



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

CLAYTON FERREIRA TELES

**ANÁLISE DE 1ª E 2ª LEIS DA TERMODINÂMICA EM “PAREDE SOLAR”
UTILIZANDO ÁGUA E NANOFLUIDO DE PRATA COMO FLUIDOS DE
TRABALHO**

FORTALEZA

2023

CLAYTON FERREIRA TELES

**ANÁLISE DE 1ª E 2ª LEIS DA TERMODINÂMICA EM “PAREDE SOLAR”
UTILIZANDO ÁGUA E NANOFLUIDO DE PRATA COMO FLUIDOS DE
TRABALHO**

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

Orientador: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha.

FORTALEZA

2023

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

- T272a Teles, Clayton Ferreira.
Análise de 1ª e 2ª leis da termodinâmica em "parede solar" utilizando água e nanofluido de prata como fluidos de trabalho / Clayton Ferreira Teles. – 2023.
47 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2023.
Orientação: Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha .
1. Energia solar. 2. Coletor Solar de Placa Plana. 3. Nanofluido. 4. Eficiência. I. Título.
CDD 620.1
-

CLAYTON FERREIRA TELES

**ANÁLISE DE 1ª E 2ª LEIS DA TERMODINÂMICA EM “PAREDE SOLAR”
UTILIZANDO ÁGUA E NANOFLUIDO DE PRATA COMO FLUIDOS DE
TRABALHO**

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

Aprovada em: 27/10/2023.

BANCA EXAMINADORA

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

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

Prof. Dr. Matheus Pereira Porto
Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

A Deus.
À minha esposa, você foi fundamental para
a realização desse trabalho.

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Ao Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha, pela orientação, apoio e aconselhamentos essenciais em momentos difíceis.

Ao Prof. Dr. Ricardo José Pontes Lima pela apresentação ao tema e contribuições para o desenvolvimento dos experimentos.

Aos meus pais.

À minha esposa, pelo apoio incondicional de sempre.

Aos amigos do mestrado e ao Valdi, que me auxiliaram em momentos diversos.

Aos professores participantes da banca examinadora, Prof. Dr. André Valente Bueno e Prof. Dr. Matheus Pereira Porto, pelo tempo dedicado a avaliação do trabalho e suas indispensáveis contribuições.

À Universidade Federal do Ceará e ao Departamento de Engenharia Mecânica pelo apoio e compreensão necessários nesse período.

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

“Não diga que a vitória está perdida se é de batalhas que se vive a vida.”
(Raul Seixas)

RESUMO

A tendência em um futuro próximo é que os combustíveis fósseis se tornem uma fonte de energia escassa com o passar dos anos, e uma alternativa para a geração de energia são as energias renováveis, que além de limpas são virtualmente inesgotáveis. Uma das principais fontes de energia renovável é a energia solar, e seu aproveitamento pode ser feito tanto na forma fotovoltaica como fototérmica. Esta última forma trata-se da utilização da energia térmica obtida a partir da coleta direta da energia solar. Para isso, coletores solares precisam ter eficiências cada vez melhores com o objetivo de melhor aproveitamento dessa energia. Um dos tipos de coletores solares é o coletor solar de placa plana de absorção direta, aqui denominado “Parede Solar”, uma vez que se encontra posicionado na vertical. Uma das maneiras de melhorar o desempenho de coletores solares de placa plana de absorção direta é o aperfeiçoamento nas propriedades do fluido de trabalho, e isso pode ser feito com a utilização de nanofluidos. Um nanofluido que vem se mostrando bastante eficiente é o nanofluido de prata. No presente trabalho foi avaliado o desempenho de um coletor solar de placa plana de absorção direta através da comparação da eficiência de 1ª e 2ª leis da termodinâmica utilizando água e nanofluido de prata como fluidos de trabalho. Para isso foi definida a “Parede Solar” como volume de controle com entrada de fluido com temperatura baixa e saída com temperatura elevada após a absorção da energia captada. Para a avaliação foi calculada a incidência solar, temperatura na “Parede Solar” e por fim, as eficiências de 1ª e 2ª leis da termodinâmica do aparato. Os resultados, com eficiências de 1ª lei com aumentos da ordem de 25% e com eficiências de 2ª lei acima de 0,6% se mostraram condizentes com eficiências de coletores térmicos de placa plana e também se mostram promissores com pontos de melhora e perspectivas de utilização de outros fluidos de trabalho.

Palavras-chave: energia solar; coletor solar de placa plana; nanofluido; eficiência.

ABSTRACT

The tendency in the near future is for fossil fuels to become a scarce source of energy as the years go by. An alternative for energy generation is renewable energy, which is not only clean but virtually inexhaustible. One of the primary sources of renewable energy is solar energy, which can be harnessed in both photovoltaic and solar thermal forms. The latter involves the use of thermal energy obtained directly from solar energy collection. To achieve this, solar collectors need to have ever-improving efficiencies to make better use of this energy. One type of solar collector is the flat plate solar collector with direct absorption, here referred to as the "Solar Wall," as it is positioned vertically. One way to enhance the performance of flat plate solar collectors with direct absorption is to improve the properties of the working fluid, which can be achieved by using nanofluids. A nanofluid that has proven to be quite efficient is silver nanofluid.

In this study, the performance of a flat plate solar collector with direct absorption was evaluated by comparing the first and second law efficiencies of thermodynamics using water and silver nanofluid as working fluids. The "Solar Wall" was defined as the control volume with low-temperature fluid inlet and high-temperature fluid outlet after absorbing the captured energy. The evaluation included the calculation of solar incidence, temperature at the "Solar Wall," and, finally, the first and second law efficiencies of the apparatus. The results, with first law efficiencies increasing by approximately 25% and second law efficiencies exceeding 0.6%, are consistent with the efficiencies of flat plate thermal collectors. They also show promise for further improvement and the potential use of other working fluids.

Keywords: solar energy; flat plate solar collector; nanofluid; efficiency.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Tipos de coletores solares	20
Figura 2- Coletores solares de placa plana	21
Figura 3- Nanofluido atuando como fluido base de um coletor solar	23
Figura 4- (a) Movimento Browniano das Nanopartículas (NPs) e (b) A estrutura dos Nanofluidos (NFs) é composta por NPs, fluidos em grande quantidade e nanocamadas na interface entre o sólido e o fluido	25
Figura 5- Parâmetros que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos	28
Figura 6 - Parâmetros que afetam a viscosidade dos nanofluidos	28
Figura 7 - Mapeamento de alguns fluidos base e nanopartículas	29
Figura 8 - Métodos de síntese de nanopartículas	30
Figura 9 - Vantagens e desvantagens dos métodos de etapa única e de etapa dupla	31
Figura 10 - Dispositivo utilizado para preparação de nanofluido em uma etapa (EEW)....	32
Figura 11- Método de dois passos para a preparação do nanofluido.....	33
Figura 12- Desenho esquemático do aparato.....	35
Figura 13- Foto aparato em operação	36
Figura 14- Foto da bomba de deslocamento positivo	36
Figura 15 – Foto da bomba de deslocamento positivo	37
Figura 16- Resfriador (Chiller).....	37
Figura 17- Volume de controle considerado na “parede solar”	38

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1 - Radiação solar incidente	40
Gráfico 2 - Temperatura na "Parede Solar"	41
Gráfico 3 - Eficiência de 1ª Lei da termodinâmica	42
Gráfico 4 - Eficiência de 2ª Lei da termodinâmica	43

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Condutividade térmica de diferentes nanopartículas	25
Tabela 2- Propriedades termofísicas dos nanofluidos	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

STCs	Coletores Solares Térmicos
ETSCs	Coletores Solares Tubulares Evacuados
DASC	Coletor Solar de Absorção Direta
NPs	Nanopartículas
NFs	Nanofluidos

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	16
3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	17
3.1 Combustíveis fósseis e energias renováveis	17
3.2 Coletores solares	19
3.3 Coletor solar de placa plana	21
3.4 Nanofluidos	22
3.5 Propriedades termofísicas dos nanofluidos	24
3.5.1 Condutividade Térmica	24
3.5.2 Viscosidade do nanofluido	25
3.5.3 Densidade do nanofluido	26
3.5.4 Calor específico do nanofluido	26
3.5.5 Transferência de calor convectiva	26
3.6 Preparação dos nanofluidos	29
3.6.1 Método de um passo / uma etapa	31
3.6.2 Método de dois passos / duas etapas	33
3.7 Eficiência de 1ª e 2ª Leis da termodinâmica	34
4 MATERIAIS E MÉTODOS	35
4.1 Descrição do aparato	35
4.2 Descrição dos testes	38
4.3 Descrição dos cálculos	38
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO	40
5.1 Ângulo de Incidência e Radiação Solar Incidente	40
5.2 Temperatura na “parede solar”	41
5.3 Eficiência de 1ª Lei da termodinâmica	42
5.4 Eficiência de 2ª Lei da termodinâmica	43
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	44
REFERÊNCIAS	45

1 INTRODUÇÃO

A utilização de energia pela humanidade teve início durante a Revolução Industrial. O aumento exponencial no consumo energético desempenhou um papel fundamental no crescimento da economia global, impulsionando a produção em uma escala sem precedentes. À medida que a economia mundial continua a prosperar, a demanda por energia aumenta de forma constante. No entanto, é importante destacar que a grande maioria dessa demanda ainda é suprida pelos combustíveis fósseis. O uso extensivo de combustíveis fósseis acarreta em uma série de problemas significativos, que incluem a poluição do ar, a degradação ambiental e as mudanças climáticas. A partir da década de 1980, tornou-se cada vez mais evidente que a poluição ambiental estava se tornando um problema global premente. Como resposta, países de todo o mundo começaram a unir esforços para abordar e resolver essas questões ambientais (LIU *et al.*, 2023).

Uma resposta significativa para lidar com o desafio do aumento vertiginoso no consumo de energia reside no desenvolvimento contínuo de sistemas de energia solar inovadores. Uma estratégia eficaz é a melhoria do desempenho de produtos alimentados por energia solar em cenários operacionais específicos. Os sistemas de energia solar estão ganhando crescente popularidade devido à sua notável capacidade de gerar energia limpa e renovável. Entretanto, é inegável que a indústria da energia solar enfrenta diversos desafios que precisam ser superados, tais como os elevados custos de capital associados, a sua dependência das condições ambientais e as complexidades envolvidas na operação e manutenção (KHARE; CHATURVEDI; MISHRA, 2023).

Desde que a energia solar foi identificada como a fonte de energia renovável mais desejável, maximizar a captação de energia solar com o mínimo de desperdício continua sendo um desafio significativo. Inúmeras tecnologias foram desenvolvidas para converter a radiação solar em energia térmica (por meio de coletores térmicos) ou em energia elétrica (utilizando painéis solares). No entanto, o alto custo de instalação e a eficiência de conversão ainda são obstáculos a serem superados. Os coletores solares são dispositivos concebidos para captar e converter a irradiação solar em energia térmica por meio de um fluido de transferência de calor, conhecido como fluido de trabalho. Eles, muitas vezes, envolvem custos iniciais substanciais e enfrentam desafios relacionados à eficiência (HAMZAT *et al.*, 2022).

Coletores solares de placas planas podem ser descritos como dispositivos de transferência de calor que aproveitam a radiação solar global, incluindo a luz direta e

difusa, para aquecer um fluido, geralmente a temperaturas moderadas, abaixo de 373 K (100 °C). Suas aplicações primárias incluem o aquecimento de água, o suporte ao sistema de ar-condicionado e a facilitação dos processos de secagem em aplicações tanto agrícolas quanto industriais. Entre os aquecedores solares de ar disponíveis, os coletores planos se destacam como uma das configurações mais econômicas, de fácil instalação e manutenção (HANS; LEONARDO, 2013).

Nas últimas décadas, têm sido propostos diversos mecanismos para otimizar a transferência de calor em dispositivos de captação de energia solar. Os fluidos de transferência de calor, como água ou óleo, desempenham um papel crucial na captação eficiente de energia solar. São utilizados principalmente para transportar grandes quantidades de calor a partir dos dispositivos de coleta solar e são esperadas características específicas, como alta capacidade térmica, elevado coeficiente de transferência de calor e elevado fluxo de calor crítico.

As perdas de calor que ocorrem nos dispositivos de captação solar muitas vezes são atribuídas às limitadas propriedades de absorção do fluido de trabalho. Uma abordagem para melhorar a eficiência envolve a introdução de aditivos de partículas microscópicas no fluido base, o que aumenta a quantidade de energia solar captada pelo fluido. No entanto, é importante notar que a estabilidade, sedimentação e erosão do tubo podem afetar o desempenho global do sistema quando se utilizam esses aditivos.

Uma técnica promissora para aprimorar o processo de transferência de calor em sistemas de energia solar é a substituição do fluido de transferência de calor por um nanofluido. Isso pode oferecer uma solução eficaz para aumentar a eficiência e a confiabilidade desses sistemas (HAMZAT *et al.*, 2022).

Nanofluidos consistem na incorporação de nanopartículas em fluidos de trabalho convencionais, também conhecidos como fluidos base. O termo 'nanofluido' foi inicialmente cunhado em 1998. Esses nanofluidos exibem várias propriedades distintas, que incluem: 1) o movimento das nanopartículas, 2) as propriedades intrínsecas das próprias nanopartículas e 3) as interações que ocorrem entre as nanopartículas e outras partículas presentes no fluido. Devido às notáveis propriedades termofísicas que apresentam em comparação com os fluidos base convencionais, os nanofluidos têm sido considerados como os fluidos de trabalho do próximo século. Eles oferecem um potencial significativo para aplicações avançadas em diversas áreas (SAID *et al.*, 2023).

Neste trabalho foi utilizado um coletor solar de placa plana de absorção direta, denominado “Parede Solar” utilizado em trabalho anterior para avaliar o desempenho, de

nanofluidos de prata e de dióxido de titânio. Segundo Amorim Neto (2020), a partir dos experimentos realizados, observou-se uma diferença substancial entre o desempenho térmico dos nanofluidos de prata e dióxido de titânio. A prata apresentou um aumento de temperatura de 26%, em comparação com apenas 5% para o dióxido de titânio, destacando, dessa forma, a superioridade da prata sobre o dióxido de titânio, tornando-se assim, a escolha de nanofluido para o presente trabalho.

Este estudo visa comparar o desempenho da “Parede solar”, utilizando como fluidos de trabalho, água e nanofluido de prata, em experimentos distintos de captação de energia solar para aquecimento do fluido e posterior utilização da energia captada. Logo, nos experimentos realizados existe um fluxo do fluido de trabalho, diferente do anterior que o fluido estava estático, emulando assim um sistema real de captação e utilização da energia térmica.

2 OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é avaliar as eficiências de 1ª e 2ª Leis da termodinâmica de um coletor solar de placa plana, aqui chamado de “Parede solar”, utilizando dois fluidos de trabalho, água destilada e nanofluido de prata. A análise foi feita através de dados de temperatura do fluido de trabalho de entrada e saída do coletor solar, além de dados de radiação solar. Enumerando os objetivos específicos, eles são:

1. Montagem de aparato para circulação do fluido de trabalho no coletor solar e para remoção do calor absorvido
2. Testes do aparato para ajustes e verificação dos equipamentos de aferição de dados, tais como termopares, dataloggers e piranômetro
3. Realização dos testes experimentais e coleta dos dados de temperatura e radiação
4. Cálculos da temperatura na “parede solar”, eficiências e análise dos resultados

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 Combustíveis fósseis e energias renováveis

Nas últimas duas décadas, o mundo testemunhou um explosivo crescimento populacional e um notável avanço tecnológico. Esses acontecimentos têm resultado em um aumento significativo na demanda global por energia (OMEIZA *et al.*, 2023). Atualmente, a produção global de energia ainda é amplamente dependente de combustíveis fósseis, contribuindo assim para o aumento do carbono na atmosfera e o consequente aquecimento global (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023).

Reconhecendo essa preocupação, a Organização das Nações Unidas (ONU) estabeleceu duas metas cruciais no início do novo milênio: os Objetivos de Desenvolvimento do Milênio (ODM) e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS). Através dessas metas, a ONU convocou todos os países, organizações e partes interessadas a concentrarem esforços na resolução de questões ambientais críticas, como as mudanças climáticas, além de melhorias relacionadas à água e saneamento (PARSA *et al.*, 2022).

Com base na Agenda 2030 para os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), é imperativo alcançar uma redução significativa nas emissões de carbono nas próximas décadas. Isso pode ser efetivamente facilitado através da promoção e adoção de fontes de energia renovável, desempenhando um papel fundamental na mitigação dos desafios ambientais e na construção de um futuro mais sustentável (PARSA *et al.*, 2022).

Uma análise comparativa entre os combustíveis fósseis e a energia solar evidencia marcantes discrepâncias em diversos aspectos. Os combustíveis fósseis, embora historicamente desempenhem um papel central na produção de energia, apresentam notáveis desvantagens ambientais. A queima desses combustíveis libera gases de efeito estufa e poluentes, contribuindo para a poluição do ar e as mudanças climáticas. Adicionalmente, os processos de extração e transporte podem resultar na degradação de ecossistemas, poluição hídrica e vazamentos de petróleo. A característica não renovável desses recursos gera preocupações acerca da exaustão dos mesmos (AHMAD *et al.*, 2024).

Por outro lado, a energia solar proporciona uma alternativa consideravelmente mais sustentável. As tecnologias solares geram eletricidade sem emissões de gases de efeito estufa durante sua operação, resultando em um impacto ambiental consideravelmente reduzido. A natureza renovável e abundante da energia solar minimiza

as inquietações relacionadas à escassez e ao esgotamento dos recursos (AHMAD *et al.*, 2024).

Surge, assim, uma urgente necessidade de aprimorar as fontes de abastecimento energético, a fim de suprir a crescente taxa de consumo de energia que a humanidade requer em suas atividades cotidianas. A relação intrínseca entre a humanidade e a energia não pode ser subestimada, visto que a busca incessante por um fornecimento energético mais robusto é essencial para a nossa sociedade (OMEIZA *et al.*, 2023). Diante desse cenário, é imperativo que se faça uma transição em direção a fontes de energia renovável (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023).

Para suprir a crescente demanda global por energia, especialistas argumentam que é fundamental que o mundo reduza sua excessiva dependência dos combustíveis fósseis e faça investimentos em fontes alternativas de energia que sejam limpas, acessíveis, sustentáveis e confiáveis. Essa necessidade é impulsionada pela rápida depleção da camada de ozônio, pelo efeito estufa e pelo aquecimento global. Esses impactos ambientais têm despertado um crescente interesse em fontes de energia renovável e sustentável (OMEIZA *et al.*, 2023).

Em termos de segurança energética, os combustíveis fósseis muitas vezes têm origem em regiões geopoliticamente instáveis, introduzindo vulnerabilidades. Disrupções no fornecimento devido a conflitos, flutuações de mercado e problemas de transporte podem causar desafios significativos. A energia solar mitiga essas preocupações por ser uma fonte distribuída e amplamente disponível, reduzindo a dependência de regiões específicas. Ela melhora a segurança energética por meio da diversificação e da redução da dependência de combustíveis importados (AHMAD *et al.*, 2024).

A necessidade de aumentar a utilização de energia renovável tem crescido substancialmente nos últimos tempos, impulsionada pelo estabelecimento de metas ambiciosas de sustentabilidade por várias nações para um futuro previsível. Apesar de a energia eólica e solar serem superiores aos métodos tradicionais de geração de energia, sua plena exploração ainda enfrenta desafios devido à discrepância entre a oferta e a demanda de energia renovável. De acordo com a Agência Internacional de Energia (AIE), o calor é a principal finalidade de uso da energia, respondendo por 50% do consumo total de energia final em todo o mundo, superando tanto a eletricidade (20%) quanto o transporte (30%) (MUHAMMAD *et al.*, 2023).

A energia renovável tem ganhado destaque global devido à preocupação com a poluição ambiental e a escassez de recursos energéticos. Atualmente, a utilização da

energia solar é amplamente reconhecida como uma das tecnologias de energia renovável mais promissoras (YU *et al.*, 2023).

A energia solar é, portanto, considerada a fonte de energia alternativa mais promissora devido às suas inúmeras vantagens em relação a outras opções. Ela é uma fonte de energia natural e ecologicamente amigável, proveniente do Sol, que pode ser diretamente convertida em eletricidade. Além disso, a energia solar não causa poluição, exige manutenção mínima e os produtos associados a essa tecnologia têm uma longa vida útil, geralmente de 20 a 30 anos. Inicialmente, as aplicações solares foram introduzidas em setores como eletrificação rural, telecomunicações e agricultura, mas hoje em dia são usadas em diversas áreas, incluindo aquecimento solar de água, secagem solar e geração de energia fotovoltaica (PV). Vale destacar que a energia solar tem o potencial de atender a 100% das necessidades globais de energia primária (SAMATAR *et al.*, 2023).

3.2 Coletores solares

A crescente disparidade entre a demanda por energia e sua produção tem impulsionado a busca por uma maior utilização da energia solar (HAZRA; NANDI, 2023). A energia solar representa uma das fontes de energia mais preciosas, atraindo uma significativa quantidade de pesquisas ao longo das últimas décadas. Em particular, a busca pela melhoria dos coletores solares, que são os aparelhos destinados a captar a energia solar para uso, permanece como um objetivo constante que tem sido extensivamente explorado na literatura (XIONG *et al.*, 2021). A conversão de energia fototérmica em um coletor solar representa uma das maneiras mais eficientes de armazenar a energia proveniente do Sol (HAZRA; NANDI, 2023).

Em termos simples, um coletor solar é um dispositivo projetado para capturar a radiação solar disponível. A energia solar assim coletada pode ser convertida em energia térmica, o que ocorre na tecnologia de energia solar concentrada, ou em energia elétrica, como é feito na tecnologia fotovoltaica. A energia térmica pode ser empregada para aquecer água ou fornecer calor para um processo térmico, ou qualquer outro processo que requeira energia térmica. Existem duas categorias principais de coletores solares: não concentradores e concentradores. Os coletores concentradores superam os não concentradores em termos de capacidade de captação, uma vez que suas áreas coletoras e absorvedoras são equivalentes. Os coletores concentradores direcionam a radiação recebida para uma área menor, resultando em maior fluxo e melhor eficiência, especialmente em

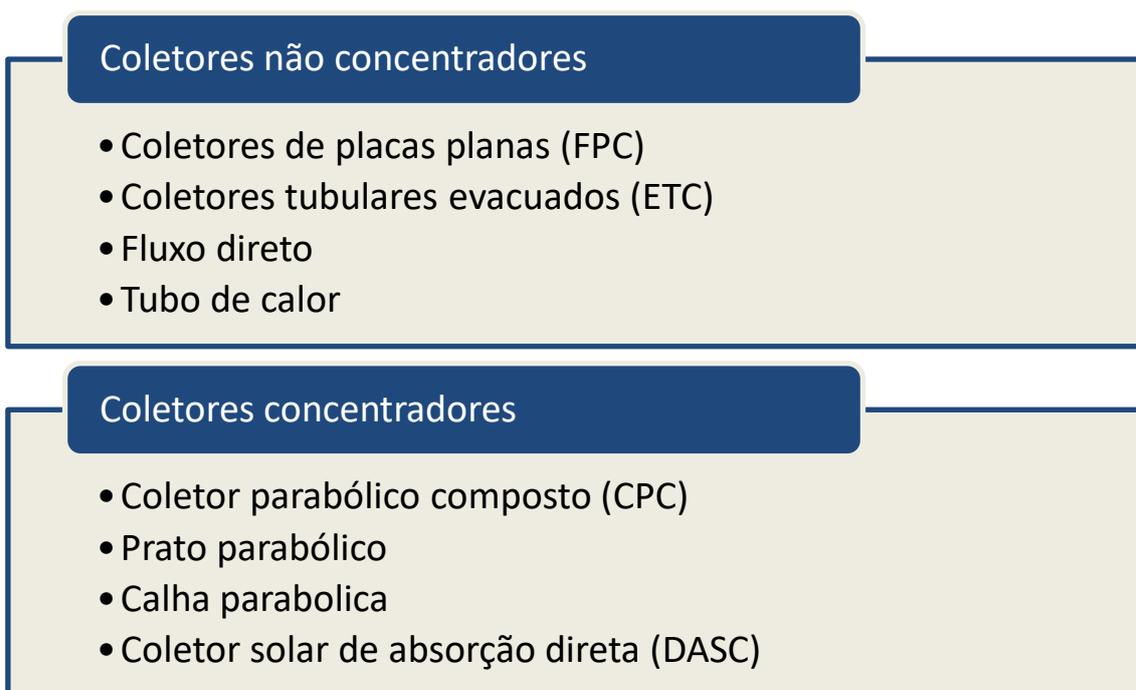
temperaturas mais elevadas (AHMAD *et al.*, 2024).

Os coletores solares térmicos (STCs) podem ser classificados em duas categorias: concentradores e não concentradores, como mostra a Figura 1.

Os STCs não concentradores são utilizados em aplicações com temperaturas baixas a moderadas, geralmente abaixo de 100 °C. Por outro lado, os STCs concentradores são empregados em situações que demandam altas temperaturas de operação, variando de 250 °C a 2500 °C (SHAHSAVAR *et al.*, 2023).

Diversos tipos de coletores solares estão disponíveis para concentrar a luz solar. Para aumentar a geração de calor, é necessário elevar a temperatura da superfície dos coletores solares. Quanto mais luz solar for concentrada na linha focal dos coletores, maior será a produção de calor. No entanto, não há controle direto sobre a quantidade de luz solar disponível para focalizar. Portanto, é necessário ajustar vários outros componentes. A eficiência dos coletores depende das propriedades de transporte de massa do fluido base e da taxa de aquecimento dos coletores, que podem ser otimizados por meio de diversas práticas (SINGH *et al.*, 2021).

Figura 1- Tipos de coletores solares



Fonte: Elaborada pelo autor

3.3 Coletor solar de placa plana

Os coletores solares de placa plana representam o dispositivo mais simples para a conversão de energia solar em energia térmica, podendo ser aplicado com sucesso para o aquecimento de água em diversos cenários, incluindo aplicações residenciais e industriais (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023).

As razões para a preferência dos coletores solares de placa plana (FPSCs) em comparação com outros sistemas de coleta de energia solar térmica incluem seu custo de fabricação relativamente baixo, a capacidade de capturar tanto a radiação direta quanto a difusa, além de dispensar a necessidade de qualquer sistema de rastreamento solar (ALAWI *et al.*, 2021).

No entanto, existe uma desvantagem significativa associada aos coletores solares de placa plana convencionais: sua eficiência térmica inferior e o coeficiente de transferência de calor convectivo, que é minimizado quando comparado ao fluido convencional de transferência de calor (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023). A Figura 2 mostra coletores solares de placa plana.

Figura 2- Coletores solares de placa plana



Fonte: Adaptado de Ajeena, Farkas e Víg (2023)

Em um coletor solar convencional, a radiação incidente é inicialmente absorvida na superfície interna do coletor e, posteriormente, transferida para o fluido de trabalho por meio de condução e convecção. No entanto, avanços recentes têm eliminado as resistências térmicas associadas à transferência de calor da superfície interna para o fluido de trabalho, graças à absorção direta de energia solar pelo próprio fluido de trabalho.

Esses coletores são conhecidos como Coletores Solares de Absorção Direta (DASCs) (HAZRA; NANDI, 2023).

3.4 Nanofluidos

Tradicionalmente, em processos industriais, foram utilizados fluidos solares com baixa condutividade térmica, como etilenoglicol, água e óleo. No entanto, nos últimos anos, houve um esforço significativo de pesquisa para aprimorar a eficiência na transferência de calor e expandir o uso de Nanofluidos (NFs) em aplicações solares (AJEENA; VÍG; FARKAS, 2022).

O conceito de nanofluidos foi pioneiramente desenvolvido por Choi e Eastman em 1995, no Laboratório Nacional de Argonne, EUA (MUKHERJEE *et al.*, 2024). Os nanofluidos consistem em uma suspensão estável e homogênea de nanopartículas (com tamanho de partícula inferior a 100 nm) em um fluido base. A presença dessas nanopartículas melhora as propriedades térmicas e ópticas do fluido de trabalho (HAZRA; NANDI, 2023).

A nanotecnologia teve origem em 1959 com Richard Feynman. Posteriormente, os nanotubos de carbono foram descobertos por Iijima em 1990. A pesquisa sobre os nanotubos de carbono tornou-se um tópico emergente nas aplicações de engenharia, especialmente nas áreas térmica e elétrica. Os nanomateriais englobam diversas nanopartículas, nanotubos, nanohastes, nanochapas e nanofios, os quais foram sintetizados por meio de técnicas biológicas, químicas e físicas. O avanço da nanotecnologia desempenhou um papel de destaque na produção de materiais em escala nanométrica (MUDIDANA; MIDITANA; RAMBABU, 2023).

Esses nanofluidos podem ser compostos por metais ou óxidos não metálicos, grafeno, nanomateriais à base de carbono, polímeros e carburetos. Exemplos de óxidos metálicos incluem cobre, prata, ferro e ouro, enquanto óxidos não metálicos englobam CuO, SiO₂, Al₂O₃, TiO₂, etc., todos exibindo condutividade térmica aprimorada (MUDIDANA; MIDITANA; RAMBABU, 2023).

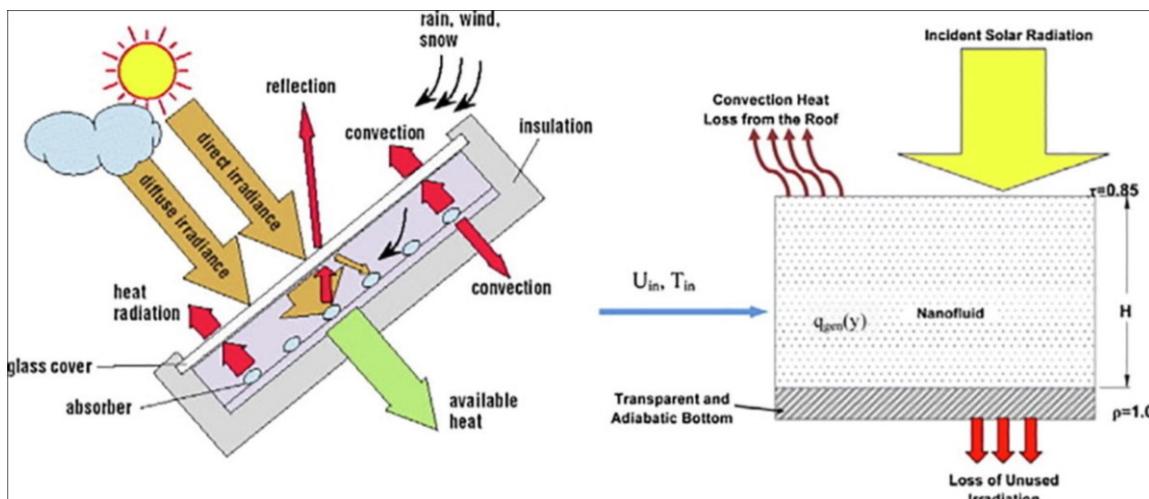
A dispersão de partículas metálicas nanodimensionadas ou não metálicas em fluidos de base tradicionais, como água, óleo e glicóis, pode resultar em uma condutividade térmica anormalmente alta, o que levaria a uma melhor transferência de calor. Esses efeitos são observados mesmo em concentrações muito baixas. O tamanho reduzido das partículas também se traduz em uma notável estabilidade coloidal e menor

probabilidade de obstruções durante a aplicação (MUKHERJEE *et al.*, 2024).

Estudos recentes revelaram otimizações significativas na absorção de calor de coletores solares que foram aprimorados com a adição de nanopartículas de carbono. Os cálculos demonstraram que a absorção de calor ideal pode aumentar em até 35% quando acompanhada do uso de nanofluido. Além disso, em outro estudo que empregou nanopartículas de óxido de cobre, foi avaliado o impacto nos coletores solares tubulares evacuados (ETSC). Os resultados experimentais indicaram um aumento significativo no desempenho do aquecimento do coletor, com um aumento de 30% no coeficiente de transferência de calor em comparação com o uso de água como fluido base (SINGH *et al.*, 2021).

Da mesma forma, a aplicação de diferentes tipos de nanopartículas em um coletor solar de absorção direta (DASC) resultou em um refinamento de 5% na eficiência geral dos coletores. Por fim, um estudo adicional, com base em estimativas, constatou que a utilização de nanofluido como fluido de trabalho não apenas melhorou a produção de energia, mas também reduziu as dimensões físicas dos coletores e a quantidade de calor gerado. A Figura 3 apresenta um exemplo de coletor solar convencional, com a distinção de utilizar nanofluido como seu fluido operacional em lugar da água convencional. (SINGH *et al.*, 2021).

Figura 3- Nanofluido atuando como fluido base de um coletor solar



Fonte: SINGH *et al.*, 2021

3.5 Propriedades termofísicas dos nanofluidos

As propriedades térmicas das Nanopartículas (NPs) desempenham um papel fundamental no desempenho dos Nanofluidos (NFs). A adição de NPs afeta as propriedades do fluido base, como viscosidade, condutividade térmica e calor específico. Diversos fatores, como concentração, forma, tamanho e pureza das NPs, influenciam as propriedades termofísicas. O desempenho térmico dos coletores solares está intrinsecamente ligado ao seu comportamento térmico, que é afetado pela variação de temperatura, condições ambientais, tipo de fluido base, tamanho, forma e concentração das NPs. Portanto, a escolha adequada do NF é crucial para otimizar os resultados (AJEENA; VÍG; FARKAS, 2022).

Vários parâmetros influenciam as propriedades térmicas, incluindo o tamanho das nanopartículas, o tipo, o método de preparação, a forma, o pH, aditivos e temperatura. Os nanofluidos apresentam propriedades aprimoradas em comparação com os fluidos convencionais, tais como alta condutividade térmica, elevado coeficiente de transferência de calor por convecção, alta capacidade térmica específica, viscosidade variável e alta densidade (MUDIDANA; MIDITANA; RAMBABU, 2023).

3.5.1 Condutividade Térmica

Pesquisas demonstraram um aumento na condutividade térmica quando as nanopartículas são misturadas ao fluido base. A Tabela 1 ilustra a condutividade térmica de diferentes nanopartículas metálicas e de óxido metálico (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023).

Um fator que contribui significativamente para a melhoria da eficiência térmica é o movimento browniano, conforme ilustrado na Figura 4a, que regula o comportamento térmico da dispersão das NPs nos fluidos. Outro fator relevante para o aumento da eficiência térmica é a formação de estruturas em camadas pelas moléculas líquidas ao redor das NPs, conhecidas como nanocamadas, conforme mostrado na Figura 4b. Além disso, o calor é transportado nos sólidos cristalinos por meio de fônons (tipo especial de movimento vibratório) que se movem aleatoriamente e são dispersos por defeitos ou colisões. Adicionalmente, o agrupamento de partículas afeta a condutividade térmica efetiva, uma vez que áreas locais com alta concentração de material particulado são formadas devido à sedimentação das aglomerações de partículas com menor resistência ao

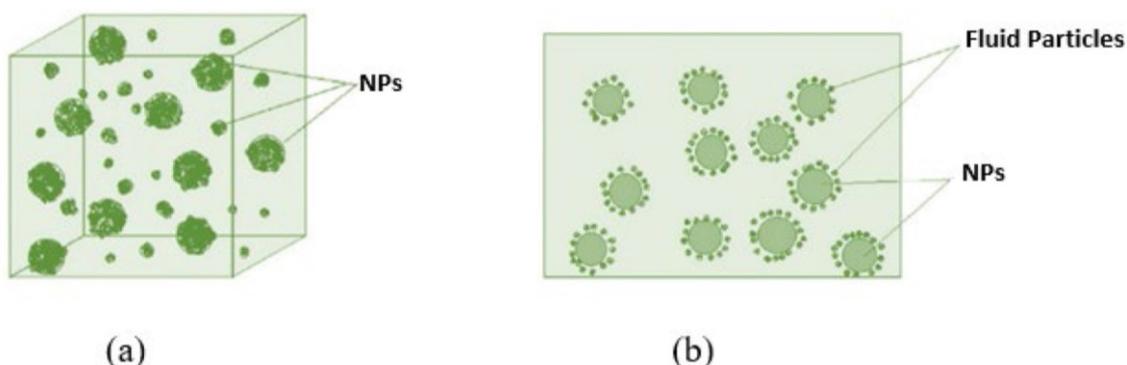
fluxo térmico (AJEENA; VÍG; FARKAS, 2022).

Tabela 1- Condutividade térmica de diferentes nanopartículas

Nanopartículas	Condutividade térmica (W/mK)
Ag	429
Cu	398
Si	148
MgO	54,9
Al_2O_3	40
CuO	32,9
ZnO	29

Fonte: Adaptado de Pathak, Salunke e Damle (2023).

Figura 4- (a) Movimento Browniano das Nanopartículas (NPs) e (b) A estrutura dos Nanofluidos (NFs) é composta por NPs, fluidos em grande quantidade e nanocamadas na interface entre o sólido e o fluido



Fonte: Ajeena, Vig e Farkas (2022)

3.5.2 Viscosidade do nanofluido

A viscosidade é uma propriedade fundamental de um fluido que fornece resistência ao atrito devido às tensões de cisalhamento na camada de fluido adjacente. Também pode ser definida como a relação entre a tensão de cisalhamento e a taxa de cisalhamento. A viscosidade desempenha um papel crucial na determinação se o fluxo é turbulento ou laminar em um canal, já que a queda de pressão é proporcional ao número de Reynolds, que, por sua vez, é influenciado pela viscosidade. À medida que o volume sólido e a porcentagem em peso das NPs aumentam, geralmente a viscosidade dos NFs também

aumenta, mas esse aumento não é linear devido ao comportamento não newtoniano dos NFs. O aumento na viscosidade do fluido resulta em maiores perdas de pressão, o que, por sua vez, requer mais potência de bombeamento. Além disso, a viscosidade efetiva é influenciada por diversos fatores, como a concentração de NPs, a viscosidade do fluido base, o diâmetro das partículas, a pressão, a taxa de cisalhamento, o tipo de partícula, o valor de pH, a forma das partículas e a temperatura (AJEENA; VÍG; FARKAS, 2022).

3.5.3 Densidade do nanofluido

A densidade é outra propriedade termofísica crucial para avaliar o desempenho da transferência de calor dos NFs. A densidade de um NF está diretamente relacionada à proporção de volume de sólidos (NPs) em relação ao volume de líquido (fluido base) no sistema. Quando a densidade dos sólidos é maior do que a dos fluidos, a densidade do NF tende a aumentar com a adição de NPs ao fluido. Isso, por sua vez, impacta vários fatores, incluindo a resistência ao atrito, perda de pressão, números de Reynolds e Nusselt (AJEENA; VÍG; FARKAS, 2022).

3.5.4 Calor específico do nanofluido

O calor específico desempenha um papel fundamental na influência da taxa de transferência de calor dos NFs. Ele se refere à quantidade de calor necessária para elevar a temperatura de 1 grama de NF em 1 °C. O calor específico dos materiais é uma propriedade crucial para determinar seu desempenho térmico. Em materiais convencionais, o calor específico geralmente permanece constante à pressão constante e em uma ampla faixa de temperaturas. No entanto, no caso de NFs, o calor específico pode variar dependendo do tipo de nanomaterial, temperatura, fluidos de base e concentração de NPs nos fluidos de base (AJEENA; VÍG; FARKAS, 2022).

3.5.5 Transferência de calor convectiva

As características de desempenho dos NFs são intrínsecas quando consideram-se parâmetros de transferência de calor por convecção, como número de Nusselt, número de Reynolds, número de Prandtl, número de Peclet e coeficientes de transferência de calor por convecção. O desempenho térmico desses parâmetros é influenciado pela fração

volumétrica, tamanho das partículas, tipo de fluido base e pelas condições operacionais, como temperatura, direção do fluxo e tipo de fluxo (AJEENA; VÍG; FARKAS, 2022).

As propriedades dos nanofluidos desempenham um papel fundamental em suas aplicações de transferência de calor. Vários pesquisadores propuseram fórmulas para calcular essas propriedades, sendo as mais importantes a densidade, a condutividade térmica, o calor específico e a viscosidade dinâmica. A Tabela 2 apresenta as fórmulas para o cálculo dessas propriedades.

Tabela 2- Propriedades termofísicas dos nanofluidos

Property	Formula
Density (ρ_{nf})	$\rho_{nf} = \rho_{np}\phi + (1 - \phi)\rho_{bf}$
Specific heat of nanofluid $C_{p_{nf}}$	$C_{p_{nf}} = C_{p_{np}}\phi + (1 - \phi)C_{p_{bf}}$
Thermal conductivity of nanofluid k_{nf}	$C_{p_{nf}} = \frac{\phi\rho_{np}C_{p_{np}} + (1-\phi)\rho_{bf}C_{p_{bf}}}{\rho_{nf}}$ $\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + 2k_{bf} + 2\phi(k_p - k_{bf})}{k_p + 2k_{bf} - \phi(k_p - k_{bf})}$ $\frac{k_{nf}}{k_{bf}} = \frac{k_p + (n-1)k_{bf} - (n-1)\phi(k_{bf} - k_p)}{k_p + (n-1)k_{bf} + \phi(k_{bf} - k_p)}$ <p>where</p> $n = \frac{3}{\psi}$ <p>n = empirical shape factor, ψ = sphericity</p>
Dynamic Viscosity of nanofluid μ_{nf}	$\frac{\mu_{nf}}{\mu_{bf}} = \frac{1}{(1-\phi)^{2.5}}$

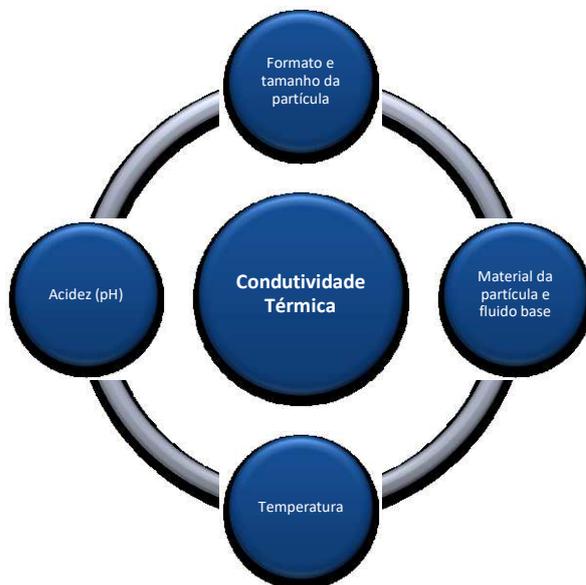
Fonte: Pathak, Salunke e Damle (2023).

Nessas fórmulas, os sufixos “nf”, “bf” e “p” representam as propriedades do nanofluido, do fluido base e das nanopartículas, enquanto “ ϕ ” refere-se à fração de volume das partículas.

Das propriedades mencionadas, a condutividade térmica e a viscosidade do nanofluido são de extrema importância para as aplicações térmicas. A mistura adequada de nanopartículas no fluido base aumenta a condutividade térmica. Foi relatado que o principal motivo desse comportamento do fluido é o movimento browniano. A condutividade térmica do nanofluido pode ser medida por métodos como o do fio quente transitório ou um analisador térmico, entre outros. A pesquisa resumida mostra que a condutividade térmica do nanofluido é afetada por vários fatores, conforme ilustrado na

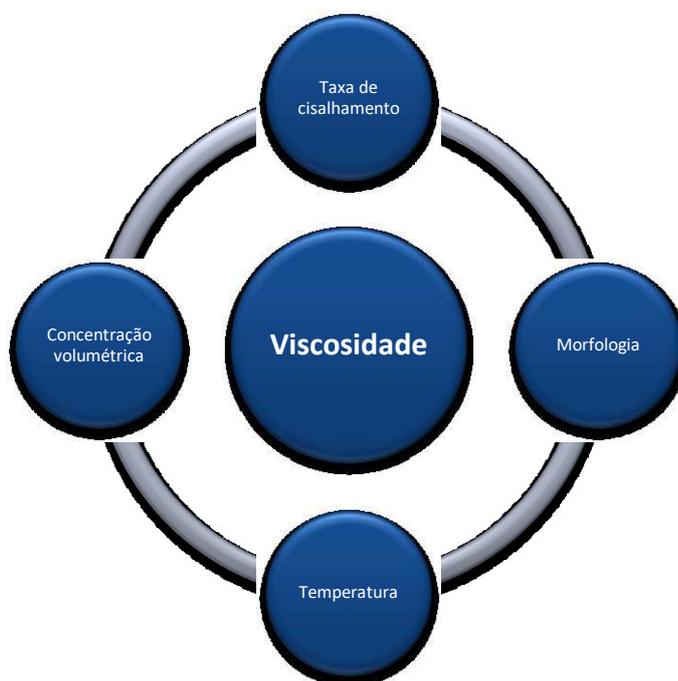
Figura 5. A segunda propriedade mais importante do nanofluido é a viscosidade, pois afeta a potência de bombeamento e a perda de pressão. A Figura 6 apresenta os parâmetros que afetam a viscosidade do nanofluido (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023).

Figura 5- Parâmetros que afetam a condutividade térmica dos nanofluidos



Fonte: Adaptado de (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023)

Figura 6 - Parâmetros que afetam a viscosidade dos nanofluidos

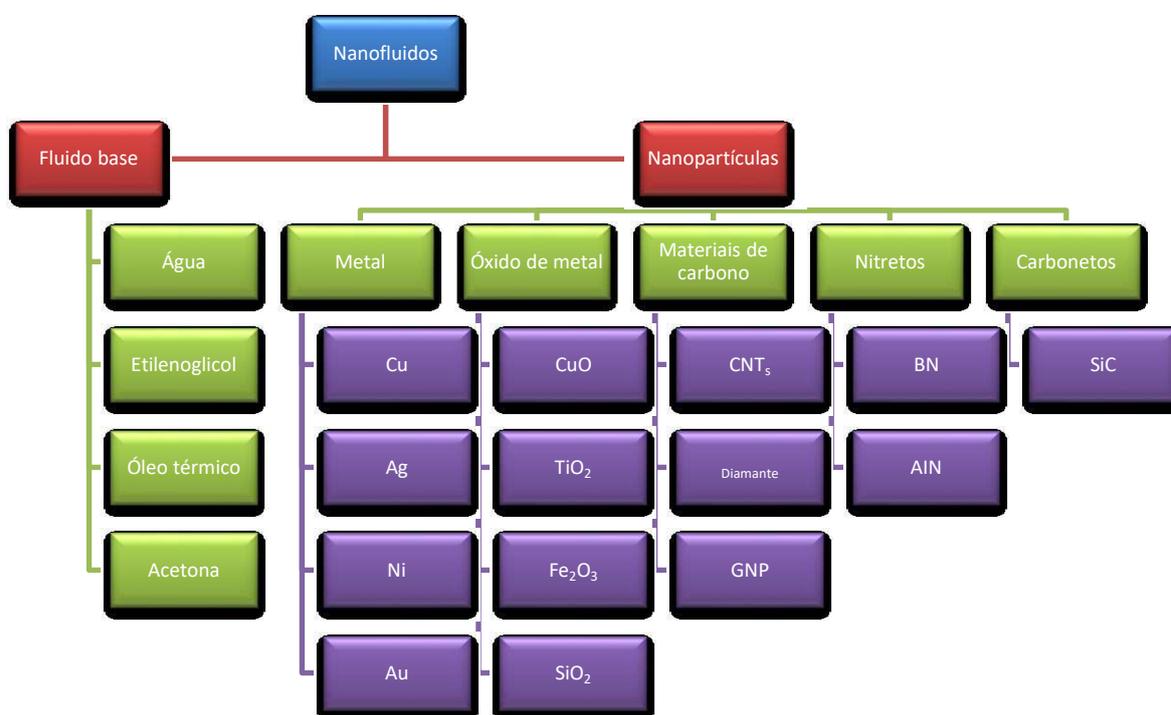


Fonte: Adaptado de (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023)

3.6 Preparação dos nanofluidos

Existem diversos tipos de nanofluidos que são preparados através da combinação de nanopartículas com fluidos básicos (BFs). Alguns exemplos notáveis dessas nanopartículas incluem óxido de cobre (CuO), alumina, prata (Ag), óxido de zinco (ZnO), dióxido de titânio (TiO₂), nanotubo de carbono (CNT), óxido de ferro (Fe₂O₃), óxido de magnésio (MgO), óxido de cério (CeO₂) e nanopartículas de ouro (Au). Em relação aos fluidos básicos comumente utilizados, pode-se mencionar o etileno-glicol, bem como outros refrigerantes e lubrificantes, além de biofluidos, entre outros. A representação visual de alguns desses fluidos básicos (BFs) e nanopartículas (NPs) pode ser observada na Figura 7 (KALSI *et al.*, 2023).

Figura 7 - Mapeamento de alguns fluidos base e nanopartículas

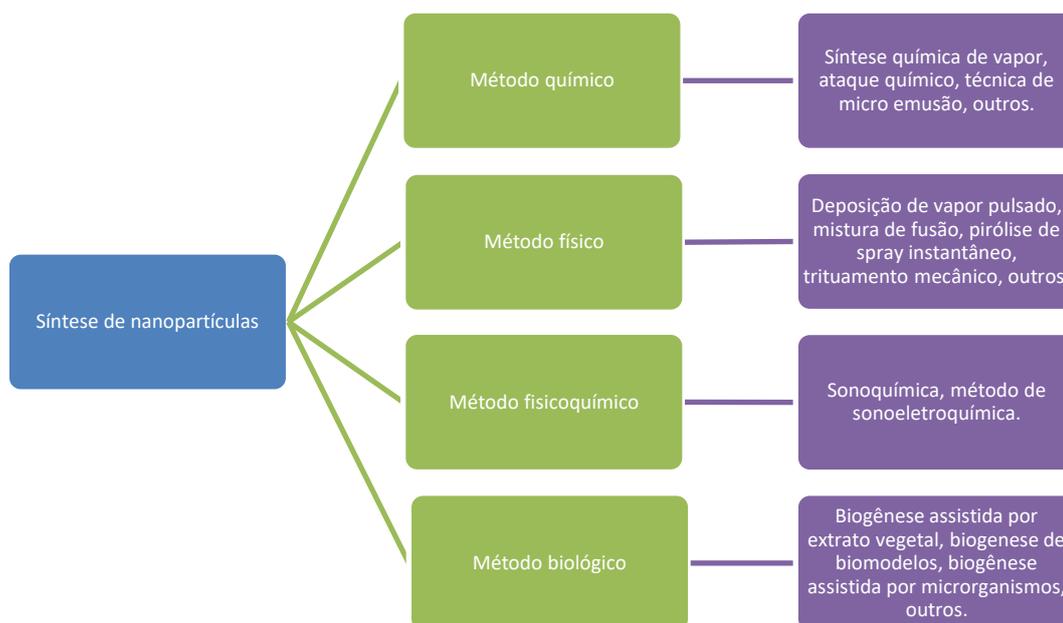


Fonte: Adaptado de Kalsi *et al.* (2023).

A preparação do nanofluido é crucial, uma vez que influencia diretamente em sua estabilidade. Geralmente, os pesquisadores empregam os métodos de uma ou duas etapas para produzir nanofluidos. No que diz respeito às nanopartículas, essas podem ser sintetizadas por meio de métodos químicos, físicos, físico-químicos ou biológicos, como pode ser visto na Figura 8. (KALSI *et al.*, 2023).

Para criar um nanofluido com estabilidade, é importante garantir a dispersão uniforme das nanopartículas no fluido transportador. Essa uniformidade na dispersão das nanopartículas dentro do fluido transportador é de importância crítica para a obtenção de nanofluidos estáveis. Para aprimorar essa dispersão, é comum adicionar surfactantes ao fluido transportador, o que contribui significativamente para a estabilidade do nanofluido (MEHTA *et al.*, 2022).

Figura 8 - Métodos de síntese de nanopartículas



Fonte: Adaptado de Kalsi *et al.* (2023).

Diferentemente de uma simples mistura líquido/sólido, a criação de nanofluidos demanda condições especiais, tais como a obtenção de uma suspensão uniforme, manutenção da estabilidade da suspensão, minimização da aglomeração de partículas e a ausência de alterações químicas no fluido. A estabilização das suspensões pode ser alcançada por meio de estratégias como a alteração do pH da suspensão, a aplicação de agentes de superfície ou dispersantes, bem como o uso de vibração ultrassônica (ROCHA *et al.*, 2019).

A preparação de nanofluidos desempenha um papel essencial na melhoria das propriedades termofísicas dos mesmos. Os nanofluidos podem ser preparados dissolvendo nanopartículas no fluido base em proporções apropriadas. Foram propostos dois métodos para a preparação de nanofluidos: o método de um passo e o método de dois passos (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023).

Pesquisas indicam que os nanofluidos preparados através da técnica padrão de

duas etapas tendem a ter uma emulsão menos estável em comparação com aqueles sintetizados pelo método de uma etapa. Embora o método de uma etapa seja mais eficaz em termos de estabilidade, também é mais dispendioso em termos de custos de preparação. Como resultado, a escolha entre os métodos de síntese de nanofluidos depende de considerações econômicas (SRIHARAN; HARIKRISHNAN; OZTOP, 2023).

Com o intuito de reduzir os custos de produção, a técnica de um passo é geralmente empregada em unidades de pequena escala, ao passo que o método de dois passos é utilizado para produções em massa (MUDIDANA; MIDITANA; RAMBABU, 2023).

As vantagens e desvantagens dos dois métodos são expostos na Figura 9, mostrada abaixo.

Figura 9 - Vantagens e desvantagens dos métodos de etapa única e de etapa dupla

Método de uma etapa		Método de etapa dupla	
Vantagens	Desvantagens	Vantagens	Desvantagens
Sem armazenamentoSem secagem	Alto depósito de reagentes residuais	Mais simples e econômico	Precisa de surfactante ou funcionalização
Sem oxidaçãoSem transporte	Adequado para líquidos básicos de baixa pressão	Ideal para grande escala	Aumento do peso próprio
Sem necessidade de redispersão	Não ampliado para produção em larga escala	Adequado para nanopartículas de óxido	Sedimentação rápida, aglomeração rápida
Menos aglomeraçãoAlta Estabilidade	O método de síntese é caro	Produção econômica	Alta energia superficial

Fonte: (KALSI *et al.*, 2023).

3.6.1 Método de um passo / uma etapa

O processo que envolve a síntese de nanopartículas e a preparação de nanofluidos simultaneamente é frequentemente denominado "método de uma etapa". Diversas variantes dessa técnica estão disponíveis na literatura científica, e todas elas se baseiam nos princípios das reações físicas e químicas, cada uma com suas próprias vantagens e desvantagens intrínsecas (PARSA *et al.*, 2022).

O método de uma etapa envolve a inserção direta de partículas nanométricas no

fluido transportador, eliminando assim a necessidade de diversas etapas intermediárias, como secagem, armazenamento, transporte e dispersão das nanopartículas. Esta abordagem demonstra uma estabilidade superior em comparação com outras técnicas, uma vez que reduz substancialmente as chances de aglomeração de partículas após a síntese do nanofluido. É importante notar que a aplicação desse método pode ser desafiadora quando se lida com fluidos base que possuem pressões de vapor mais baixas (MEHTA *et al.*, 2022).

Os principais benefícios desse método incluem uma maior estabilidade dos nanofluidos, redução significativa na aglomeração e sedimentação das nanopartículas. No entanto, é importante observar que essas vantagens vêm acompanhadas de custos potencialmente mais elevados e, em alguns casos, a necessidade de usar concentrações mais baixas de nanopartículas pode ser uma desvantagem (PARSA *et al.*, 2022).

Existem duas técnicas populares de métodos de uma etapa que se destacam por não apresentarem as desvantagens mencionadas anteriormente. A primeira delas é conhecida como "Evaporação a Vácuo em Substrato de Óleo Corrente" (VEROS). A segunda técnica é a "Explosão Elétrica de Fio" (EEW), cujo dispositivo é mostrado na Figura 10. Essas técnicas têm sido amplamente adotadas por pesquisadores devido à sua aplicabilidade a diversos tipos de metais e óxidos em uma variedade de fluidos base. Além disso, elas não apenas garantem uma estabilidade aceitável a longo prazo, mas também tendem a ser mais econômicas em comparação com outras abordagens (PARSA *et al.*, 2022).

Figura 10 - Dispositivo utilizado para preparação de nanofluido em uma etapa (EEW)



Fonte: (PARSA *et al.*, 2022)

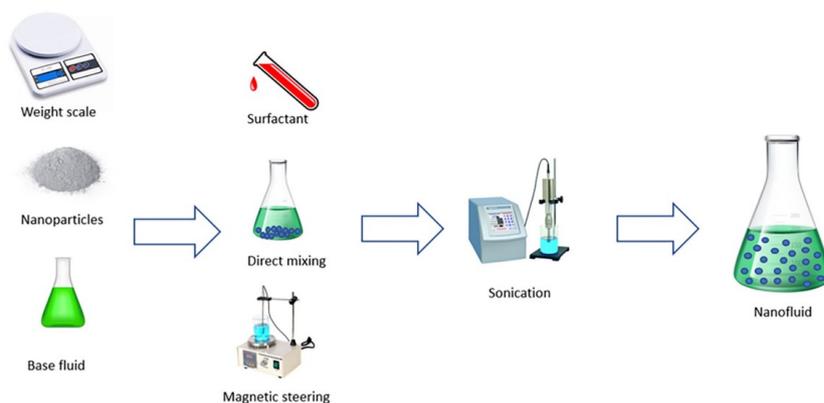
3.6.2 Método de dois passos / duas etapas

O método de dois passos é considerado o mais econômico e simples para a preparação de nanofluidos. Nesse método, as nanopartículas são produzidas na primeira etapa e, na segunda etapa, essas nanopartículas são dispersas no fluido base por meio de agitação magnética e ultrassonificação, conforme mostrado na Figura 11 (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023). Três métodos frequentemente utilizados fazem parte do processo de preparação de nanofluidos em dois passos. Eles incluem o Processo de Ultrassonificação, o Homogeneizador de Alta Pressão e o Agitador Mecânico. A principal desvantagem desse método é a formação de aglomerados devido à alta energia superficial. O agrupamento dessas nanopartículas torna-se mais intenso, acelerando a sedimentação devido ao efeito da força gravitacional. Muitos pesquisadores prepararam nanofluidos com este método devido à sua simplicidade e adequação para a preparação de nanotubos de carbono (MUDIDANA; MIDITANA; RAMBABU, 2023).

A estabilidade do nanofluido preparado é fundamental para sua utilização eficaz, sendo essa estabilidade determinada pela força repulsiva da camada dupla elétrica e pelas forças de Van der Waals. Para garantir a estabilidade dos nanofluidos, é necessário que a força repulsiva da camada dupla elétrica seja maior do que as forças de Van der Waals (PATHAK; SALUNKE; DAMLE, 2023).

O método de duas etapas oferece algumas vantagens, pois permite a preparação de nanofluidos de forma mais econômica, fácil e em maior escala. Portanto, a escolha entre os métodos de uma ou duas etapas depende das considerações específicas de cada aplicação e das prioridades de custo e estabilidade (PARSA *et al.*, 2022).

Figura 11- Método de dois passos para a preparação do nanofluido



Fonte: Pathak, Salunke e Damle (2023).

3.7 Eficiência de 1ª e 2ª Leis da termodinâmica

A análise energética se fundamenta na primeira lei da termodinâmica e avalia a utilização quantitativa da energia, porém desconsidera a variação na qualidade da energia. Em contraste, a análise exérgica, que se baseia na segunda lei da termodinâmica, oferece detalhes sobre a eficácia na utilização da energia. Além disso, é uma ferramenta preciosa para otimização de sistemas, desenvolvimento de projetos e avaliação do desempenho térmico (CHEN *et al.*, 2023).

A exergia, semelhante à energia, pode ser transferida ou removida de um componente por meio de três principais mecanismos: fluxo de massa, trabalho e calor. A transferência de exergia é observada na fronteira do sistema à medida que a exergia atravessa essa fronteira, revelando o ganho ou a perda de exergia pelo componente durante um processo (KOHOLÉ *et al.*, 2022).

Quanto à eficiência térmica, ou de 1ª lei, Ajeena, Farkas e Víg (2023), utilizando coletor solar de placa plana, obteve melhoras no desempenho de até 31,64% utilizando nanofluido em comparação com a água destilada.

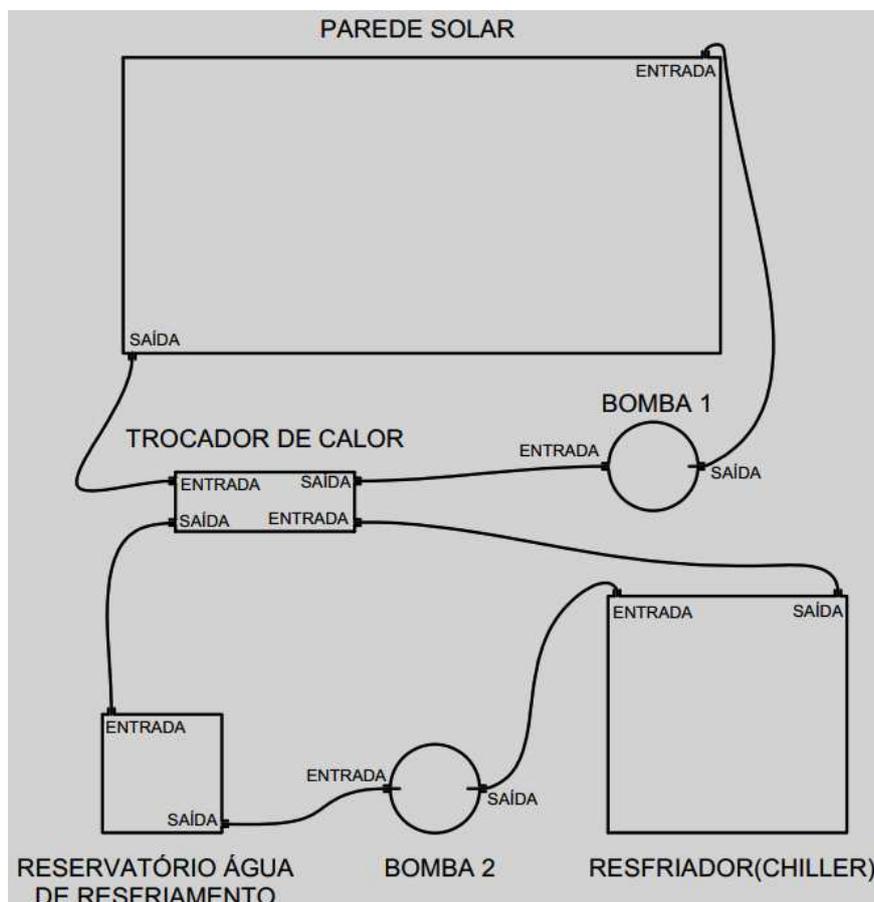
A eficiência exérgica, ou de 2ª Lei, de um coletor solar é definida como a relação entre o aumento da exergia da água e a exergia da radiação solar, expressa como a razão das temperaturas correspondentes. Estudos têm sido conduzidos para avaliar a eficiência exérgica (2ª Lei) de coletores solares de placa plana, e os resultados indicam que essa eficiência geralmente varia na faixa de 0,5% a 4%. Além disso, análises exérgicas de várias aplicações de energia solar também foram realizadas, revelando que a eficiência exérgica máxima observada para coletores solares de placa plana é de 4% (NIKOLIC *et al.*, 2022).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 Descrição do aparato

O aparato, Figura 12, consiste em uma “Parede Solar” de 1000 mm de comprimento e 500 mm de largura. A estrutura de sustentação é feita em alumínio, Figura 13, e a parte de vidro tem 4 camadas, duas externas de espessura 4 mm e duas internas de espessura 8 mm. A distância entre os vidros que recebem o fluido é de 7mm. No experimento foi utilizada somente a célula superior com capacidade de 3,5L.

Figura 12- Desenho esquemático do aparato



Fonte: Próprio autor

Para a medição das temperaturas foram utilizados termopares do tipo K com precisão de $0,1^{\circ}\text{C}$ em frequência de 1Hz, calibrados em banho termostático contra um termômetro de vidro padrão. Os termopares foram colocados na entrada da parede solar, parte superior, onde o fluido entra com temperatura mais baixa, e na saída, na parte

inferior, onde o fluido sai aquecido, com temperatura mais alta.

Os dados foram armazenados em um *Datalogger* modelo RX12 OMEGA SD. Os experimentos foram realizados na Universidade Federal do Ceará, na cidade de Fortaleza, no Laboratório de Energia Solar e Gás Natural (LESGN) com coordenadas: Latitude: 03° 43' 02" Sul, Longitude: 38° 32' 35" Oeste.

Como pode ser observado na Figura 12, depois que o fluido de trabalho passa pela parede solar e absorve calor aumentando sua temperatura, segue para o trocador de calor que funciona em contra corrente com água resfriada no “chiller”. Nessa parte do circuito, o fluxo era criado através da bomba 1, Figura 14, uma bomba de deslocamento positivo de vazão 64ml/min.

Figura 13- Foto aparato em operação



Fonte: Próprio autor

Figura 14- Foto da bomba de deslocamento positivo



Fonte: Próprio autor

A outra parte do circuito é necessária para retirar calor do fluido aquecido na parede solar, onde é utilizada água de resfriamento. A bomba 2, Figura 15, é uma bomba centrífuga, fabricante SARLOBETTER SB2000 30W 60Hz 1950L/h 2,1m.c.a, recebe água do reservatório de água de resfriamento, e leva a um resfriador (chiller), Figura 16, modelo RESUN CL600 1/4HP 100 a 1500L/h 600W, onde sua temperatura é reduzida e depois segue para o trocador de calor, já citado, em contra corrente com a água aquecida na parede solar. Todos os dutos de ligação foram termicamente isolados, logo as perdas térmicas para o ambiente de um equipamento a outro foram consideravelmente minimizadas.

Figura 15 – Foto da bomba de deslocamento positivo



Fonte: Sarlobetter (2023)

Figura 16- Resfriador (Chiller)



Fonte: Próprio autor

4.2 Descrição dos testes

O primeiro teste foi realizado com água destilada. O sistema foi colocado em funcionamento para estabilização dos fluxos e medições necessárias e funcionava por 24h seguidas. Como dito anteriormente, o volume utilizado era de 3,5L. O teste foi realizado no dia 27/04/2021, os dados utilizados foram os adquiridos das 9h às 17h locais, horário de maior incidência solar.

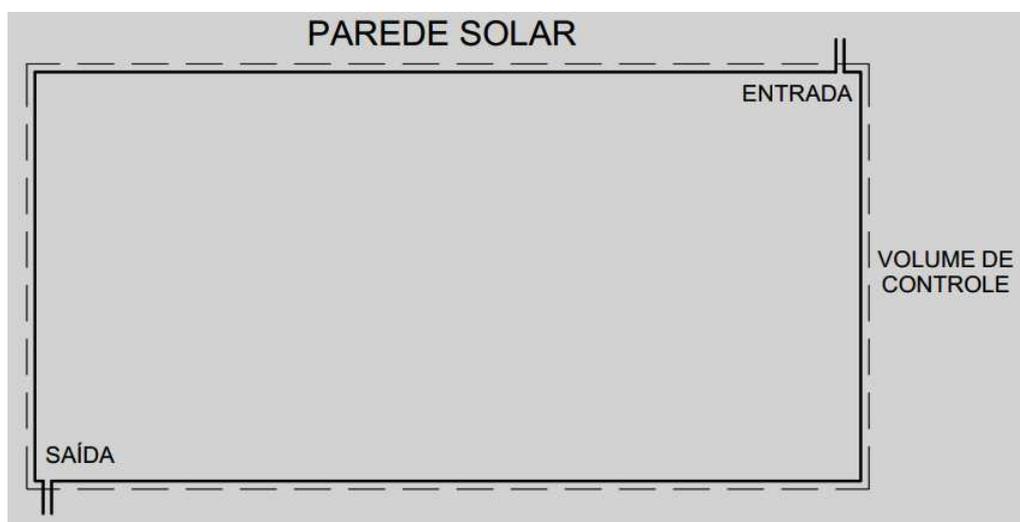
O segundo teste foi realizado com nanofluido de prata de concentração molar $6,17 \times 10^{-4}$ mol/L e concentração em volume de 6,5 ppm, preparado através do método de redução química. Este foi realizado no dia 08/07/2021 com a mesma forma de obtenção dos dados de temperatura e de inicialização do sistema.

Os dados de radiação solar foram obtidos através de um piranômetro horizontal KIPP&ZONNEN DELFIT/HOLLAND modelo CM11 de sensibilidade $4,78 \times 10^{-6}$ V/Wm⁻² e armazenados em um *Datalogger* NES MODAS 1632 S.

4.3 Descrição dos cálculos

O volume de controle definido foi a parede solar, Figura 17, com entrada na parte de cima e saída do fluido de trabalho na parte de baixo da mesma.

Figura 17- Volume de controle considerado na “parede solar”



Fonte: Próprio autor

O primeiro objetivo foi obter a taxa de transferência de energia para o fluido na parede solar, utilizando a primeira lei da termodinâmica, Equação 1, onde se tem o fluxo de energia térmica absorvida pelo fluido (\dot{Q}), o fluxo de massa do fluido de trabalho (\dot{m}), o calor específico do fluido de trabalho (c_p) e as temperaturas do fluido na entrada (T_e) e na saída (T_s).

$$\dot{Q} = \dot{m} c_p (T_s - T_e) \quad (1)$$

Posteriormente foram calculadas as irreversibilidades utilizando a segunda lei da termodinâmica, Equação 2, onde se apresentam o termo de temperatura ambiente (T_0) e de irreversibilidades ($\dot{\sigma}$).

$$\dot{\sigma} = -\frac{\dot{Q}}{T_0} - \dot{m} \left(c_p \ln \frac{T_e}{T_s} \right) \quad (2)$$

Depois, foi feito o balanço de exergia para calcular a temperatura do fluido de trabalho na parede solar utilizando a Equação 3, onde se tem a radiação solar incidente (Q_{sol}), a temperatura do fluido na parede solar (T_{par}), a exergia do fluido de trabalho na entrada (ex_e) e na saída (ex_s).

$$Q_{sol} \left(1 - \frac{T_0}{T_{par}} \right) + \dot{m}_b (ex_e - ex_s) - \dot{\sigma} T_0 = 0 \quad (3)$$

A eficiência térmica foi calculada utilizando a equação 4, onde se tem a razão entre a energia térmica absorvida pelo fluido (Q) e a radiação solar incidente (Q_{sol}).

$$\eta = \frac{Q}{Q_{sol}} \quad (4)$$

A eficiência exergética, ou de 2ª lei, foi calculada utilizando a Equação 5, onde se encontram os termos de ganho de exergia no numerador e no denominador a entrada de exergia, assim chega-se a quanto de exergia foi, de fato, aproveitada.

$$\eta = \frac{\dot{m}_b (ex_e - ex_s)}{Q_{sol} \left(1 - \frac{T_0}{T_{par}} \right)} \quad (5)$$

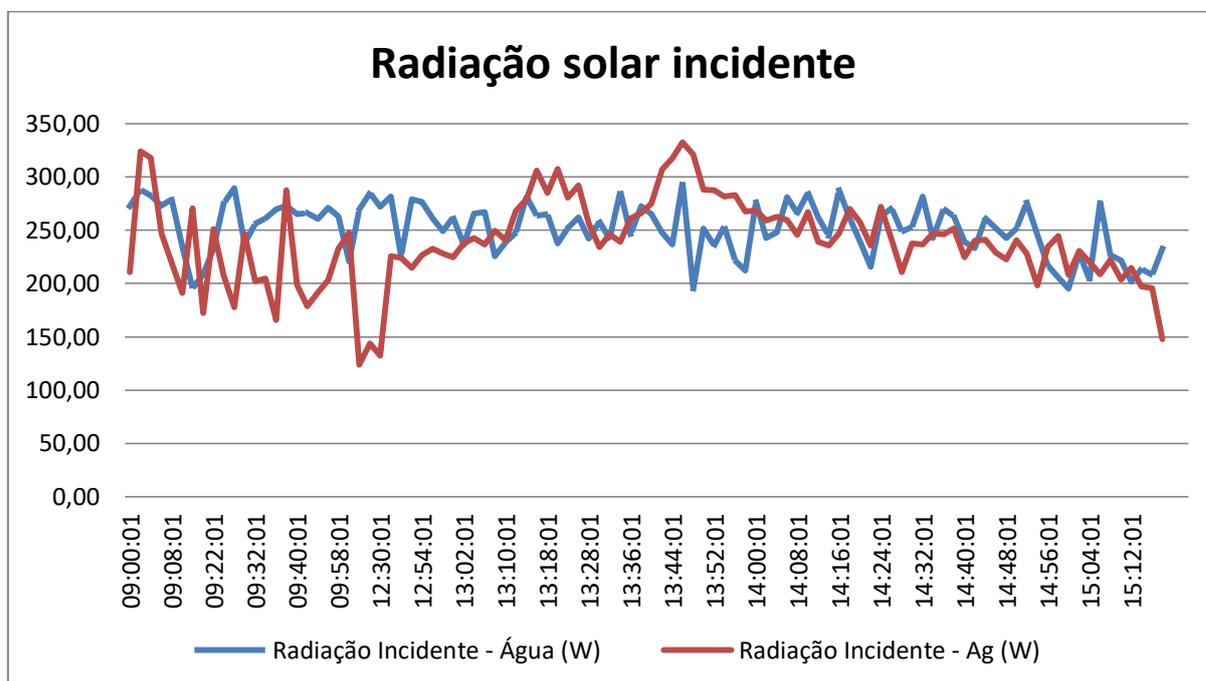
5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nessa parte são apresentados os resultados obtidos a partir dos testes realizados com água e nanofluido de prata como fluidos de trabalho. São apresentados os gráficos da radiação solar incidente, temperatura na “Parede Solar” e eficiências de 1ª e 2ª leis da termodinâmica, comparando os dados obtidos com água e com o nanofluido. Os testes foram feitos no dia 27/04/2021 com água e no dia 08/07/2021 com nanofluido de prata. Os dados utilizados estão entre 9h e 17h locais.

5.1 Ângulo de Incidência e Radiação Solar Incidente

A radiação incidente no coletor solar é composta pela radiação solar direta e pela radiação solar difusa, as duas medidas por piranômetros. A radiação solar direta é a que incide normal à superfície do coletor, logo é dependente do ângulo de incidência ao longo do dia. A radiação solar difusa é a que o coletor absorve depois da radiação solar ser refletida em outros obstáculos. Devido à posição do coletor solar, com normal paralela ao solo, aproximadamente ao meio-dia a radiação solar direta cai drasticamente, porém como pode ser visto no Gráfico 2, o coletor ainda continua absorvendo radiação da parcela difusa.

Gráfico 1 - Radiação solar incidente



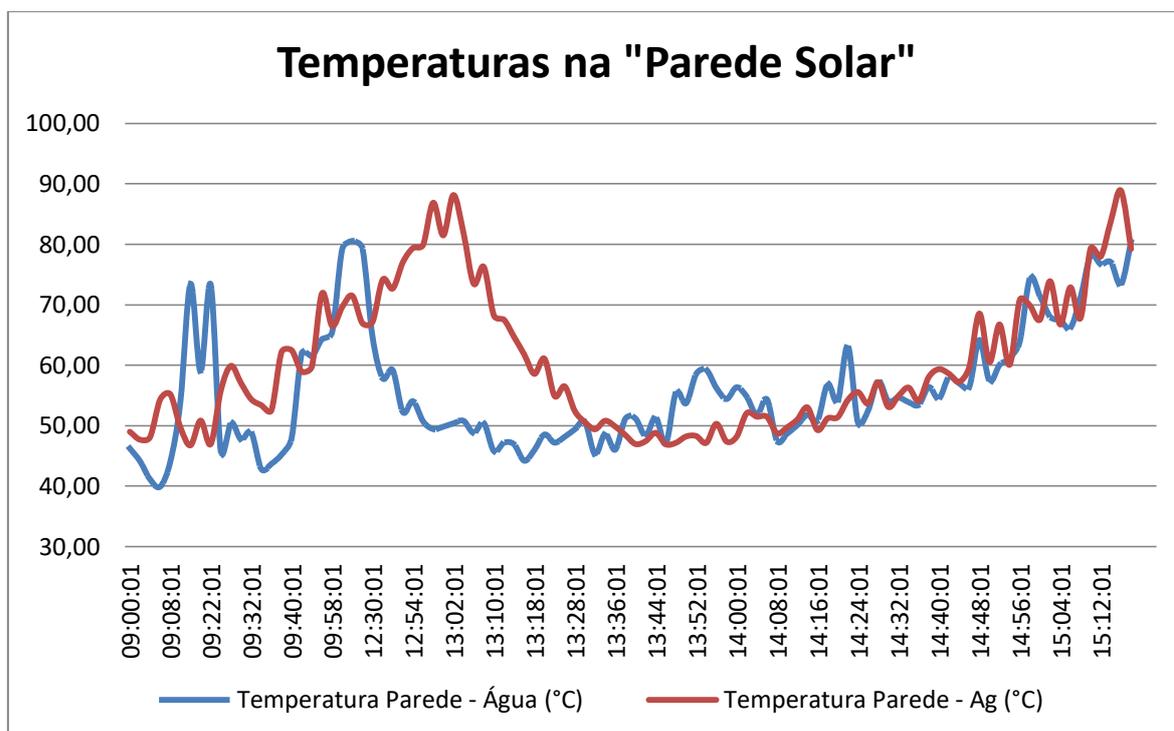
Fonte: Próprio autor

5.2 Temperatura na “parede solar”

O Gráfico 3 apresenta os resultados dos cálculos da temperatura na parede solar utilizando a Equação 3, balanço de exergia. Pode-se observar que até 12h há uma oscilação nos resultados com picos de temperatura, o que é esperado devido a incidência de radiação solar e um pico aproximadamente às 12h quando o Sol está com ângulo de incidência de quase 90°. Isso é aceitável, pois a “Parede solar” absorve também a radiação solar difusa, o que mesmo com ângulo de incidência próximo de 90°, ou seja, baixa incidência de radiação direta, ainda há uma absorção considerável de calor. Após 12h fica nítida a tendência de aumento da temperatura na “parede solar” com o passar das horas chegando a se equiparar ao período da manhã no final da tarde. O comportamento das duas curvas, tanto da água quanto do nanofluido são similares.

Segundo Kizildag *et al.* (2022), melhoras no desempenho de coletores solares térmicos de placa plana podem levar a temperaturas do fluido de trabalho de até 80°C. Considerando que no presente experimento temos um coletor solar de absorção direta, pode-se dizer que ele está dentro dos parâmetros de trabalho atingidos por outros coletores.

Gráfico 2 - Temperatura na "Parede Solar"



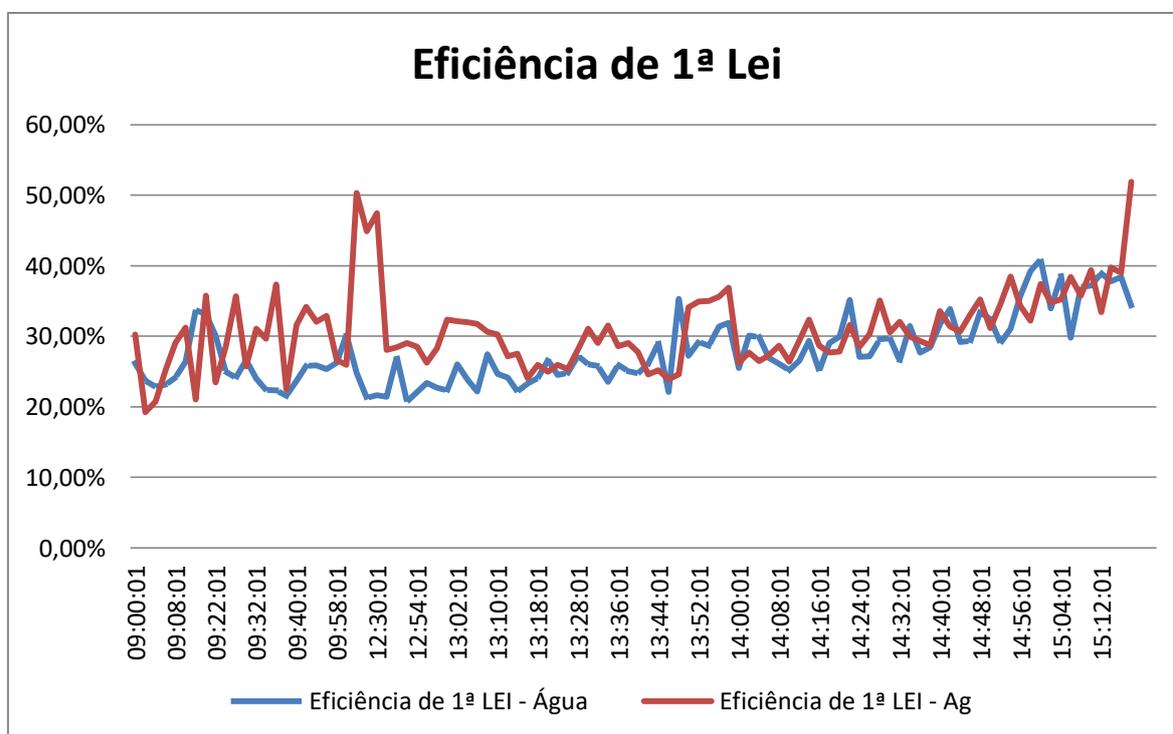
Fonte: Próprio autor

5.3 Eficiência de 1ª Lei da termodinâmica

Como pode ser observado no gráfico 3, resultado dos cálculos utilizando a equação 4, na maior parte do período, a eficiência de 1ª Lei é superior para o nanofluido se comparada com a da água destilada, chegando a picos de 51,95% de eficiência. Isso significa um aumento de até 25,82% em relação a eficiência utilizando água como fluido de trabalho, em alguns pontos.

Os resultados estão condizentes com estudos recentes. Segundo Ajeena, Farkas e Víg (2023), em experimento realizado em coletor solar de placa plana utilizando nanofluido, conseguiram aumentos de eficiência térmica de até 31,64%, se comparado com a utilização de água destilada.

Gráfico 3 - Eficiência de 1ª Lei da termodinâmica



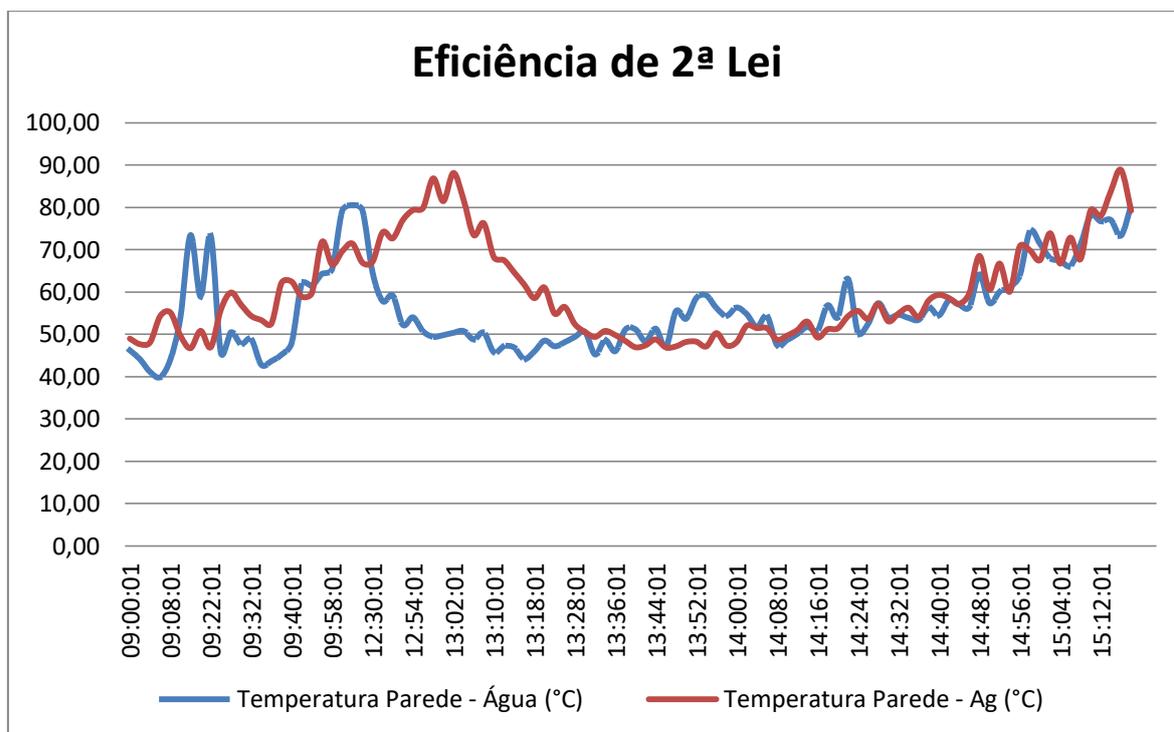
Fonte: Próprio autor

5.4 Eficiência de 2ª Lei da termodinâmica

A eficiência de 2ª Lei apresentou resultados baixos, porém consistentes com os dados medidos e calculados. Pode-se observar, no Gráfico 4, resultado dos cálculos utilizando a equação 5, que a curva acompanha aproximadamente a temperatura na “Parede solar” ao longo do período observado.

Os resultados estão dentro do esperado. Segundo Nikolic *et al.* (2022), testes realizados com coletores solares de placa plana obtiveram resultados de eficiência exergética entre 0,5% e 4%, logo os testes realizados no presente trabalho estão consistentes com resultados obtidos em estudos recentes. Destaca-se que a utilização do nanofluido resultou, em alguns pontos, no aumento de eficiência, chegando a ser o dobro da atingida usando-se a água como fluido de trabalho. Logo, pode-se afirmar que a utilização do nanofluido tem grande impacto na eficiência do coletor.

Gráfico 4 - Eficiência de 2ª Lei da termodinâmica



Fonte: Próprio autor

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A radiação incidente é um dos destaques para esse tipo de coletor solar, pois o coletor solar de placa plana na configuração dos testes realizados no presente trabalho consegue obter uma incidência de radiação solar durante, praticamente, todo o período de Sol por causa da incidência da radiação difusa e capacidade de incidência pelos dois lados do coletor.

Juntando-se a essa maior capacidade de receber radiação incidente, tem-se a melhora na capacidade de absorção de calor do nanofluido. Como visto antes, a utilização do nanofluido melhora a variação de temperatura da entrada em relação à saída, e melhores diferenças de temperatura fornecem melhores eficiências. Como mostrado por Amorim Neto (2020), o desempenho do nanofluido de prata comparado com o dióxido de titânio foi bem superior, mostrando um aumento de temperatura de 26% em comparação com 5% do nanofluido com titânio.

Estudos feitos por Ajeena, Farkas e Víg (2023), mostram que coletores solares de placa plana obtiveram valores de melhora na eficiência térmica (1ª Lei), da ordem de 31,64%, com a utilização de nanofluido em comparação com a utilização de água destilada. No presente trabalho foram obtidos valores de aumento de eficiência de 1ª Lei da ordem de 25,82%, condizente com os recentes estudos apresentados.

Como mostrado por Nikolic *et al.* (2022), desempenhos de coletores solares de placa plana obtiveram eficiências de 2ª Lei que variam entre 0,5% e 4%, o que caracteriza baixas eficiências, já esperado para esse tipo de coletor. No presente trabalho foram obtidas com o nanofluido eficiências acima de 0,6%, dentro da faixa obtida para os experimentos do estudo citado. Se compararmos com os resultados obtidos com água, que ficaram em torno de 0,3%, como máxima, tem-se um aumento de eficiência de mais de 100%.

O experimento realizado é passível de variações de parâmetros de teste, o que não pode ser feito por causa das condições da época dos testes. Parâmetros como fluxo de massa do fluido de trabalho é algo a ser variado para comparar qual melhor fluxo se adapta ao tipo de coletor e nanofluido.

Outro parâmetro a ser analisado em estudo posterior é a variação dos nanofluidos como fluido de trabalho. Podem ser realizados testes, trocando o tipo de nanofluido concomitantemente com a troca dos fluxos, seriam mais testes para uma melhor avaliação do comportamento do aparato como um todo.

REFERÊNCIAS

AHMAD, Asim *et al.* Parabolic trough solar collectors: a sustainable and efficient energy source. **Materials Science For Energy Technologies**, [s.l.], v. 7, p. 99-106, 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.mset.2023.08.002>.

AJEENA, Ahmed M.; FARKAS, Istvan; VÍG, Piroska. Performance enhancement of flat plate solar collector using ZrO₂-SiC/DW hybrid nanofluid: a comprehensive experimental study. **Energy Conversion And Management**: X, [s.l.], v. 20, p. 1-29, out. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecmx.2023.100458>.

AJEENA, Ahmed M.; VÍG, Piroska; FARKAS, Istvan. A comprehensive analysis of nanofluids and their practical applications for flat plate solar collectors: fundamentals, thermophysical properties, stability, and difficulties. **Energy Reports**, [s.l.], v. 8, p. 4461-4490, nov. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.088>.

ALAWI, Omer A. *et al.* Nanofluids for flat plate solar collectors: fundamentals and applications. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 291, p. 1-32, abr. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125725>.

AMORIM NETO, Juarez Pompeu de. **Modelagem numérica e experimental de uma "parede solar" utilizando nanofluidos de prata e dióxido de titânio**. 2020. 56 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Mecânica), Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/461/simple-search?filterquery=Amorim+Neto%2C+Juarez+Pompeu+de&filtername=author&filtertype>equals>. Acesso em: 10 out. 2023.

CHEN, Yaowen *et al.* Energy, exergy, and economic analysis of a solar photovoltaic and photothermal hybrid energy supply system for residential buildings. **Building And Environment**, [s.l.], v. 243, n. 1, p. 1-21, set. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110654>.

HANS, Bracamonte-Baran Johane; LEONARDO, Baritto-Loreto Miguel. Análisis de las irreversibilidades en colectores solares de placas planas no isotérmicos para calentamiento de aire utilizando un modelo adimensional. **Ingeniería, Investigación y Tecnología**, [s.l.], v. 14, n. 2, p. 237-247, abr. 2013. Universidad Nacional Autónoma de México. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/s1405-7743\(13\)72239-x](http://dx.doi.org/10.1016/s1405-7743(13)72239-x).

HAZRA, S.K.; NANDI, T.K.. Performance prediction and determination of optimum optical property of the nanofluid for energy storage in direct absorption solar collectors. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], v. 233, p. 1-17, out. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121189>.

KALSI, Sujata *et al.* Thermophysical properties of nanofluids and their potential applications in heat transfer enhancement: a review. **Arabian Journal Of Chemistry**, [s.l.], v. 16, n. 11, p. 1-18, nov. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.arabjc.2023.105272>.

KHARE, Vikas; CHATURVEDI, Pradyumn; MISHRA, Manoj. Solar energy system concept change from trending technology: a comprehensive review. **E-Prime - Advances In Electrical Engineering, Electronics And Energy**, [s.l.], v. 4, p. 1-20, jun. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.prime.2023.100183>.

KIZILDAG, D. *et al.* First test field performance of highly efficient flat plate solar collectors with transparent insulation and low-cost overheating protection. **Solar Energy**, [s.l.], v. 236, p. 239-248, abr. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.solener.2022.02.007>.

LIU, Bofan *et al.* Should Asia Pacific economic cooperation countries put all their eggs in one energy basket? Examining the linkage between energy diversification and sustainable development. **Energy Policy**, [s.l.], v. 179, p. 1-7, ago. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.enpol.2023.113619>.

MEHTA, Bhavin *et al.* Synthesis, stability, thermophysical properties and heat transfer applications of nanofluid – A review. **Journal Of Molecular Liquids**, [s.l.], v. 364, p. 1-29, out. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.molliq.2022.120034>.

MUDIDANA, Ravi Kiran; MIDITANA, Vijay; RAMBABU, V.. Synthesis of nanofluids preparation – A review. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], set. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.09.086>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214785323047569?via%3Dihub>. Acesso em: 20 out. 2023.

MUHAMMAD, Yousif *et al.* Rock bed thermal energy storage coupled with solar thermal collectors in an industrial application: simulation, experimental and parametric analysis. **Journal Of Energy Storage**, [s.l.], v. 67, p. 1-14, set. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.est.2023.107349>.

MUKHERJEE, Sayantan *et al.* Nanofluids: critical issues, economics and sustainability perspectives. **Particuology**, [s.l.], v. 87, p. 147-172, abr. 2024. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.partic.2023.06.021>.

NIKOLIC, D. *et al.* Exergy efficiency optimization of photovoltaic and solar collectors' area in buildings with different heating systems. **Renewable Energy**, [s.l.], v. 189, p. 1063-1073, abr. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.renene.2022.03.075>.

OMEIZA, Lukman Ahmed *et al.* Application of solar thermal collectors for energy consumption in public buildings – An updated technical review. **Journal Of Engineering Research**, [s.l.], p. 1-17, set. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jer.2023.09.011>.

PARSA, Seyed Masoud *et al.* A critical analysis on the energy and exergy performance of photovoltaic/thermal (PV/T) system: the role of nanofluids stability and synthesizing method. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [s.l.], v. 51, p. 1-15, jun. 2022. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2021.101887>.

PATHAK, Yogeshkumar; SALUNKE, Nilesh P.; DAMLE, Prajitsen G.. Effect of nano materials for the nano fluids in solar thermal energy: a review on applications in solar collector. **Materials Today: Proceedings**, Maharashtra, p. 1-4, abr. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2023.04.344>.

ROCHA, P. A. C. *et al.* A REVIEW ON NANOFLUIDS: preparation methods and applications. **Periódico Tchê Química**, [s.l.], v. 16, n. 31, p. 365-380, 20 jan. 2019. Dr. D. Scientific Consulting. DOI: http://dx.doi.org/10.52571/ptq.v16.n31.2019.371_periodico31_pgs_365_380.pdf.

SAID, Zafar *et al.* Nanofluids-based solar collectors as sustainable energy technology towards net-zero goal: recent advances, environmental impact, challenges, and perspectives. **Chemical Engineering And Processing - Process Intensification**, [s.l.], v. 191, n. 1, p. 1-41, set. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cep.2023.109477>.

SAMATAR, Abdullahi Mohamed *et al.* The utilization and potential of solar energy in Somalia: current state and prospects. **Energy Strategy Reviews**, [s.l.], v. 48, n. 1, p. 1-15, jul. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.esr.2023.101108>.

SARLOBETTER. **Motobomba SB2000**. 2023. Disponível em: <<https://gruposarlo.com.br/produto/motobomba-sb2000/>>. Acesso em: 27 set. 2023.

SHAHSAVAR, Amin *et al.* A comprehensive review on the application of nanofluids and PCMs in solar thermal collectors: energy, exergy, economic, and environmental analyses. **Journal Of The Taiwan Institute Of Chemical Engineers**, [s.l.], v. 148, p. 1-20, jul. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jtice.2023.104856>.

SINGH, Gaurav *et al.* A review of inclusion of nanofluids on the attainment of different types of solar collectors. **Materials Today: Proceedings**, [s.l.], v. 38, n. 1, p. 153-159, 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2020.06.238>.

SRIHARAN, G.; HARIKRISHNAN, S.; OZTOP, Hakan F.. A review on thermophysical properties, preparation, and heat transfer enhancement of conventional and hybrid nanofluids utilized in micro and mini channel heat sink. **Sustainable Energy Technologies And Assessments**, [s.l.], v. 58, p. 1-18, ago. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.seta.2023.103327>.

XIONG, Qingang *et al.* State-of-the-art review of nanofluids in solar collectors: a review based on the type of the dispersed nanoparticles. **Journal Of Cleaner Production**, [s.l.], v. 310, p. 1-20, ago. 2021. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127528>.

YU, Qiongwang *et al.* Numerical and experimental study of a novel vacuum Photovoltaic/thermal (PV/T) collector for efficient solar energy harvesting. **Applied Thermal Engineering**, [s.l.], p. 1-15, set. 2023. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121580>.