-se nesse caso uma maior área de contato entre o nanofluido e coletor.

A inspeção visual dos coletores quanto a deposição de nanopartículas durante os testes confirmaram os resultados obtidos no espectrofotômetro. Para a concentração de 5 ppm, ao final do período de teste, foi percebida deposição aparente no coletor 3, com formação de aglomerados de nanopartículas depositados na região superior do coletor e sobre a placa absorvedora, como visto na Fig.4.35. No coletor 2, Fig.4.36, não ocorreu formação de aglomerados visíveis.



Figura 4.35. Fotos dos coletor 3 com nanofluido de 5 ppm a) 1º dia; b) 5º dia

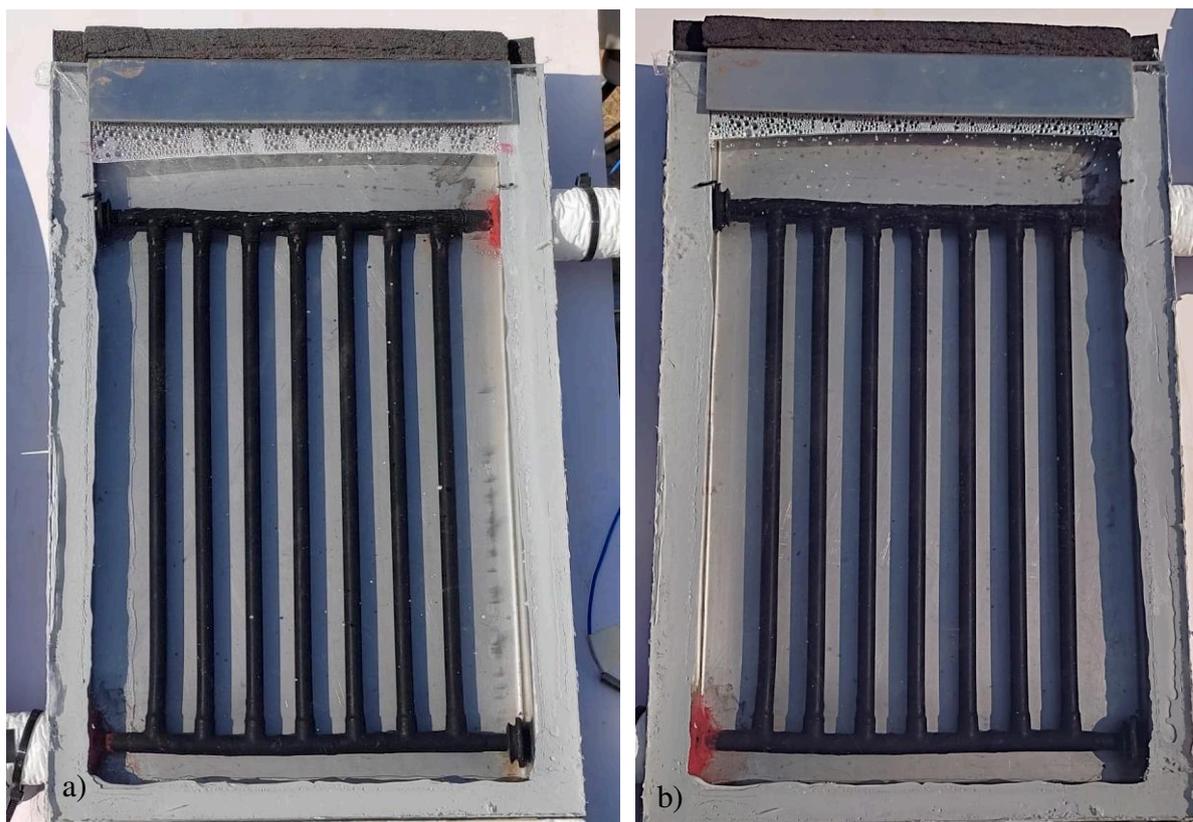


Figura 4.36. Fotos dos coletor 2 com nanofluido de 5 ppm a) 1º dia; b) 5º dia

Considerando os testes para o nanofluido na concentração de 10 ppm, ao final dos testes foi possível verificar deposição nos coletores 2 e 3, visto nas Fig. 4.37 e Fig. 4.38. No coletor 2, foi verificada formação de pequenos aglomerados, depositados principalmente na região superior do coletor. No coletor 3 foram formados aglomerados maiores e com deposição na região superior e central do coletor, sendo verificada presença de deposições extensas sobre a placa absorvedora, como evidenciado na Fig. 4.39.

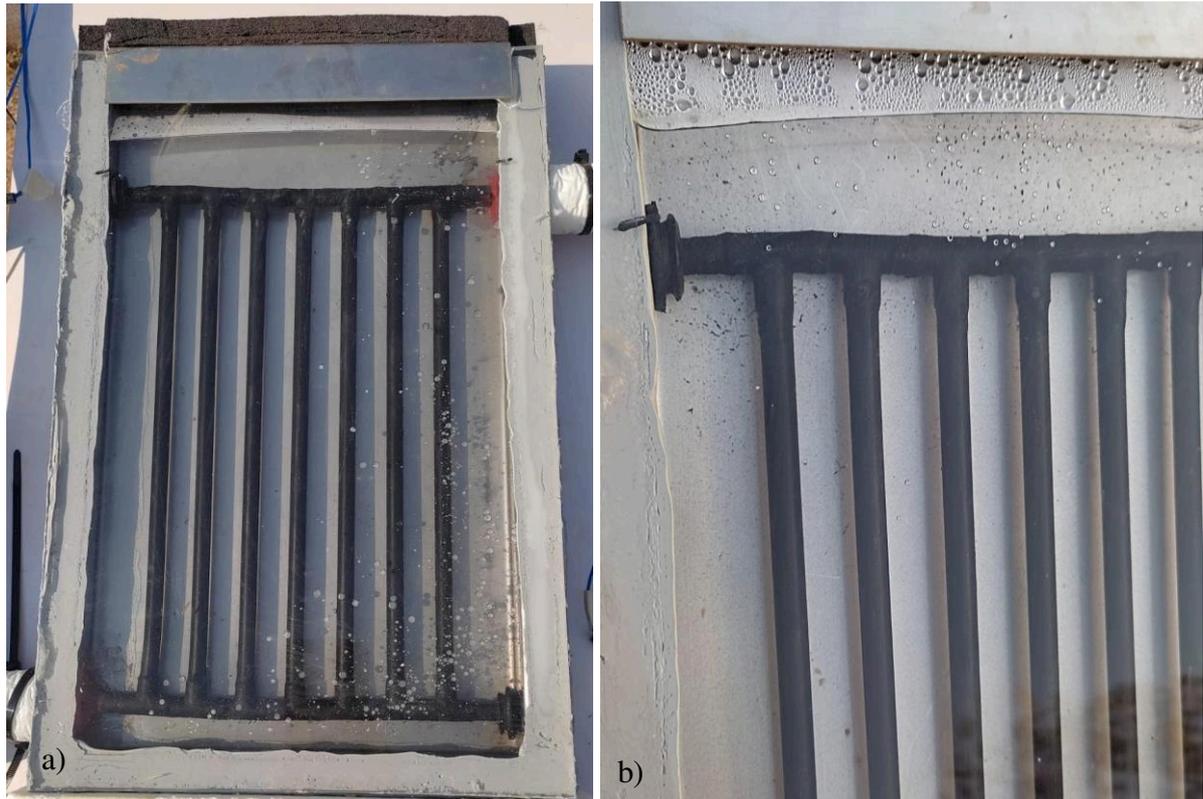


Figura 4.37. Fotos dos coletor 2 com nanofluido de 10 ppm a) 1º dia; b) 5º dia



Figura 4.38. Fotos dos coletor 3 com nanofluido de 10 ppm a) 1º dia; b) 5º dia



Figura 4.39. Detalhes de deposição no coletor 3 com nanofluido de 10 ppm - 5º dia de teste

Para os testes com os nanofluidos na concentração de 20 ppm, foi possível verificar uma deposição significativa ainda no meio do período de testes. Ao 3º dia foi visualizada deposição nos dois coletores, com formação de maiores aglomerados no coletor 3, estando estes depositados principalmente nas região inferior do coletor. Ao final do 5º dia de teste, o coletor 2 apresentava deposição na região superior, enquanto no coletor 3 foram formados grandes aglomerados depositados na região central e inferior do coletor, e com deposições extensas sobre a placa absorvedora. As Fig. 4.40 a 4.44 trazem detalhes dos coletores no 1º, 3º e 5º dia de teste.



Figura 4.40. Fotos dos coletores com nanofluido de 20 ppm - 1º dia de teste: a) Coletor 2; b) Coletor 3



Figura 4.41. Detalhe deposição no coletor 2 com nanofluido de 20 ppm - 3º dia de teste



Figura 4.42. Detalhe deposição no coletor 3 com nanofluido de 20 ppm - 3º dia de teste



Figura 4.43. Fotos dos coletores com nanofluido de 20 ppm - 5º dia de teste: a) Coletor 2; b) Coletor 3



Figura 4.44. Detalhe deposição no coletor 3 com nanofluido de 20 ppm - 5° dia de teste

Desta forma, tem-se uma convergência entre os resultados de medição da absorbância e da inspeção visual, que reforçam uma menor estabilidade para o nanofluido na concentração de 20 ppm.

Retomando os resultados do coletor 3 para os perfis de temperatura e diferença de temperatura verificou-se que a adição de nanopartículas aumentou a capacidade de absorção do coletor em comparação ao modelo tradicional (coletor 1), como evidenciado pelo aumento da temperatura de saída, no entanto o aumento adicional de nanopartículas culminou na redução das diferenças de temperatura. Confrontando esses resultados com a avaliação da estabilidade das amostras produzidas e utilizadas é possível justificar que essa redução está associada a diminuição da estabilidade do nanofluido com o aumento da concentração, devido a aglomeração de nanopartículas.

CAPÍTULO 5

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este trabalho buscou analisar o uso de nanofluido de grafeno e água destilada em coletores solares, sendo desenvolvidos experimentos em coletores solares de placa plana com diferentes configurações construtivas e condições de teste para três concentrações de nanofluido. A análise dos resultados obtidos fundamentaram as conclusões descritas a seguir.

O coletor 1, associado neste estudo como o coletor de placa plana em sua forma tradicional, indicou uma maior sensibilidade às variações na radiação, em comparação aos coletores com nanofluido, apresentando quedas e aumentos bruscos para o perfil de temperatura acompanhando o perfil de radiação do dia.

Para os dias de teste ensolarados ou apenas com trechos nublados, as temperaturas máximas de saída foram registradas no coletor 3, porém para dias predominantemente nublados os valores máximos ocorreram no coletor 1. O coletor 2 apresentou de maneira geral temperaturas inferiores aos coletores 1 e 3.

Foi possível perceber um comportamento característico no coletor 3 de aumento da temperatura de saída a partir das 10:00h, e de melhor desempenho para variação de temperatura entre às 10:00 h e 14:00 h, direcionando desta forma a conclusão que este coletor apresenta os melhores resultados no meio dia solar, e períodos próximos a ele, sendo este o intervalo correspondente ao período de maiores radiações do dia.

Os maiores resultados para temperatura de saída e variação de temperatura ocorreram no coletor 3, sendo respectivamente 52,42 °C e 9,95 °C.

Observando quanto as médias de variações de temperatura para as etapas de testes de cada concentração, foi verificado melhor desempenho para o coletor 3 na concentração de 5 ppm, com média de 9,38 °C. Assim, frente aos resultados do coletor 3, tem-se que uso de nanofluidos contribuiu para o aumento da variação de temperatura no coletor, chegando a um ganho de até 8,44 % em comparação a configuração tradicional.

No entanto, diante da obtenção de resultados inferiores para o coletor 2, conclui-se que o uso de nanofluido não garante ganho suficiente para promover a substituição da placa absorvedora do coletor, de forma que o melhor resultado quanto a variação de temperatura ocorre na configuração de ação conjunta da placa absorvedora e nanofluido como meio de absorção de radiação solar.

A observação dos resultados do ponto de vista da eficiência térmica reforçam um melhor desempenho do coletor 3 com nanofluido na concentração de 5 ppm, atingindo um máximo de 45,10 %. Porém, é importante destacar que para maiores concentrações, 10 ppm e 20 ppm, não foi verificado melhor desempenho deste coletor em relação ao coletor 1, mantendo dessa forma o uso do coletor tradicional como melhor alternativa. O coletor 2, para esta avaliação manteve-se com resultados inferiores aos coletores 1 e 3, reiterando assim, que seu uso não é vantajoso.

Referentes aos resultados para variação nas concentrações, não foram notadas alterações significativas nas diferenças de temperatura do coletor 2, enquanto no coletor 3 verificou-se a diminuição da diferença de temperatura com o aumento da concentração. Esse resultado foi corroborado com avaliação da estabilidade, onde se indicou uma redução desta com o aumento da concentração, mediante as avaliações por medição de absorvância e de inspeção visual, percebendo-se assim que a redução da variação de temperatura no coletor ocorre com a redução da estabilidade do nanofluido.

O nanofluido na concentração de 20 ppm mostrou-se como o menos estável, apresentando as maiores reduções na absorvância nas três condições avaliadas, da amostra sem uso, com uso no coletor 2 e com uso no coletor 3, de 81,62 %, 86,86 % e 96,32 % respectivamente. Foi identificada uma influência da condição de uso do nanofluido sobre a formação dos aglomerados, de maneira que o uso no coletor 3 promoveu em todas as concentrações maior deposição de nanopartículas do que no coletor 2.

Apesar de promover menor degradação no nanofluido, coletor 2 não mostrou resultados que corroborem a substituição da configuração tradicional, visto que indicou menores valores para as temperaturas, diferenças de temperaturas e eficiência térmica. Quanto ao coletor 3, tem-se que os maiores valores de temperatura de saída e de ΔT podem ser atingidos em comparação ao coletor tradicional, sob a condição de dia ensolarado e em períodos de alta radiação, e com maior eficiência na condição com nanofluido na concentração de 5 ppm. Deve ser destacado que a estabilidade do nanofluido segue como um desafio para aplicações a longo prazo nos coletores solares nas configurações avaliadas neste estudo.

5.1.Perspectivas de trabalhos futuros

As possibilidades para trabalhos futuros que possam contribuir significativamente são:

- Avaliação da atmosfera na cavidade dos coletores;
- Avaliação do efeito de troca do fluido no interior do coletor;
- Modelagem do coeficiente global de transferência de calor com preenchimento do coletor por nanofluido;
- Avaliação da influência da vazão mássica sobre o desempenho do coletor;
- Avaliação da taxa de resfriamento do reservatório térmico para períodos sem radiação;
- Utilização de outros nanofluidos para avaliação experimental, considerando diferentes nanopartículas e/ou fluido base.
- Realização de simulações computacionais validadas nas condições deste trabalho e como comparativo para outras condições de operação.

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 15569: Sistemas solares térmicos e seus componentes - Coletores solares - Requisitos e métodos de ensaio, Rio de Janeiro, Brasil, 2021.

AHMED, Sumair Faisal; KHALID, Mohammad; VAKA, Mahesh; WALVEKAR, Rashmi; NUMAN, Arshid; RASHEED, Abdul Khaliq; MUBARAK, Nabisab Mujawar. Recent progress in solar water heaters and solar collectors: A comprehensive review. **Thermal Science and Engineering Progress**, 25, 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; MARQUEZ, Fausto Pedro García; SARSAM, Wail Sami. Experimental investigations of the performance of a flat-plate solar collector using carbon and metal oxides based nanofluids. **Energy**, 227, 2021.

ALI, Naser; TEIXEIRA, Joao A.; ADDALI, Abdulmajid. A Review on Nanofluids: Fabrication, Stability, and Thermophysical Properties. **Journal of Nanomaterials**, 2018, 2018.

AWAIS, Muhammad; BHUIYAN, Arafat A.; SALEHIN, Sayedus; EHSAN, Mohammad Monjurul; KHAN, Basit; RAHMAN, Md. Hamidur. Synthesis, heat transport mechanisms and thermophysical properties of nanofluids: A critical overview. **International Journal of Thermofluids**, 10, 2021.

BANDARRA FILHO, Enio Pedone; MENDOZA, Oscar Saúl Hernandez; BEICKER, Carolina Lau Lins; MENEZES, Adonis; WEN, Dongsheng. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. **Energy Conversion and Management**, 84, p. 261–267, 2014.

BAZ, Khan; CHENG, Jinhua; XU, Deyi; ABBAS, Khizar; ALI, Imad; ALI, Hashmat; FANG, Chuandi. Asymmetric impact of fossil fuel and renewable energy consumption on economic growth: A nonlinear technique. **Energy**, 226 (2021) 120357.

BEICKER, Carolina L.L.; AMJAD, Muhammad; BANDARRA FILHO, Enio P.; WEN, Dongsheng. Experimental study of photothermal conversion using gold/water and MWCNT/water nanofluids. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, 88, p. 51–65, 2018.

CHAKRABORTY, Samarshi; PANIGRAHI, Pradipta Kumar. Stability of nanofluid: A review. **Applied Thermal Engineering**, 174, 2020.

CHAMSA-ARD, Wisut; BRUNDAVANAM, Sridevi; FUNG, Chun Che; FAWCETT, Derek; POINERN, Gerrard. Nanofluid Types, Their Synthesis, Properties and Incorporation in Direct Solar Thermal Collectors: A Review. **Nanomaterials**, 7, 13, 2017.

CHEN, Meijie; HE, Yurong; ZHU Jiaqi; WEN, Dongsheng. Investigating the collector efficiency of silver nanofluids based direct absorption solar collectors. **Applied Energy**, 181, p. 65–74, 2016.

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

DEHAJ, Mohammad Shafiey, MOHIABADI, Mostafa Zamani. Experimental investigation of heat pipe solar collector using MgO nanofluids. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 191, p. 91–99, 2019.

DEHAJ, Mohammad Shafiey; REZAEIAN, Mohsen; MOUSAVI, Davoud; SHAMSI, Sajjad; SALARMOFRAD, Masoud. Efficiency of the parabolic through solar collector using NiFe₂O₄/Water nanofluid and U-tube. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, 120, p.136-149, 2021.

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, 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, 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, 2021.

EMPRESA DE PESQUISA ENERGÉTICA – EPE, **Atlas da Eficiência Energética Brasil/2021 - Relatório de indicadores**, Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/atlas-da-eficiencia-energetica-brasil-2021>>, acesso em 12 de abril de 2022.

FAIZAL M., SAIDUR R., MEKHILEF S., ALIM M. A.. Energy, economic and environmental analysis of metal oxides nanofluid for flat-plate solar collector. *Energy Conversion and Management*, 76, p. 162–168, 2013.

FARAJZADEH, Ehsan; MOVAHED, Saeid; HOSSEINI, Reza. Experimental and numerical investigations on the effect of Al₂O₃ / TiO₂ - H₂O nanofluids on thermal efficiency of the flat plate solar collector. *Renewable Energy*, 118, p. 122-130, 2018.

FARHANA, K.; KADIRGAMA, K.; MOHAMMED, Hussein A.; RAMASAMY, D.; SAMYKANO, M.; SAIDUR R. Analysis of efficiency enhancement of flat plate solar collector using crystal nano-cellulose (CNC) nanofluids. *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, 45, 2021.

FARHANA, K.; KADIRGAMA, K.; RAHMAN, M.M.; RAMASAMY, D. ; NOOR, M.M.; NAJAFI, G.; SAMYKANO, M. ; MAHAMUDE, A.S.F.. Improvement in the performance of solar collectors with nanofluids - A state-of-the-art review. *Nano-Structures & Nano-Objects*, 18, 2019.

GHASEMI, Seyed Ebrahim; RANJBAR, Ali Akbar. Thermal performance analysis of solar parabolic trough collector using nanofluid as working fluid: A CFD modelling study. **Journal of Molecular Liquids**, 222, p. 159–166, 2016.

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 $Ti_3C_2/[BMIM]BF_4$ nanofluids based direct absorption solar collector. **Solar Energy Materials & Solar Cells**, 237, 2022.

GUPTA, Hemant Kumar; AGRAWAL, Ghanshyam Das; MATHUR, Jyotirmay. An experimental investigation of a low temperature $Al_2O_3-H_2O$ nanofluid based direct absorption solar collector. **Solar Energy**, 118, p.390–396, 2015.

GUPTA, Munish; SINGH, Vinay; KUMAR, Satish; KUMAR, Sandeep; DILBAGHI, Neeraj; SAID, Zafar. Up to date review on the synthesis and thermophysical properties of hybrid nanofluidos. **Journal of Cleaner Production**, 190, p. 169-192, 2018.

GUPTA, Sanjeev Kumar; DIXIT, Sangam. Progress and application of nanofluids in solar collectors: An overview of recent advances. **Materials Today: Proceedings**, 44, p. 250–259, 2021.

HAM, Jeonggyun; SHIN, Yunchan; CHO, Honghyun. Comparison of thermal performance between a surface and a volumetric absorption solar collector using water and Fe_3O_4 nanofluid. **Energy**, 239, 2022.

HE, Qinbo; WANG, Shuangfeng; ZENG Shequan; ZHENG Zhaozhi. Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems. **Energy Conversion and Management**, 73, p. 150–157, 2013.

HE, Qinbo; ZENG, Shequan; WANG, Shuangfeng. Experimental investigation on the efficiency of flat-plate solar collectors with nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, 88, p. 165-171, 2015.

HOSSEINI, Seyed Mohammad Sadegh; DEHAJ, Mohammad Shafiey. An experimental study on energetic performance evaluation of a parabolic trough solar collector operating with Al_2O_3 /water and GO/water nanofluidos. **Energy**, 234, 2021.

HUSSEIN, Omar A.; HABIB, Khairul; MUHSAN, Ali S.; SAIDUR, R.; ALAWI, Omer A.; IBRAHIM, Thamir K.. Thermal performance enhancement of a flat plate solar collector using hybrid nanofluid. **Solar Energy**, 204, p. 208–222, 2020.

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.

JOSEPH, Albin; SREEKUMAR, Sreehari; THOMAS, Shijo. Energy and exergy analysis of SiO₂/Ag-CuO plasmonic nanofluid on direct absorption parabolic solar collector. **Renewable Energy**, 162, p. 1655-1664, 2020.

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.

KALOGIROU, S.A., Solar thermal collectors and applications, **Progress in Energy and Combustion Science**, 30, p. 231-295, 2004.

KASAEIAN, Alibakhsh; DANESHAZARIAN, Reza; REZAEI, Roya; POURFAYAZ, Fathollah; KASAEIAN, Ghasem. Experimental investigation on the thermal behavior of nanofluid direct absorption in a trough collector. **Journal of Cleaner Production**, 158, p. 276-284, 2017.

KAYA, Hüseyin; ALKASEM, Mohanad; ARSLAN, Kamil. Effect of nanoparticle shape of Al₂O₃/Pure Water nanofluid on evacuated U-Tube solar collector efficiency. **Renewable Energy**, 162, p. 267-284, 2020.

KAYA, Hüseyin; ARSLAN, Arslan; ELTUGRAL, Nurettin. Experimental investigation of thermal performance of an evacuated U-Tube solar collector with ZnO/Ethylene glycol-pure water nanofluids. **Renewable Energy**, 122, p. 329-338, 2018.

KIM, Hyeongmin; KIM, Jinhyun; CHO, Honghyun. Experimental study on performance improvement of U-tube solar collector depending on nanoparticle size and concentration of Al₂O₃ nanofluid. **Energy**, 118, p.1304-1312, 2017.

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., IZADKHAJAST, 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**, 127, 2021.

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.

MEIBODI, Saleh Salavati; KIANIFAR, Ali; NIAZMAND, Hamid; MAHIAN, Omid; WONGWISES, Somchai. Experimental investigation on the thermal efficiency and performance characteristics of a flat plate solar collector using SiO₂/EG– water nanofluids. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, 65, p. 71–75, 2015.

MENBARI, Amir; ALEMRAJABI, Ali Akbar; REZAEI, Amin. Heat transfer analysis and the effect of CuO/Water nanofluid on direct absorption concentrating solar collector. **Applied Thermal Engineering**, 104, p.176–183, 2016.

MOGHADA, Ali Jabari; FARZANE-GORD, Mahmood; SAJADI, Mahmood; HOSEYN-ZADEH Monireh. Effects of CuO/water nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 58, p. 9–14, 2014.

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 TiO₂-water nanofluids. **Sustainable Energy Technologies and Assessments**, 40, 2020.

MUKHERJEE, Sayantan; PARIA, Somjit. Preparation and Stability of Nanofluids-A Review. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, 9, n° 2, p. 63-69, 2013.

NATIVIDADE, Pablo Sampaio Gomes; MOURA, Gabriel de Moraes Moura; 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.

NOGHREHABADI, Aminreza; HAJIDAVALLOO, Ebrahim; MORAVEJ, Mojtaba. Experimental investigation of efficiency of square flat-plate solar collector using SiO₂/water nanofluid. **Case Studies in Thermal Engineering**, 8, p. 378–386, 2016.

ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS – ONU, **Sobre o nosso trabalho para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável no Brasil**, Disponível em < <https://brasil.un.org/pt-br/sdgs>>, acesso 09 de abril de 2022.

PEREIRA, Enio Bueno; MARTISN, Fernando Ramos; GONÇALVES, André Rodrigues; COSTA, Rodrigo Santos; LIMA, Francisco J. Lopes de; RÜTHER, Ricardo; ABREU, Samuel Luna de; TIEPOLO, Gerson Máximo; PEREIRA, Silvia Vitorino; SOUZA, Jefferson Gonçalves de.. **Atlas brasileiro de energia solar**, 2 ed., São José dos Campos : Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2017.

RAJPUT, Nitesh Singh; SHUKLA, Dipesh Dilipbhai; RAJPUT, Deep; SHARM, Shiv Kumar. Performance Analysis of Flat Plate Solar Collector using Al₂O₃/Distilled Water Nanofluid: An Experimental Investigation. **Materials Today: Proceedings**, 10, p. 52–59, 2019.

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.

SAHIN, A. Z.; UDDIN, M. A.; YILBAS, B. S.; AL-SHARAFI, A.. Performance enhancement of solar energy systems using nanofluids: An updated review. **Renewable Energy**, 145, p. 1126-1148, 2020.

SAID, Z., SABIHA, M.A., SAIDUR, R., HEPBASLI, A., RAHIM, N.A., MEKHILEF, S., WARD, T.A. Performance enhancement of a Flat Plate Solar collector using Titanium dioxide

nanofluid and Polyethylene Glycol dispersant. **Journal of Cleaner Production**, 92, p. 343-353, 2015.

SARAFRAZ, M.M.; SAFAEI, Mohammad Reza. Diurnal thermal evaluation of an evacuated tube solar collector (ETSC) charged with graphene nanoplatelets-methanol nano-suspension. **Renewable Energy**, 142, p.364-372, 2019.

SCIENCE DIRECT. Results. Find articles with these terms: nanofluids+solar. Disponível em: <<https://www.sciencedirect.com/search?q=nanofluids%2Bsolar>> Acesso em 25 de janeiro de 2023.

SEZER, Nurettin; ATIEH, Muataz A.; KOÇ, Muammer. A comprehensive review on synthesis, stability, thermophysical properties, and characterization of nanofluids. **Powder Technology**, 344, p. 404–431, 2019.

SHAHBAZ, Muhammad; TOPCU, Betül Altay; SARIGÜL, Sevgi Sümerli; VO, Xuan Vinh. The effect of financial development on renewable energy demand: The case of developing countries. **Renewable Energy**, 178, p.1370-1380, 2021.

SHAFIULLAH, Muhammad; MIAH, Mohammad Dulal; ALAM, Md Samsul; ATIF, Muhammad;. Does economic policy uncertainty affect renewable energy consumption? **Renewable Energy**, 179, p. 1500-1521, 2021.

SHARAFELDIN, Mahmoud Ahmed; GROF, Gyula; MAHIAN, Omid. Experimental study on the performance of a flat-plate collector using WO₃/Water nanofluids. **Energy**, 141, p. 2436-2444, 2017.

SHARAFELDIN, M.A.; GRÓF, Gyula. Evacuated tube solar collector performance using CeO₂/water nanofluid. **Journal of Cleaner Production**, 185, p. 347-356, 2018.

SHARAFELDIN, M.A.; GRÓF, Gyula. Efficiency of evacuated tube solar collector using WO₃/Water nanofluid. **Renewable Energy**, 134, p. 453-460, 2019.

SIQUEIRA, Antonio Marcos de Oliveira. Desenvolvimento de um programa de simulação computacional de sistemas de aquecimento solar para água. Tese de doutorado. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

SOLANGI, K.H.; ISLAM, M.R.; SAIDUR, R.; RAHIM, N.A.; FAYAZ, H.. A review on global solar energy policy. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, 15, p. 2149–2163, 2011.

STRUCHALIN, P.G.; YUNIN, V.S.; KUTSENKO, K.V.; NIKOLAEV, O.V.; VOLOGZHANNIKOVA, A.A.; SHEVELYOVA, M.P.; GORBACHEVA, O.S.; BALAKIN, B.V.. Performance of a tubular direct absorption solar collector with a carbon-based nanofluid. **International Journal of Heat and Mass Transfer**. 179, 2021.

SUNDAR, L. Syam; RAMANA, E. Venkata; SAID, Zafar; PUNNAIAH, V.; MOULI, Kotturu V.V. Chandra; SOUSA, Antonio C. M.. Properties, heat transfer, energy efficiency and environmental emissions analysis of flat plate solar collector using nanodiamond nanofluids. **Diamond & Related Materials**, 110, 2020.

TONG, Yijie; KIM, Jinhyun; CHO, Honghyun. 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, Al₂O₃ nanofluid, and CuO nanofluid. **Applied Thermal Engineering**, 159, 2019.

TONG, Yijie; CHI, Xiaoni; KANG, Woobin; CHO, Honghyun. Comparative investigation of efficiency sensitivity in a flat plate solar collector according to nanofluids. **Applied Thermal Engineering**, 174, 2020.

URMI, Wajiha Tasnim; RAHMAN, M.M., KADIRGAMA, K., RAMASAMY, D., MALEQUE, M.A.. An overview on synthesis, stability, opportunities and challenges of nanofluids. **Materials Today: Proceedings**, 41, p. 30–37, 2021.

VERMA, Sujit Kumar; TIWARI, Arun Kumar; CHAUHAN, Durg Singh. Performance augmentation in flat plate solar collector using MgO/water nanofluid. **Energy Conversion and Management**, 124, p. 607–617, 2016.

VERMA, Sujit Kumar; TIWARI, Arun Kumar; CHAUHAN, Durg Singh. Experimental evaluation of flat plate solar collector using nanofluids. **Energy Conversion and Management**, 134, p.103–115, 2017.

VERMA, Sujit Kumar; TIWARI, Arun Kumar; TIWARI, Sandeep; CHAUHAN, Durg Singh. Performance analysis of hybrid nanofluids in flat plate solar collector as an advanced working fluid. **Solar Energy**, 167, p. 231–241, 2018.

VINCELY, D. Anin, 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, Hao; LI, Xiaoke; LUO, Boqiu; WEI, Ke; ZENG, Guangyong. The MXene/water nanofluids with high stability and photo-thermal conversion for direct absorption solar collectors: A comparative study. **Energy**, 227, 2021.

YU, Fan; CHEN, Yingying; LIANG, Xingbo; XU, Jiale; LEE, Chiahsun, LIANG, Qi; TAO, Peng; DENG, Tao. Dispersion stability of thermal nanofluids. **Progress in Natural Science: Materials International**, 27, p. 531–542, 2017.

YOUSEFI, T., SHOJAEIZADEH, E., VEYSI, F., ZINADINI, S.. An experimental investigation on the effect of pH variation of MWCNT–H₂O nanofluid on the efficiency of a flat-plate solar collector. **Solar Energy**, 86, p. 771–779, 2012 a.

YOUSEFI, Tooraj; VEYSI, Farzad; SHOJAEIZADEH, Ehsan, ZINADINI, Sirius. An experimental investigation on the effect of MWCNT-H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. **Experimental Thermal and Fluid Science**, 39, p. 207–212, 2012 b.

YOUSEFI, Tooraj; VEYSI, Farzad; SHOJAEIZADEH, Ehsan, ZINADINI, Sirius. An experimental investigation on the effect of Al₂O₃ e H₂O nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. **Renewable Energy**, 39, p. 293-298, 2012.c

ZAMZAMIAN, Amirhossein; RAD, Mansoor Keyanpour; NAYESTANI, Maryam Kiani; JAMAL-ABAD, Milad Tajik. An experimental study on the effect of Cu-synthesized/EG nanofluid on the efficiency of flat-plate solar collectors. **Renewable Energy**, 71, p. 658-664, 2014.

ZHANG, Hao; QING, Shan; ZHAI, Yuling; ZHANG, Xiaohui; ZHANG, Aimin Zhang. The changes induced by pH in TiO₂/water nanofluids: Stability, thermophysical properties and thermal performance. **Powder Technology**, 377, p. 748–759, 2021.

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

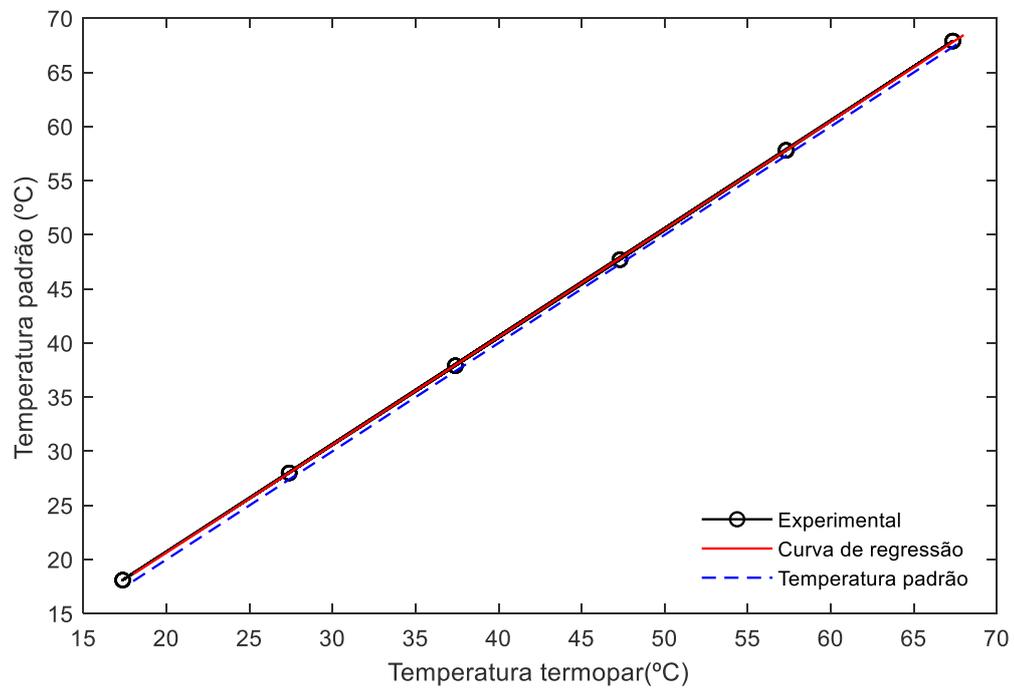
APÊNDICE A – Curvas de calibração dos termopares

Figura A. 1. Curva de calibração termopar 0

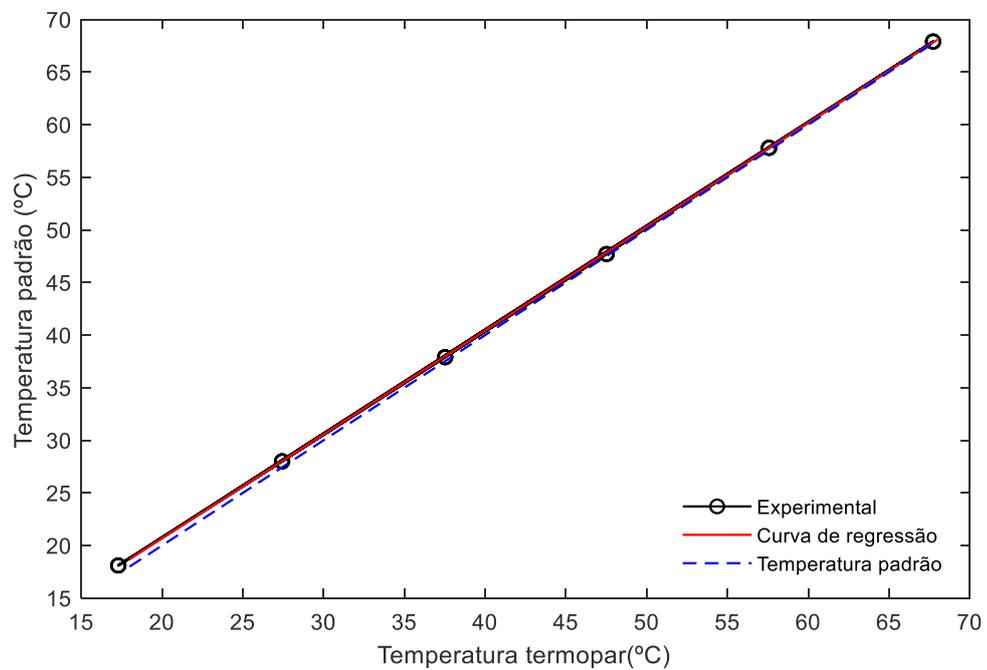


Figura A. 2. Curva de calibração termopar 1

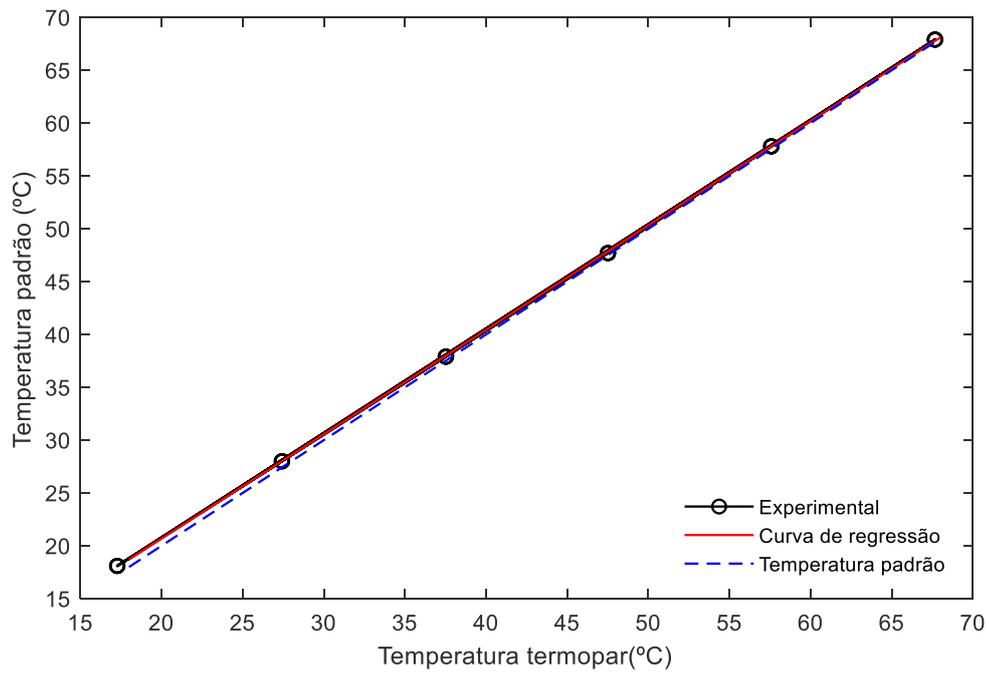


Figura A. 3. Curva de calibração termopar 2

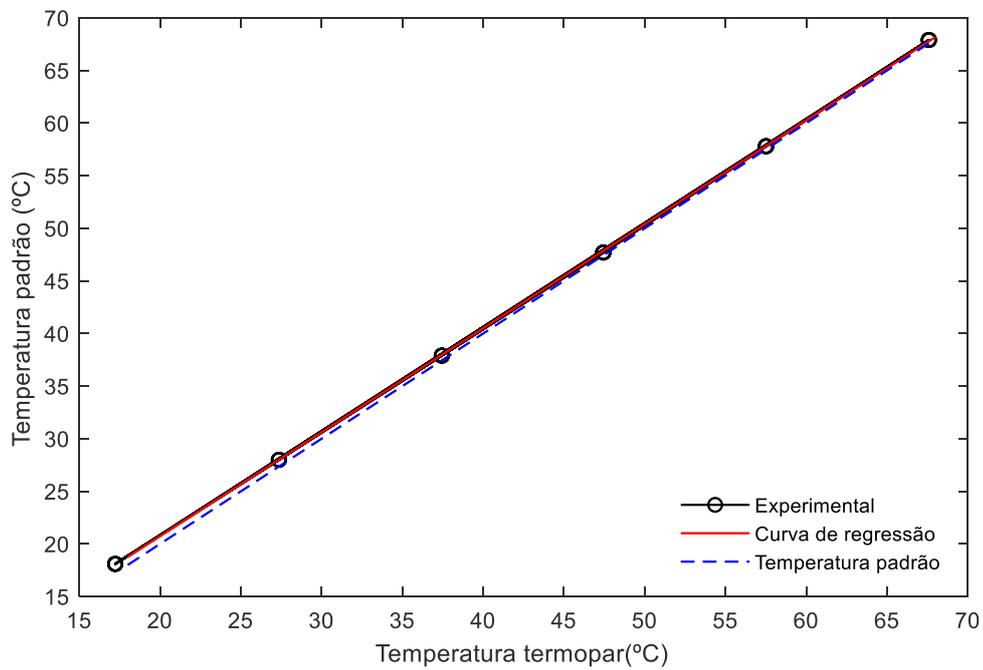


Figura A. 4. Curva de calibração termopar 3

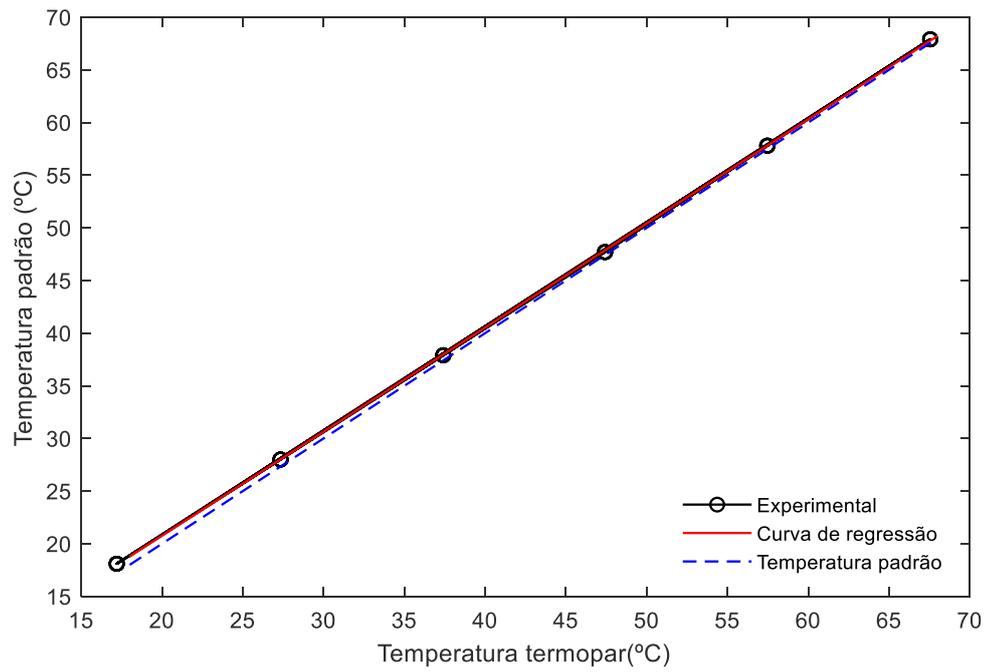


Figura A. 5. Curva de calibração termopar 4

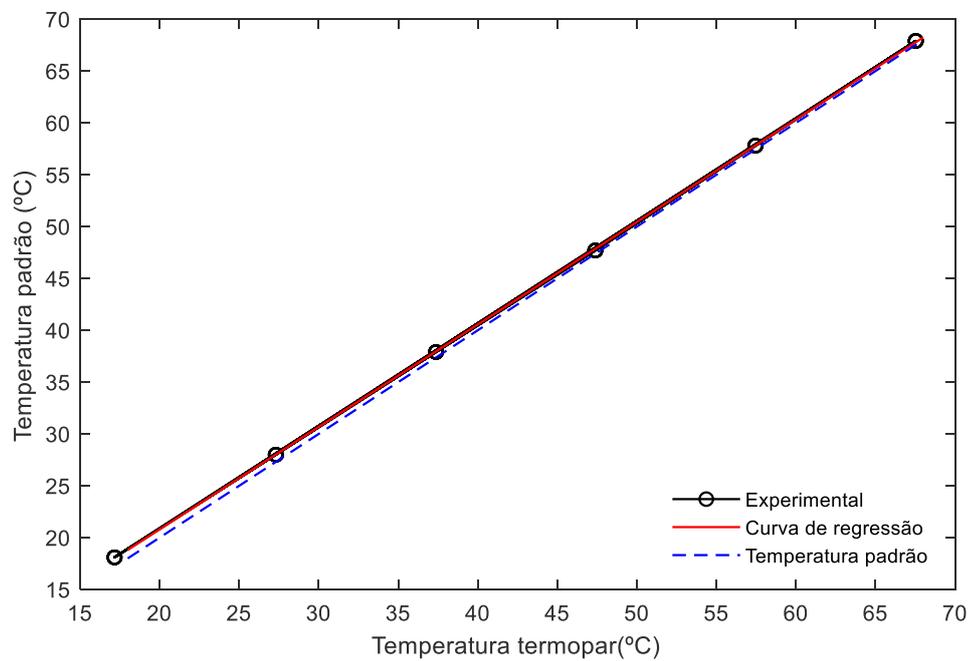


Figura A. 6. Curva de calibração termopar 5

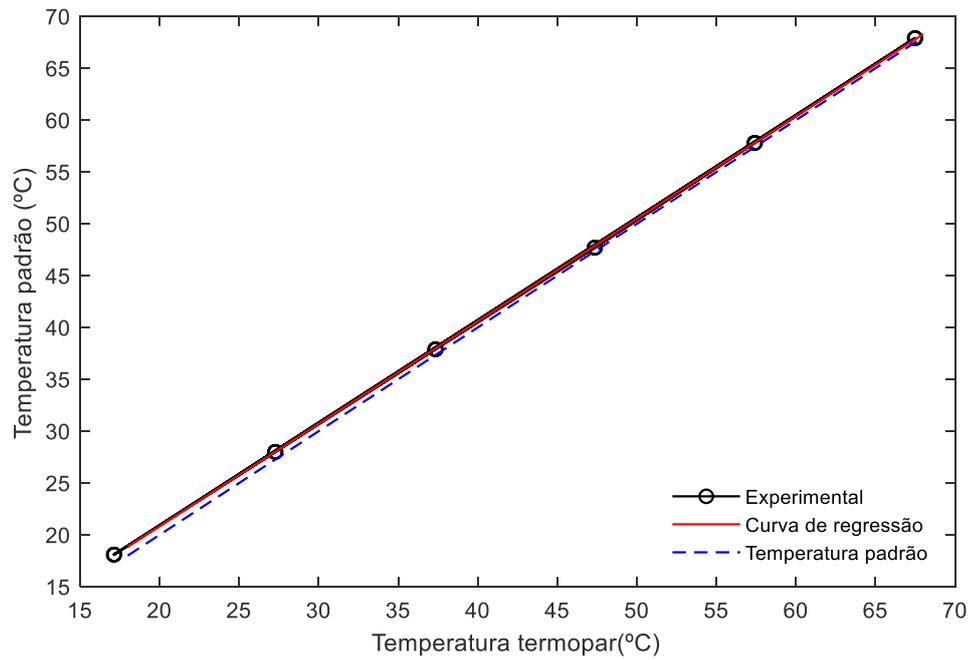


Figura A. 7. Curva de calibração termopar 6

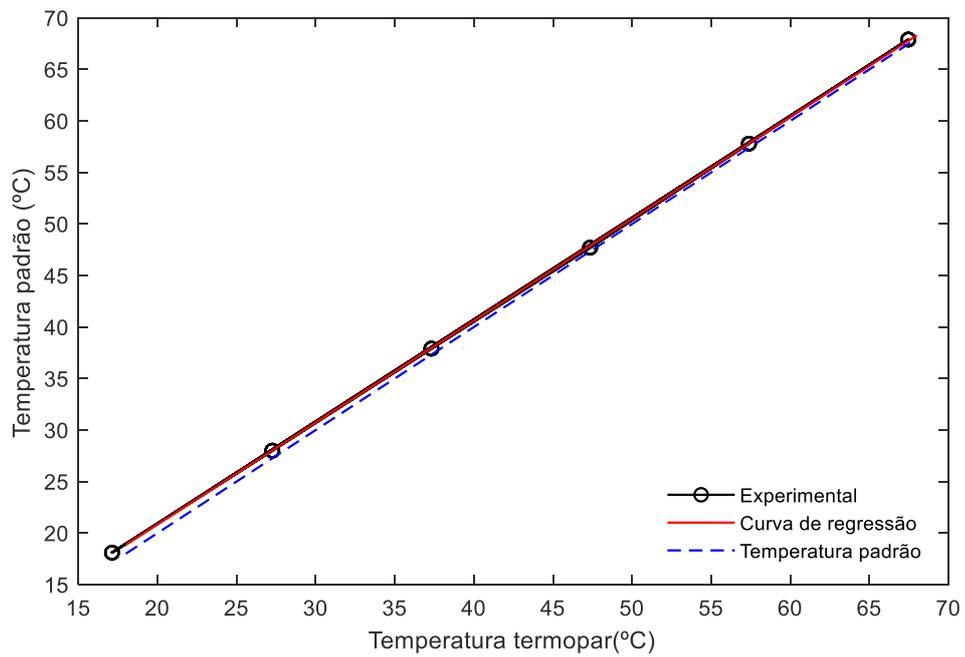


Figura A. 8. Curva de calibração termopar 7

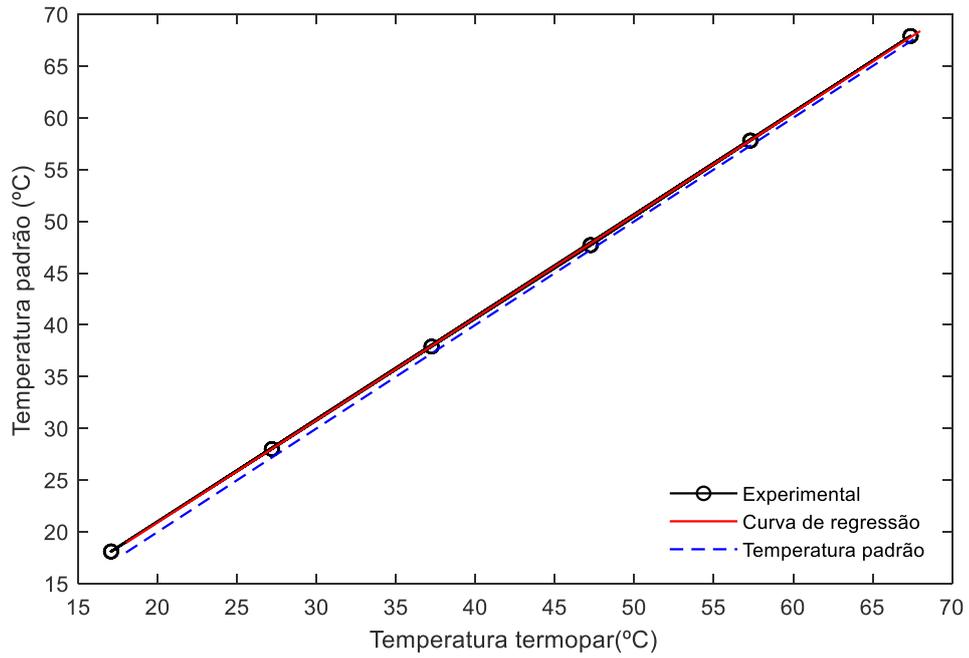


Figura A. 9. Curva de calibração termopar 8

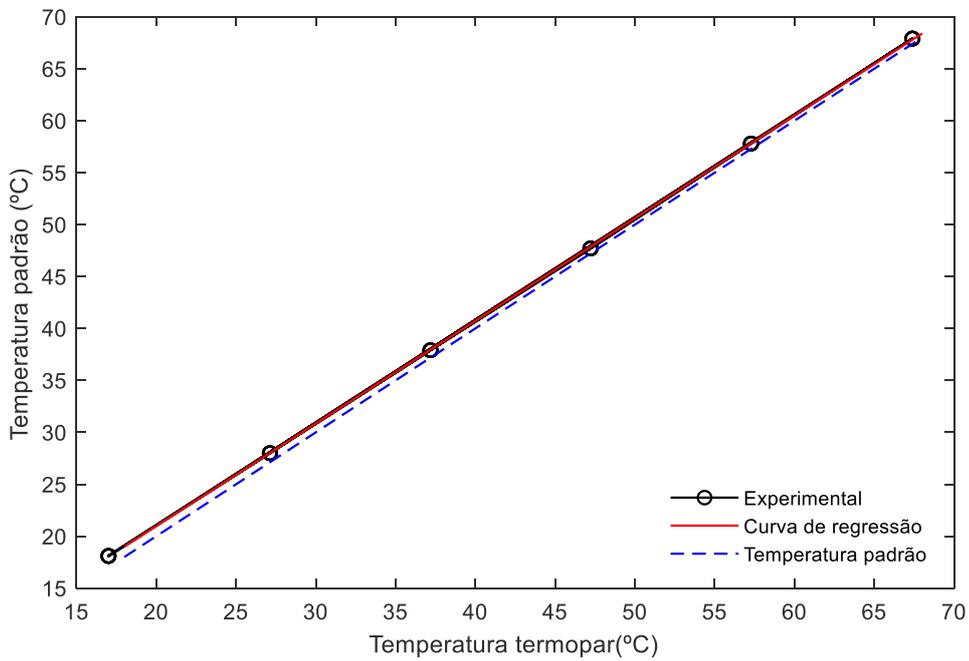


Figura A. 10. Curva de calibração termopar 9

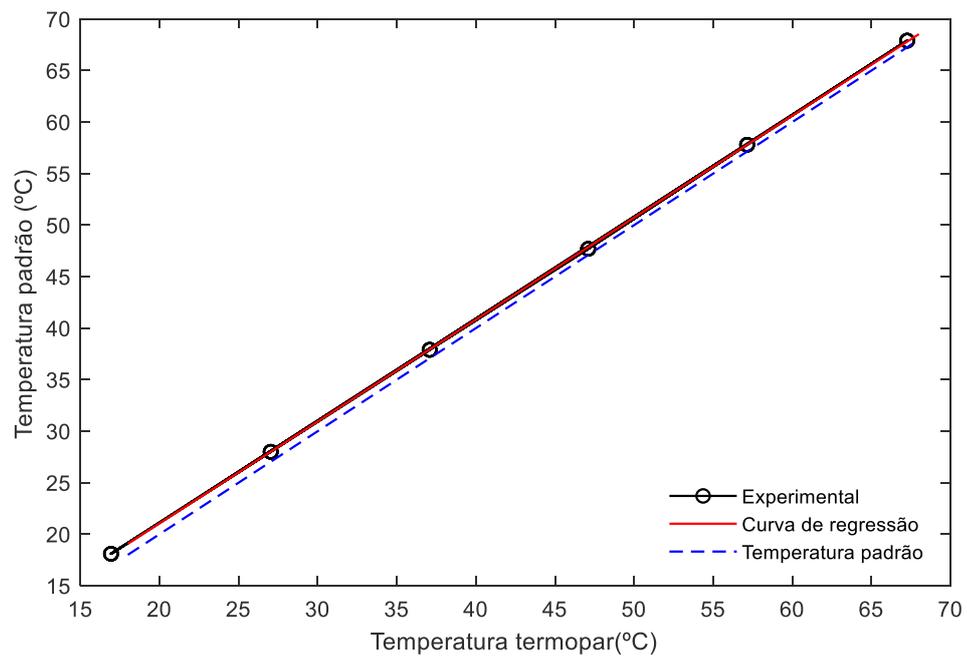


Figura A. 11. Curva de calibração termopar 10

APÊNDICE B – Procedimento para o cálculo da incerteza de medição

O processo de determinação da incerteza foi feito de acordo com o método descrito no Guia para a expressão de incerteza de medição - GUM 2008, (INMETRO, 2012). De acordo com o resultado de uma medição, após correção dos efeitos sistemáticos reconhecidos, é uma estimativa do valor do mensurando oriunda da incerteza proveniente dos efeitos aleatórios e da correção imperfeita do resultado para efeitos sistemáticos, de maneira que o resultado de uma medição é completo apenas quando acompanhado pela declaração da incerteza dessa estimativa.

A incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é a raiz quadrada positiva da variância combinada, $u_c^2(y)$, que é dada por:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \right)^2 u^2(x_i) \quad (B.1)$$

Onde f é a função relacionada ao mensurando e cada $u(x_i)$ é uma incerteza-padrão associada as variáveis que podem afetar o resultado da medição do mensurando. Dessa forma, como descrito em (INMETRO, 2012), a incerteza-padrão combinada $u_c(y)$ é um desvio-padrão estimado e caracteriza a dispersão dos valores que poderiam, razoavelmente, ser atribuídos ao mensurando, assim a equação (B.1) baseada numa aproximação de primeira ordem da série de Taylor é denominado lei de propagação de incertezas. Alguns destes componentes podem ser estimados com base na distribuição estatística dos resultados de séries de medições e podem ser caracterizados por desvios-padrão experimentais, enquanto outros componentes são avaliados por meio de distribuições de probabilidade supostas, baseadas na experiência ou em outras informações.

Assim, a incerteza-padrão associada pode ser determinada por meio de uma avaliação do Tipo A ou B. Na avaliação do tipo A, a incerteza é estimada estatisticamente, a partir de uma série de observações do mensurando, e na avaliação do tipo B, quando não é possível usar procedimentos estatísticos, a incerteza-padrão $u(x_i)$ é avaliada por julgamento científico baseado nas informações disponíveis como: dados de medições prévias, experiência ou conhecimento geral do comportamento e das propriedades de materiais e instrumentos relevantes, especificações do fabricante, dados fornecidos em certificados de calibração e outros certificados, incertezas atribuídas a dados de referência extraídos de manuais.

As derivadas parciais, frequentemente denominadas coeficientes de sensibilidade (c), descrevem como a estimativa de saída y varia com alterações nos valores das estimativas de entrada x_1, x_2, \dots, x_N . Sendo sugerido que se escreva a equação (B.1) como:

$$u_c^2(y) = \sum_{i=1}^N [c_i u(x_i)]^2 = \sum_{i=1}^N u_i^2(y) \quad (B.2)$$

Onde para medições diretas, como no caso da temperatura e radiação nesse trabalho, tem-se $c = 1$. Foram consideradas as parcelas para a incerteza padrão associadas a variabilidade das medições, calibração e resolução finita do instrumento.

A incerteza expandida ($U(y)$) é obtida correlacionando o resultado da equação (B.2) por um fator de abrangência k . O cálculo da incerteza expandida é dado por:

$$U(y) = k \cdot u_c(y) \quad (B.3)$$

Neste trabalho, o fator de abrangência (k) utilizado foi o correspondente a uma probabilidade de 95,45% na distribuição t de student.

APÊNDICE C – Perfis de radiação, temperatura e eficiência dos demais dias de teste

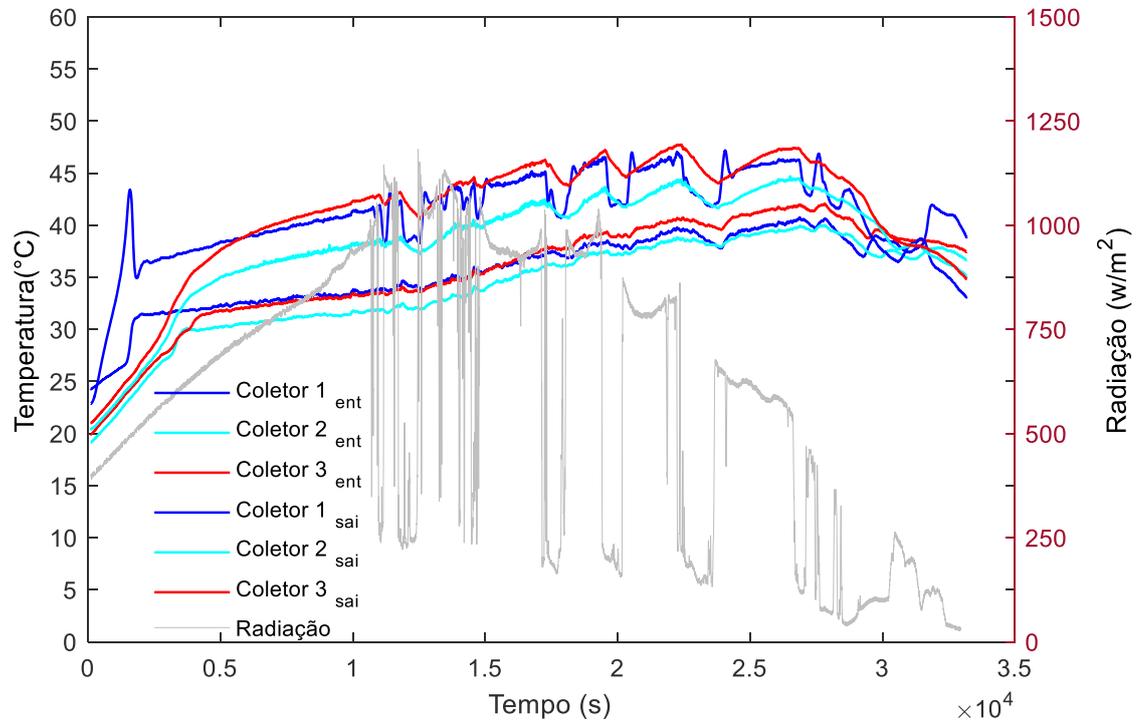


Figura C. 1. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 2: 25/08/22

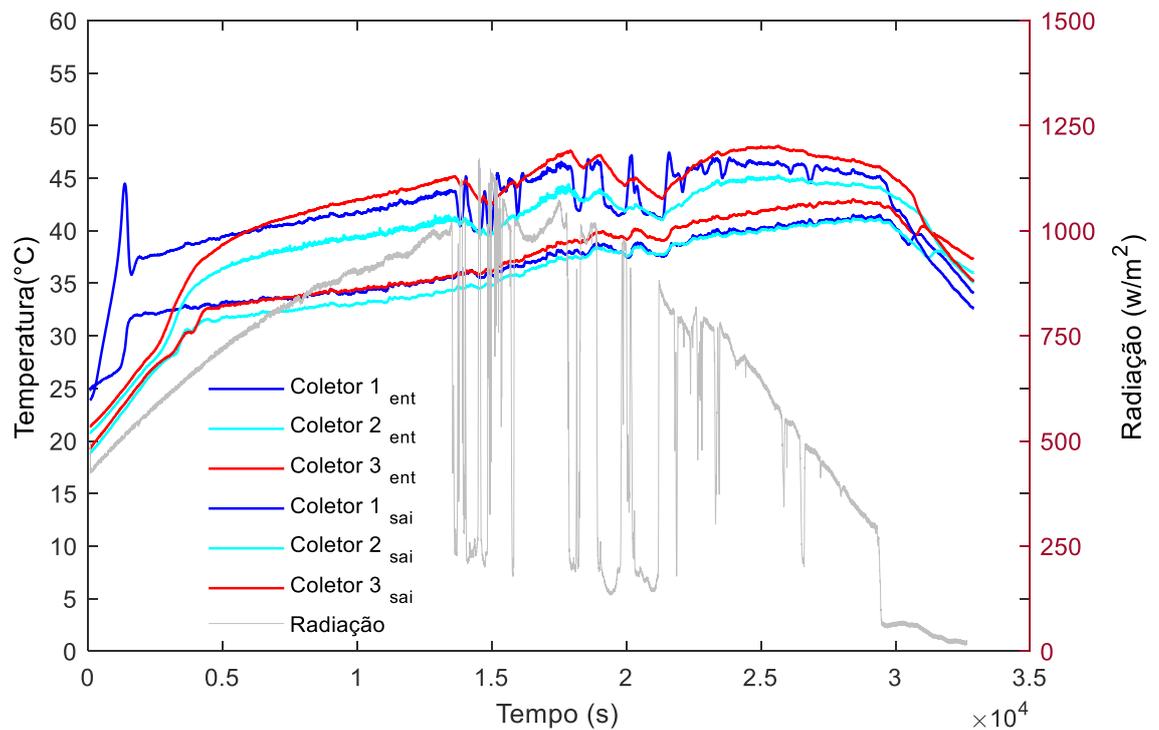


Figura C. 2. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 3: 26/08/22

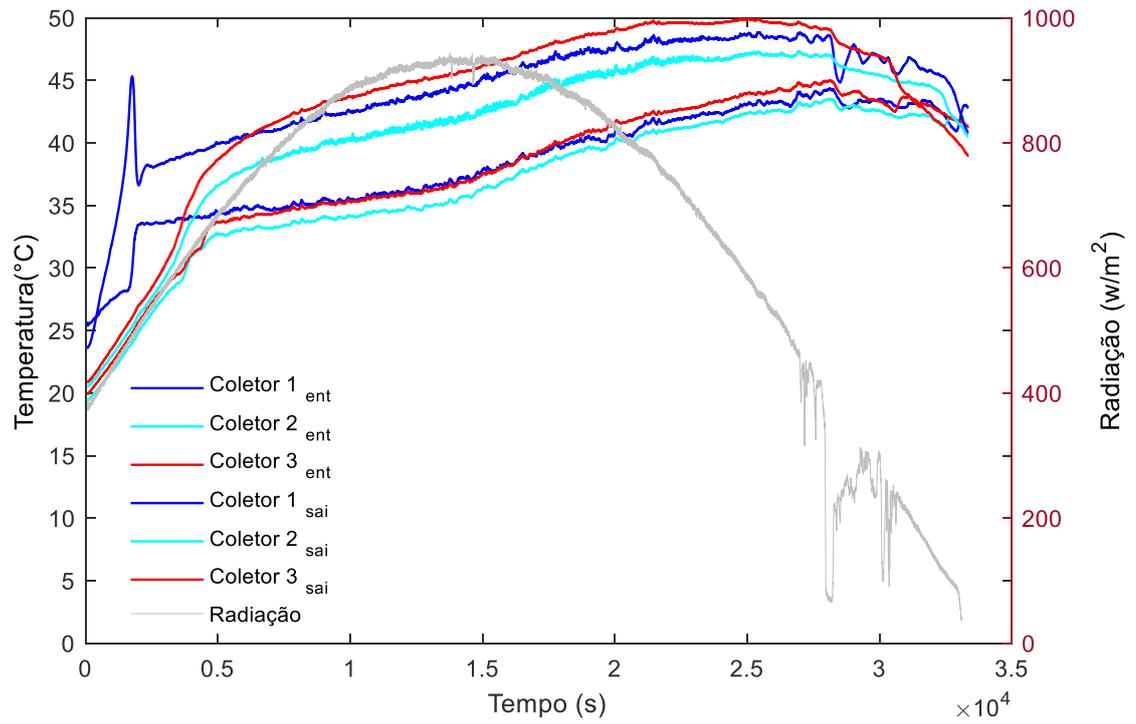


Figura C. 3. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 5 ppm – dia 4: 27/08/22

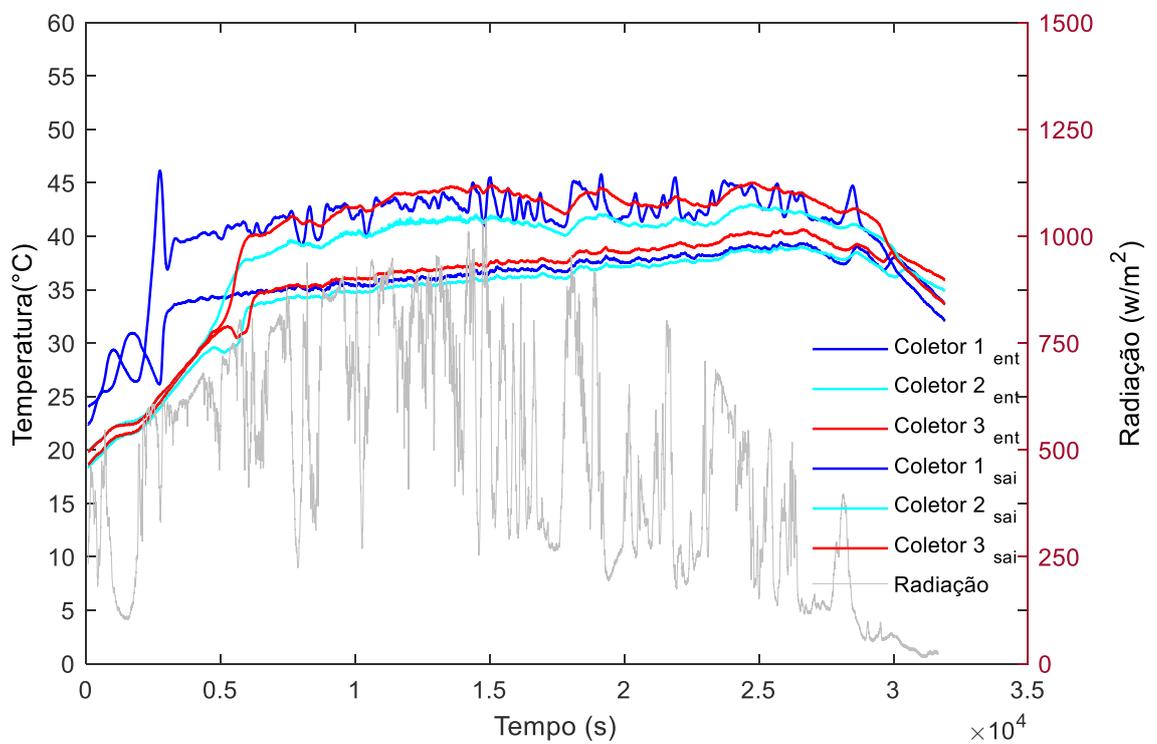


Figura C. 4. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 2: 30/08/22

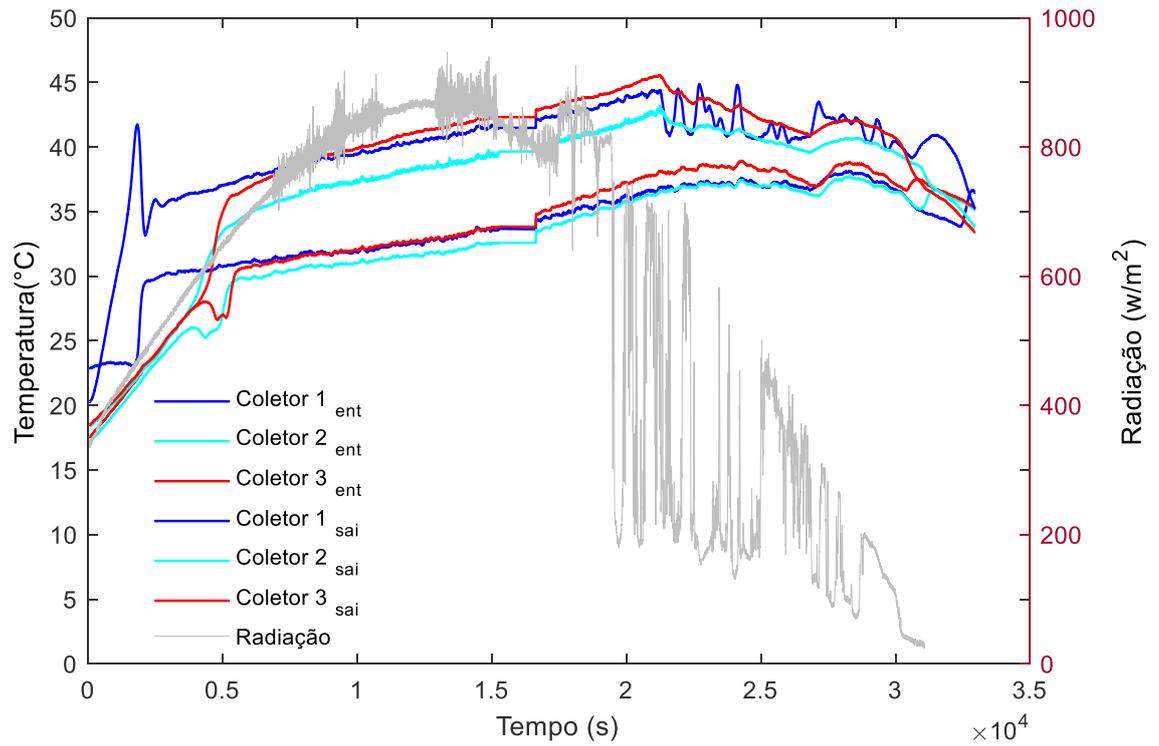


Figura C. 5. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 3: 31/08/22

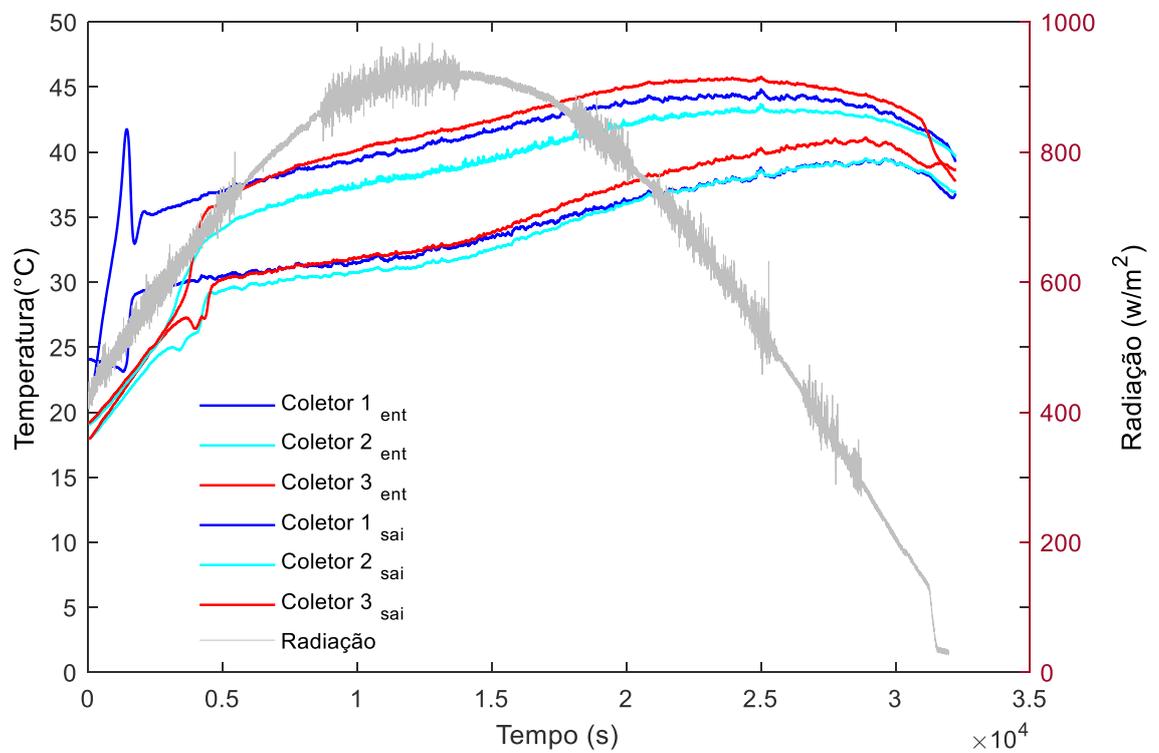


Figura C. 6. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 10 ppm – dia 4: 01/09/22

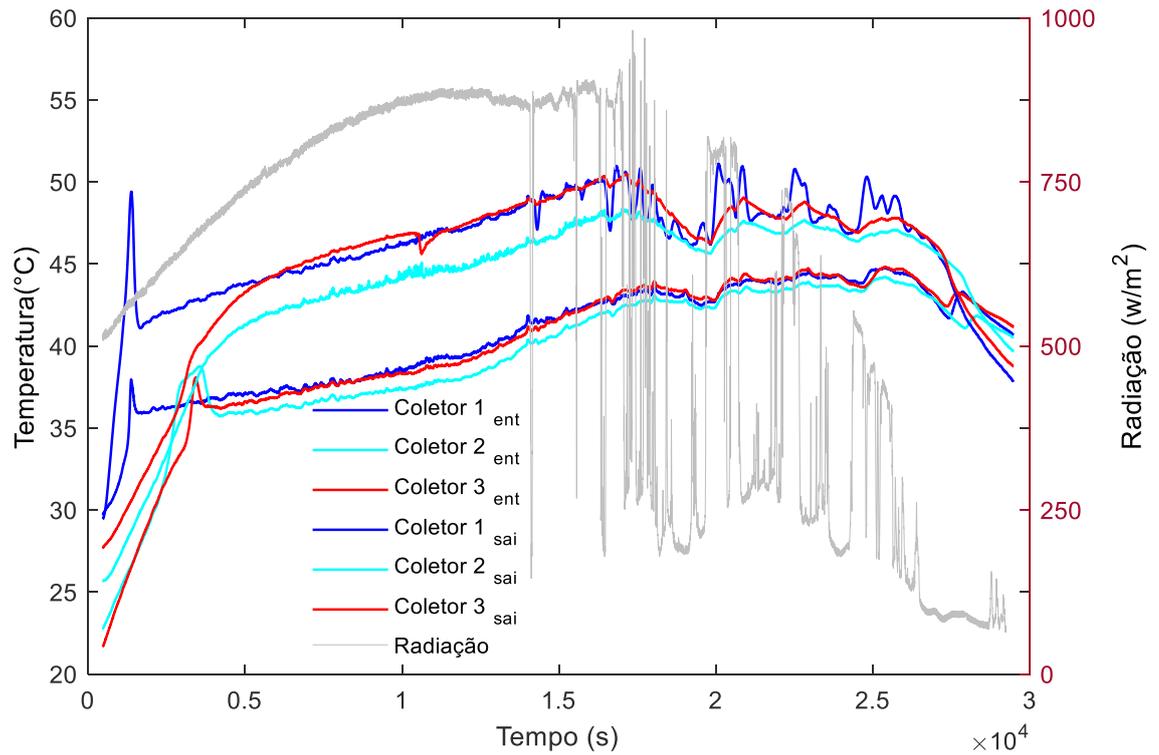


Figura C. 7. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 2: 04/09/22

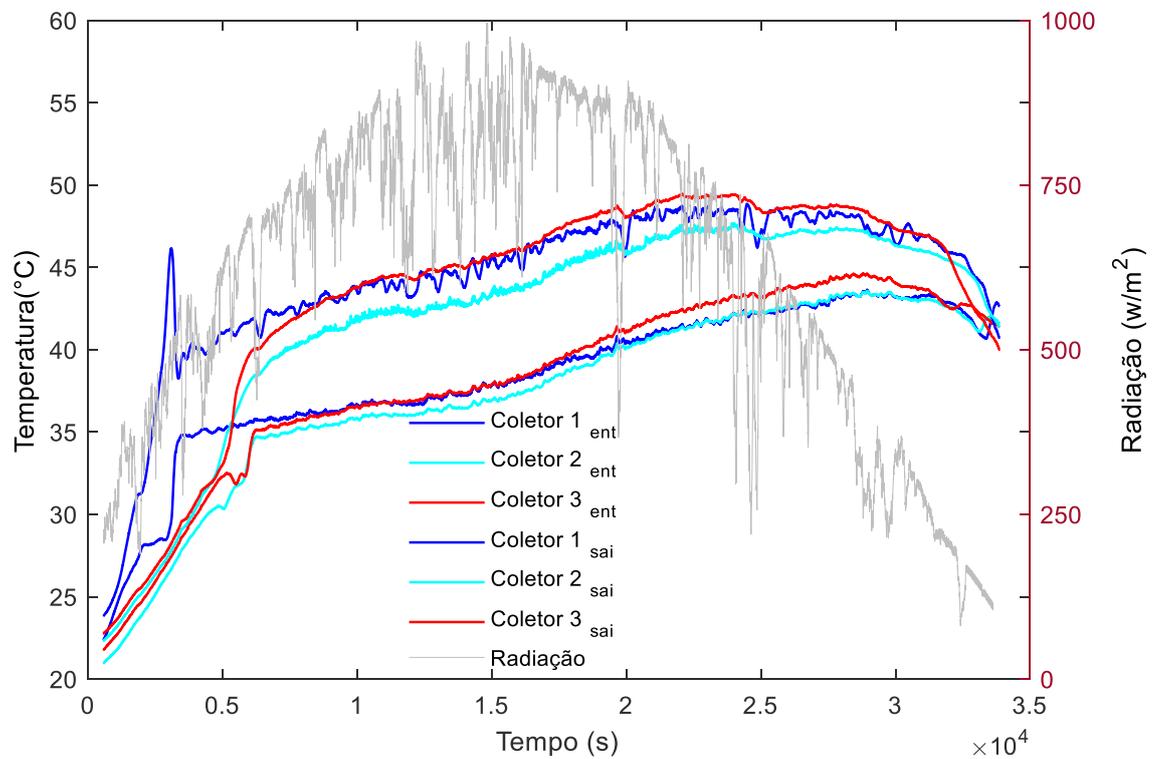


Figura C. 8. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 3: 05/09/22

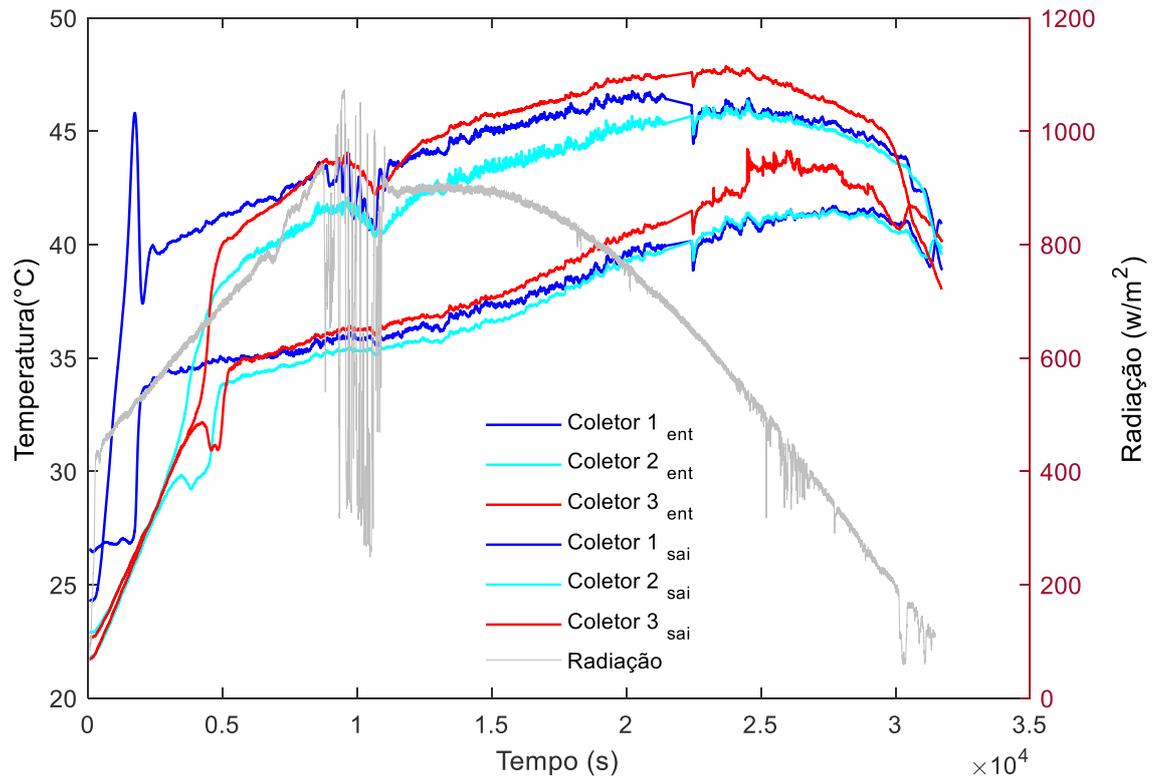


Figura C. 9. Perfis de temperatura e radiação do teste com nanofluido de 20 ppm – dia 4: 06/09/22

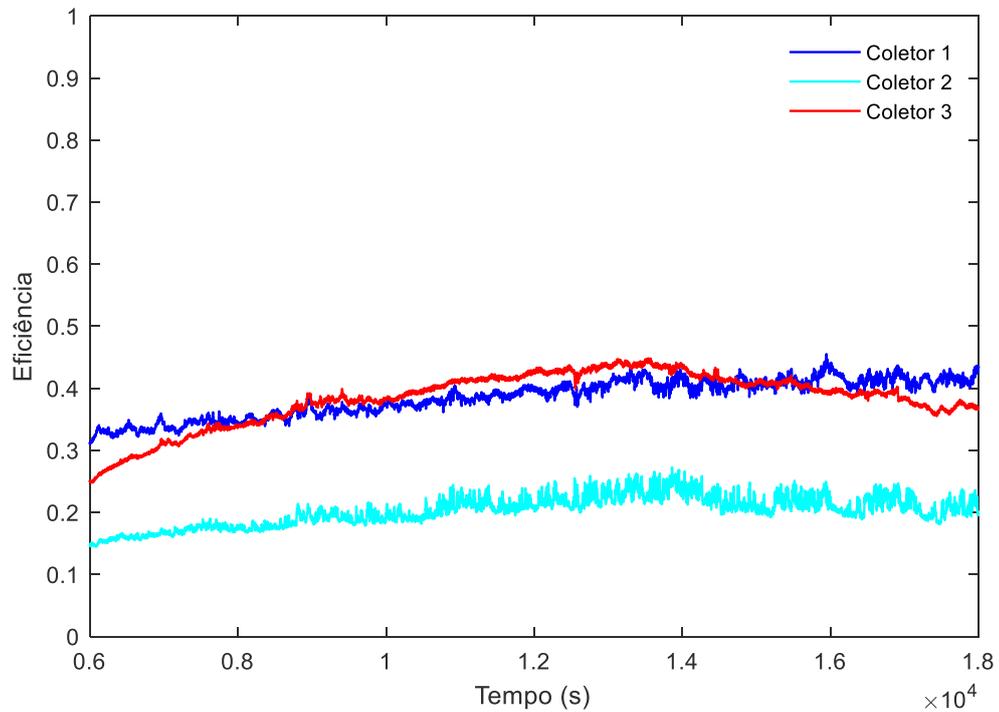


Figura C. 10. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 5 ppm – 28/08/22

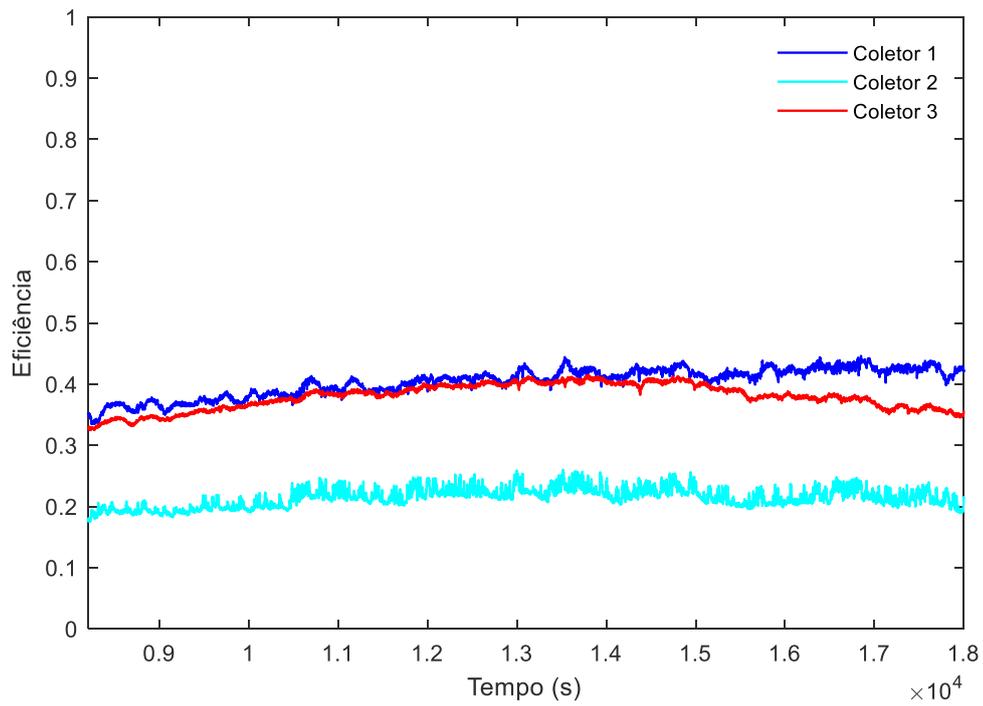


Figura C. 11. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 10 ppm - 29/08/22

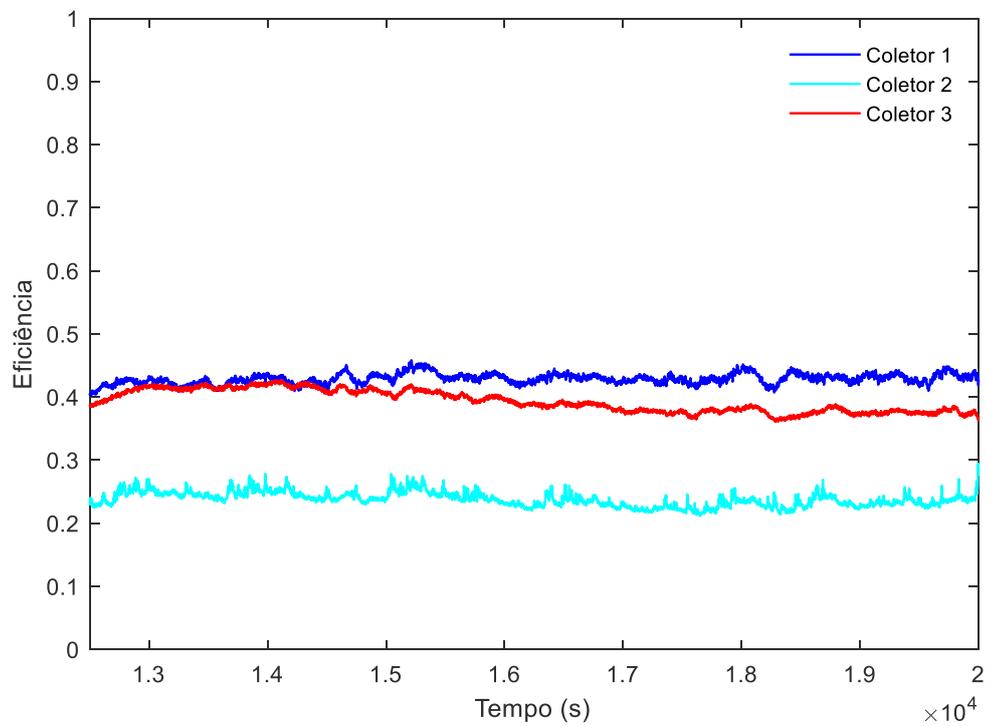


Figura C. 12. Eficiência térmica dos coletores na etapa com nanofluidos na concentração de 20 ppm - 03/09/22