



UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ELETRÔNICA E SISTEMAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA ELÉTRICA

CAIO VINICIUS PINHEIRO VITAL

**NANOPARTÍCULAS PLASMÔNICAS E SISTEMA LENTICULAR DE
CONCENTRAÇÃO ÓPTICA PARA COLETORES SOLARES DE ABSORÇÃO DIRETA**

Recife

2023

CAIO VINICIUS PINHEIRO VITAL

**NANOPARTÍCULAS PLASMÔNICAS E SISTEMA LENTICULAR DE
CONCENTRAÇÃO ÓPTICA PARA COLETORES SOLARES DE ABSORÇÃO DIRETA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica.

Área de Concentração: Fotônica.

Orientador: Prof. Dr. Renato Evangelista de Araujo.

Coorientador: Prof. Dr. Luis Arturo Gómez-Malagón.

Recife

2023

Catálogo na fonte:
Bibliotecária Sandra Maria Neri Santiago, CRB-4 / 1267

- V836n Vital, Caio Vinicius Pinheiro.
Nanopartículas plasmônicas e sistema lenticular de concentração óptica para coletores solares de absorção direta / Caio Vinicius Pinheiro Vital. – 2023.
106 f.: il., fig., quad., tab., abrev. e siglas.
- Orientador: Prof. Dr. Renato Evangelista de Araujo.
Coorientador: Prof. Dr. Luis Arturo Gómez-Malagón.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica. Recife, 2023.
Inclui referências.
1. Engenharia elétrica. 2. Coletor solar de absorção direta. 3. Nanofluido. 4. Energia solar. I. Araujo, Renato Evangelista de (Orientador). II. Gómez-Malagón, Luis Arturo (Coorientador). III. Título.
- UFPE
- 621.3 CDD (22. ed.) BCTG/2022-33

CAIO VINICIUS PINHEIRO VITAL

**NANOPARTÍCULAS PLASMÔNICAS E SISTEMA LENTICULAR DE
CONCENTRAÇÃO ÓPTICA PARA COLETORES SOLARES DE ABSORÇÃO
DIRETA**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Elétrica da Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, como requisito parcial para a obtenção do título de Doutor em Engenharia Elétrica. Área de Concentração: Fotônica.

Aprovada em: 19/01/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof. Dr. Renato Evangelista de Araujo (Orientador e Examinador Interno)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. Albert Stevens Reyna Ocas (Examinador Externo)
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Prof. Dr. Anderson Stevens Leonidas Gomes (Examinador Externo)
Universidade Federal de Pernambuco

Prof. Dr. João Fausto Lorenzato de Oliveira (Examinador Externo)
Universidade de Pernambuco

Prof^a. Dr^a. Olga de Castro Vilela (Examinadora Externa)
Universidade Federal de Pernambuco

Dedico este trabalho aos meus pais.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, Francisco e Odilma por todo o amor, suporte e por todas as renúncias em prol da família.

Ao meu irmão, Luís Filipe, pela amizade, companheirismo e paciência.

Ao meu orientador, Prof. Renato Evangelista de Araujo, pela amizade, confiança, pela compreensão nos momentos difíceis e por todos os ensinamentos concedidos durante o desenvolvimento do trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Luis Arturo Gómez-Malagón, por ter me dado a oportunidade de ingressar na carreira acadêmica, pela amizade, disponibilidade, confiança e pelos ensinamentos concedidos ao longo de todos esses anos.

Ao Prof. Diego Rativa, pela amizade, paciência e pela confiança. Agradeço também pelas oportunidades e pelo companheirismo ao longo do desenvolvimento do trabalho.

Ao Dr. Sajid Farooq pelos ensinamentos e pela cooperação no desenvolvimento do trabalho.

Aos demais membros do LOBI, Túlio Pedrosa, Raphael Baltar, Gabrielli de Oliveira, Olavo Cardozo, Caio Judá, Fábio Rodrigo, Carlos López, Mariana, Denise, Iasmim e Arthur.

A todos os docentes, discentes e servidores do PPGEE. Especialmente a Andrea Tenório por sua disponibilidade e profissionalismo.

Aos amigos e colegas do IIT/UPE, Prof. Ricardo Ataíde, Lorena Guimarães, Filipe Diniz, Glaucyevann Guimarães, Marcelo Bouçanova, Ailton Gonçalves, Erick Douglas, Welton Barreto, Elyson, Luís, Sílvio Nascimento, Hugo Fonsêca, João, Marcos e Gustavo.

À Universidade de Pernambuco por disponibilizar as instalações do IIT para a realização dos experimentos.

A todos os professores que contribuíram para a minha formação ao longo de toda a vida.

Aos demais amigos e familiares pelo apoio e pela compreensão em relação às ausências necessárias ao longo dos últimos anos.

Às demais pessoas que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho.

À CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) pelo financiamento do trabalho.

RESUMO

O aumento da participação de fontes renováveis na matriz energética mundial é uma contribuição fundamental para a redução da emissão global de gases de efeito estufa. Neste sentido, O uso térmico da energia solar tem potencial para suprir a demanda de calor para diferentes processos. Coletores solar de absorção direta são dispositivos utilizados para converter a radiação solar em calor em um fluido de trabalho. Em particular, coloides de nanoestruturas plasmônicas, capazes de apresentar o fenômeno de ressonância de plasmon de superfície localizado, podem ser utilizados como fluido de trabalho para coletor solar de absorção direta. Entretanto, o uso desses fluidos é limitado por fatores como estabilidade coloidal, elevado custo de produção e aumento da potência de bombeamento nos sistemas térmicos que os utilizam. Neste trabalho, são abordadas propostas para transposição desses obstáculos: o uso de nanofluidos compostos por nanopartículas plasmônicas de diferentes materiais e morfologias em coletores solares de absorção direta. São avaliados coletores utilizando nanofluidos compostos por nanopartículas com largo espectro de absorção: nanocascas de ouro dopadas com ferro, nanoesferas de nitretos metálicos, nanogaiolas metálicas e nanofluidos híbridos com nanoelipsoides metálicos. A modelagem das propriedades ópticas dos fluidos é realizada utilizando Teoria de Mie e simulações numéricas no software *COMSOL Multiphysics*. O espectro de absorção do nanofluido híbrido com nanoelipsoides é otimizado via algoritmo genético. Também é investigado o uso de sistemas lenticulares para concentração de luz em coletores de absorção direta, visando reduzir a quantidade de nanofluido necessária à operação e um maior ganho de temperatura no coletor. A modelagem térmica dos coletores solares é feita utilizando Método das Diferenças Finitas aplicado a um modelo de transferência de calor em duas dimensões. Para o coletor de absorção direta lenticular, também é realizada análise de óptica geométrica via elementos finitos no software *COMSOL Multiphysics*. Adicionalmente, são realizadas caracterizações térmicas experimentais de alguns nanofluidos e do coletor de absorção direta lenticular. Os resultados mostram que coletores utilizando as nanoestruturas exploradas no trabalho possuem desempenho superior a coletores que utilizam nanoestruturas plasmônicas reportadas anteriormente, apresentando maiores eficiências energética e exergética em regimes baixa concentração de partículas. Foram obtidas eficiências energéticas máximas de 95% com nanocascas de ouro dopado com ferro, 89% com nanopartículas de nitretos metálicos, 90% com nanogaiolas metálicas e 90% com nanofluidos híbridos de nanoelipsoides. O uso do sistema lenticular resulta em coletores com eficiência energética similar e eficiência exergética até 142% superior à de coletores de absorção direta tradicionais. A partir das abordagens propostas, é possível obter coletores de alta performance com quantidades reduzidas de nanofluidos em regime de baixa concentração.

Palavras-chave: coletor solar de absorção direta; nanofluido; energia solar.

ABSTRACT

The increase in the share of renewable sources in the global energy matrix is a key contribution to reducing greenhouse gas emissions. In this sense, the thermal use of solar energy has the potential to supply heat demand for different processes. Direct absorption solar collectors are devices that convert solar radiation into heat in a working fluid. In particular, colloids of plasmonic nanostructures, presenting the phenomenon of localized surface plasmon resonance, can be used as a working fluid for direct absorption solar collectors. However, the use of these fluids is limited by factors such as colloidal stability, high production cost, and increased pumping power in thermal systems that use them. In this work, proposals are addressed to overcome these obstacles: the use of nanofluids composed of plasmonic nanoparticles of different materials and morphologies in direct absorption solar collectors is investigated. Nanofluids composed of iron-doped gold nanoshells, metallic nitride nanospheres, metallic nanocages, and hybrid nanofluids with metallic nanoellipsoids are explored. The optical properties of the fluids are modeled using Mie Theory and numerical simulations in the COMSOL Multiphysics software. The absorption spectrum of the hybrid nanofluid with nanoellipsoids is optimized via genetic algorithm. Also, the use of lenticular systems for light concentration in direct absorption collectors is investigated. The thermal modeling of solar collectors is conducted using the Finite Difference Method applied to a two-dimensional heat transfer model. For the lenticular direct absorption collector, ray optics analysis via finite elements in the COMSOL Multiphysics software is also performed. In addition, experimental thermal characterizations of some nanofluids and the lenticular direct absorption collector were carried out. Results show that collectors using the proposed nanostructures perform better than devices with other plasmonic nanostructures, presenting higher energy and exergy efficiencies in a low particle concentration regime. Maximum energy efficiencies were 95% with iron-doped gold nanoshells, 89% with metallic nitride nanoparticles, 90% with metallic nanocages and 90% with hybrid nanofluids of nanoellipsoids. With the lenticular system, collectors with similar energy efficiency and exergy efficiency up to 142% higher than traditional direct absorption collectors are obtained. The proposed approaches reveal that it is possible to obtain high-performance collectors with small amounts of nanofluid in a low-concentration regime.

Keywords: direct absorption solar collector; nanofluid; solar energy.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Demanda de energia térmica na indústria brasileira	20
Figura 2 – Uso de chuveiros com aquecimento no Brasil.	20
Figura 3 – Diagrama esquemático de um SAS.	21
Figura 4 – Taça de Licurgo, com aparência (a) esverdeada pela luz refletida (iluminada de fora para dentro) e (b) avermelhada pela luz transmitida (iluminada de dentro para fora).	25
Figura 5 – Evolução da quantidade de publicações que contêm simultaneamente “ <i>Nanofluid</i> ” e “ <i>Solar</i> ” no título ao longo dos últimos anos.	26
Figura 6 – Diagrama esquemático de um CSAD	29
Figura 7 – Comparação entre as perdas térmicas em absorvedores (a) superficiais e (b) volumétricos para uma mesma quantidade de calor acumulado.	30
Figura 8 – Evolução da quantidade de publicações relacionadas a coletores solares de absorção direta ao longo dos últimos anos.	31
Figura 9 – Oscilação da nuvem de elétrons da NP induzida por um campo elétrico harmônico.	35
Figura 10 – Permissividade de metais nobres comparados à condição de Fröhlich para água como meio hospedeiro.	37
Figura 11 – Representação de um DASC em (a) 3D e (b) 2D.	39
Figura 12 – Modelagem da transferência de calor no DASC.	40
Figura 13 – Exemplo de curva de eficiência de um coletor solar térmico.	42
Figura 14 – Domínio computacional no software <i>COMSOL Multiphysics</i>	44
Figura 15 – Modelo do CSAD Lenticular. (a) CSAD tradicional; (b) CSAD Lenticular; (c) Sistema lenticular com lentes cilíndricas; (d) Sistema lenticular com lentes fresnel.	46
Figura 16 – Geometrias do CSAD Lenticular exploradas no software <i>COMSOL Multiphysics</i>	47
Figura 17 – Descrição de um elipsoide.	48
Figura 18 – Fluxograma do algoritmo genético customizado utilizado no trabalho.	49
Figura 19 – Exemplo de uma população com 5 indivíduos.	49
Figura 20 – Mecanismos de crossover e mutação no algoritmo genético.	50
Figura 21 – Irradiância espectral normalizada para o simulador solar e o espectro ASTM G173-03.	52
Figura 22 – Diagrama esquemático do experimento para caracterização térmica de nanofluidos.	52
Figura 23 – Processo de fabricação dos protótipos de CSAD. (a) Peças em PLA; (b) Moldes em borracha de silicone; (c) Peças em resina epóxi transparente.	53
Figura 24 – Configuração experimental para ensaios com CSAD lenticular.	54

Figura 25 – Ilustração da nanocasca utilizada no NF para o CSAD.	56
Figura 26 – Parte real (a) e imaginária (b) da permissividade para o ouro dopado com ferro em diferentes níveis de dopagem.	56
Figura 27 – Seções de choque de (a) absorção e (b) espalhamento e fator de albedo (c) para nanocascas de ouro com raio interno de 60 nm e espessura de 20 nm para diferentes dopagens.	57
Figura 28 – Coeficiente de absorção ponderado (A_m) em função da fração volumétrica (p) e da espessura do coletor (H) para nanocascas de (a) ouro puro, (b) liga com 5% Fe - 95% Au, (c) liga com 10% Fe - 90% Au e (d) liga com 15% Fe - 85% Au.	58
Figura 29 – Perfis de temperatura para CSAD utilizando NFs com nanocascas de ouro puro (a) e (c) e ouro dopado com ferro (b) e (d). Foram analisados os casos em que $T_{in} = T_{amb}$ (a) e (b) e $T_{in} = T_{amb} + 50$ K (c) e (d).	58
Figura 30 – Curva de eficiência energética para CSAD utilizando NF com nanocascas de ouro puro e nanoesferas de ouro dopado com ferro.	59
Figura 31 – Eficiência energética de CSAD com nanocascas de ouro em função (a) da fração volumétrica do NF (com $H = 1$ cm) e (b) da espessura do coletor (com $p = 2 \times 10^{-5}$).	60
Figura 32 – Parte real (a) e imaginária (b) da permissividade para os nitretos metálicos e ouro. A linha tracejada em (a) indica a condição de Fröhlich.	61
Figura 33 – Seções transversais de (a) absorção e (b) espalhamento e (c) fator de albedo para nanoesferas com raio de 20 nm compostas por nitretos metálicos e ouro.	61
Figura 34 – (a-d) Irradiância espectral ao longo de uma camada de NF com $a = 20$ nm, $p = 5 \times 10^{-5}$ e $H = 1$ cm. (e-h) Irradiâncias espectrais em $y = 0$ e $y = H = 1$ cm.	62
Figura 35 – (a) Amostras dos NFs de ouro e nitreto de titânio. (b) NF de nitreto de titânio e (c) NF de ouro sob iluminação do simulador solar.	63
Figura 36 – Caracterização térmica dos NFs de nitreto de titânio e ouro.	63
Figura 37 – Coeficiente de absorção ponderado (A_m) em função da fração volumétrica (p) e da espessura do coletor (H).	64
Figura 38 – Perfis de temperatura para CSAD utilizando NFs de Au (a,e), TiN (b,f), ZrN (c,g) e HfN (d, h). Foram analisados os casos em que $T_{in} = T_{amb}$ (a-d) e $T_{in} = T_{amb} + 50$ K (e-h).	64
Figura 39 – Eficiência energética do CSAD com nitretos em função (a) da fração volumétrica (com $H = 1$ cm) e (b) da espessura do coletor (com $p = 5 \times 10^{-5}$).	65
Figura 40 – Eficiência energética do CSAD com nitretos em função (a) do raio da NP e (b) da temperatura de entrada normalizada (com $p = 5 \times 10^{-5}$ e $H = 1$ cm).	66

Figura 41 – Eficiência exergética do CSAD com nitretos em função (a) da fração volumétrica (com $H = 1$ cm) e (b) da temperatura de entrada do fluido no coletor (com $p = 5 \times 10^{-5}$ e $H = 1$ cm).	66
Figura 42 – Ilustração do processo de formação de nanogaiolas metálicas.	67
Figura 43 – (a) Espectro de absorção de nanogaiolas metálicas e (b) microscopia eletrônica de transmissão das nanogaiolas com pico de absorção em 635 nm.	68
Figura 44 – (a) Espectro de absorção de NFs com nanoesferas de ouro com raio $a = 25$ nm e nanogaiolas metálicas comparados ao espectro solar. (b) Espectros de radiação absorvida por nanoesferas de ouro e nanogaiolas metálicas com $p = 10^{-6}$ e $H = 1$ cm.	69
Figura 45 – Coeficiente de absorção ponderado (A_m) em função da concentração e da espessura para os NFs contendo (a) nanoesferas de ouro e (b) nanogaiolas metálicas.	69
Figura 46 – (a) Variação na temperatura do NF com nanogaiolas metálicas em função do tempo e (b) ganho máximo de temperatura em função da fração volumétrica.	71
Figura 47 – (a) Conversão fototérmica de NFs com nanogaiolas metálicas e nanoesferas de ouro.	71
Figura 48 – Eficiência energética de um CSAD utilizando nanogaiolas metálicas e nanoesferas de ouro em função (a) da fração volumétrica (com $H = 1$ cm) e (b) da espessura do coletor (com $p = 10^{-6}$. Foi adotado $U = 0,002$ m/s.	72
Figura 49 – Curvas de eficiência energética de um CSAD utilizando nanogaiolas metálicas e nanoesferas de ouro em função da temperatura normalizada ($p = 10^{-6}$; $H = 1$ cm); $U = 0,002$ m/s.	72
Figura 50 – Nanoelipsoides de ouro e prata com diferentes valores de razão de aspecto.	73
Figura 51 – Seções de choque de absorção para nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata.	74
Figura 52 – Coeficientes ponderados de absorção solar para NFs com nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata com $H = 1$ cm.	74
Figura 53 – Melhora nos valores de A_m devido ao uso de NFs híbridos otimizados com nanoelipsoides.	75
Figura 54 – Coeficientes de atenuação para os NFs com diferentes tipos de nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata para $p = 0,2 \times 10^{-6}$ e $H = 1$ cm.	76
Figura 55 – Radiação absorvida por NFs com diferentes tipos de nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata para $p = 0,2 \times 10^{-6}$ e $H = 1$ cm.	76
Figura 56 – Proporções relativas das NPs com diferentes morfologias na composição dos NFs otimizados com NPs (a) de ouro e (b) de prata.	77
Figura 57 – Seções de choque de absorção das NPs utilizadas no NF híbrido com ouro e prata.	78
Figura 58 – Concentrações relativas dos diferentes tipos de NPs utilizadas no NF híbrido utilizando ouro e prata.	78

Figura 59 – Coeficientes de absorção solar ponderados para os NFs híbridos otimizados utilizando ouro, prata e combinação de ouro e prata (com $H = 1$ cm).	79
Figura 60 – Aumento na performance pela utilização de NF híbrido com NPs de ouro e prata em relação a NFs híbridos utilizando NPs exclusivamente de (a) ouro e (b) prata.	79
Figura 61 – Eficiências (a) energética e (b) exergética de um CSAD utilizando NFs com nanoelipsoides.	80
Figura 62 – Coberturas dos coletores de absorção direta construídos.	81
Figura 63 – Orientação do coletor com sistema lenticular.	82
Figura 64 – Análise de direcionalidade comparando coletores com lentes cilíndrica e fresnel.	83
Figura 65 – Diagramas de raios comparando (a) o comportamento da luz num coletor com lente cilíndrica com variação de ângulo e (b) o desempenho de coletores com lentes cilíndrica e fresnel.	84
Figura 66 – Análise de direcionalidade comparando coletores com cavidades cilíndrica e retangular.	85
Figura 67 – (a) Diagramas de raio para diferentes comprimentos de onda de luz incidente. (b) Detalhe do caminho óptico no NF.	85
Figura 68 – (a) Temperatura de saída e eficiência térmica e (b) eficiência exergética de CSAD e L-DASC utilizando NF de TiN e temperatura de entrada $T_{in} = 298$ K.	86
Figura 69 – (a) Protótipos de coletores de absorção direta tradicional e lenticular (a) sem as coberturas e (b) com as coberturas.	86
Figura 70 – Análise direcional do CSAD com sistema lenticular.	87
Figura 71 – Caracterização térmica experimental dos coletores de absorção direta tradicional e lenticular em ensaio indoor.	87
Figura 72 – Caracterização térmica dos coletores de absorção direta tradicional e lenticular em ensaio outdoor.	88

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Principais parâmetros operacionais de um CSAD.	31
---	----

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Coeficiente de absorção solar ponderado para diferentes nanoestruturas plasmônicas.	70
Tabela 2 – Comparativo dos valores de eficiência energética para CSAD com diferentes nanofluidos.	91

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AG	Algoritmo genético
CSAD	Coletor solar de absorção direta
GEE	Gases de efeito estufa
L-CSAD	Coletor solar de absorção direta lenticular
MEF	Método dos elementos finitos
NF	Nanofluido
NP	Nanopartícula
PLA	Polímero poliácido láctico
PML	<i>Perfectly matched layer</i>
RPSL	Ressonância de plasmon de superfície localizado
SAS	Sistema de aquecimento solar
STL	<i>Standard Tessellation Language</i>

LISTA DE SÍMBOLOS

A	Parâmetro adimensional
a	Raio da nanopartícula
A_c	Área do Coletor
A_m	Coefficiente de absorção solar ponderado
AR	Valor da razão de aspecto
C_{nf}	Calor específico do nanofluido
E	Campo elétrico
F_R	Fator de remoção de calor
G_0	Irradiância solar incidente
h	Caminho óptico
H	Espessura do coletor
h_n	Função de Hankel
h_{perdas}	Coefficiente de transferência de calor por convecção
I	Irradiância espectral
I_{abs}	Irradiância espectral absorvida
j_n	Função esférica de Bessel
L	Comprimento do coletor
L_∞	Livre caminho médio dos elétrons
L_{eff}	Livre caminho médio reduzido efetivo
m	Razão entre índices de refração
\dot{m}	Vazão mássica
N_y	Quantidade de linhas na malha de diferenças finitas
p	Fração volumétrica
P_{abs}	Potência absorvida

P_{esp}	Potência espalhada
q_r	Fluxo de calor
T	Temperatura
T_{amb}	Temperatura ambiente
T_{in}	Temperatura de entrada no coletor
T_{sun}	Temperatura do Sol
T_{out}	Temperatura de saída do coletor
U	Velocidade de escoamento
U_L	Coefficiente global de perdas térmicas
v_F	Velocidade de Fermi
V_{np}	Volume da nanopartícula
x	Parâmetro dimensional da nanopartícula
α_0	Absorbância do coletor
α_{nf}	Coefficiente de atenuação do nanofluido
ε	Permissividade
η_{en}	Eficiência energética
η_{ex}	Eficiência exergética
κ_{nf}	Condutividade térmica do nanofluido
λ	Comprimento de Onda
μ	Permeabilidade
ω	Frequência angular
ω_p	Frequência de plasma
ψ_n	Função de Riccati-Bessel
ρ_{nf}	Densidade do nanofluido
σ	Condutividade elétrica
σ_{abs}	Seção de choque de absorção

σ_{esp}	Seção de choque de espalhamento
σ_{ext}	Seção de choque de extinção
τ_0	Transmitância da cobertura do coletor

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	19
1.1	MOTIVAÇÃO	22
1.2	ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO	23
2	REVISÃO DE LITERATURA	25
2.1	NANOFLUIDOS PLASMÔNICOS EM APLICAÇÕES DE ENERGIA SOLAR	25
2.2	COLETORES SOLARES DE ABSORÇÃO DIRETA	29
2.3	PROPRIEDADES ÓPTICAS DE NANOFLUIDOS PLASMÔNICOS	34
2.4	PERFORMANCE DO COLETOR SOLAR DE ABSORÇÃO DIRETA	39
3	MATERIAIS E MÉTODOS	43
3.1	DESCRIÇÃO TEÓRICA	43
3.1.1	Propriedades Ópticas dos Nanofluidos	43
3.1.2	Simulação do Coletor Solar de Absorção Direta	44
3.1.3	Simulação do Coletor de Absorção Direta Lenticular	45
3.1.4	Otimização via Algoritmo Genético	47
3.2	DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL	51
3.2.1	Caracterização Térmica de Nanofluidos	51
3.2.2	Caracterização do Coletor de Absorção Direta Lenticular	53
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	55
4.1	NANOCASCAS DE OURO DOPADAS COM FERRO	55
4.2	NANOFLUIDOS DE NITRETOS DE METAIS DE TRANSIÇÃO	60
4.3	NANOFLUIDOS COM NANOGAIOLAS METÁLICAS	67
4.4	NANOFLUIDOS PLASMÔNICOS HÍBRIDOS COM NANOELIPSOIDES	73
4.5	COLETOR DE ABSORÇÃO DIRETA LENTICULAR	80
5	CONCLUSÃO	89
5.1	TRABALHOS FUTUROS	92
5.2	PRODUÇÃO ACADÊMICA RELACIONADA À TESE	92
5.3	OUTROS ARTIGOS	93
	REFERÊNCIAS	95

1 INTRODUÇÃO

O crescimento da demanda energética global nas últimas décadas e as projeções de ampliação do consumo para os próximos anos ocasionaram a necessidade do aprimoramento de tecnologias para geração de energia a fim de reduzir custos de produção e garantir o fornecimento pleno. Todavia, a expansão do setor energético no último século implicou no aumento de emissões de gases de efeito estufa (GEE) na atmosfera, provocando elevação da temperatura global e consequente aumento da frequência de desastres naturais (CHIEN et al., 2022; MORA et al., 2018).

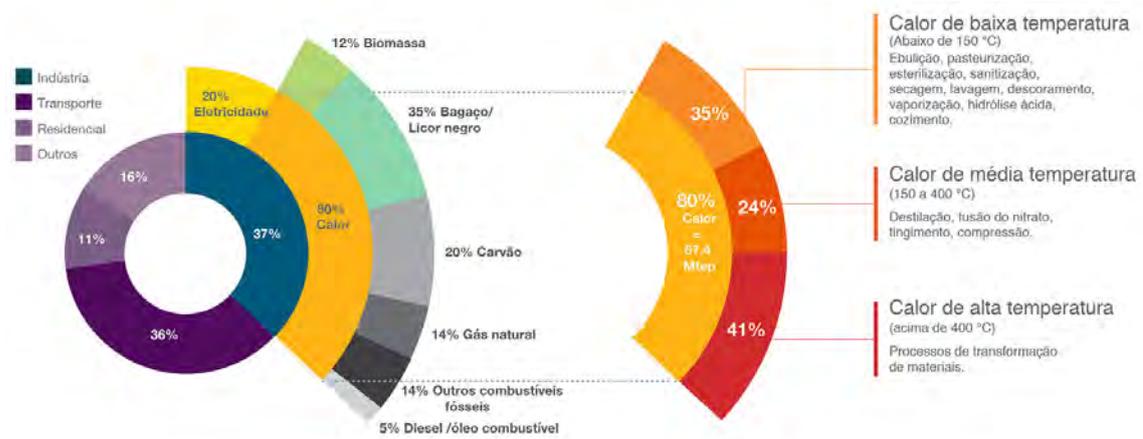
Visando mitigar as consequências de catástrofes naturais e levando em consideração que o setor energético é responsável por 76% das emissões globais de GEE (GE; FRIEDRICH; VIGNA, 2021), é imperativo o aumento da participação das fontes renováveis na matriz energética global. As fontes renováveis de energia representam atualmente apenas 11% da demanda global (REN21, 2021), fato que evidencia a imprescindibilidade do desenvolvimento de tecnologias que viabilizem a redução do impacto do setor energético nas emissões de GEE. A participação das fontes renováveis na matriz energética brasileira é notavelmente superior à média global, apesar da queda de 48,5% em 2020 para 44,7% da energia consumida no país em 2021. O decréscimo na parcela das renováveis deu-se principalmente pela escassez hídricas e consequente acionamento das termelétricas (EPE, 2022). Para compensar o declínio na produção de energia nas hidrelétricas, é importante o aumento da participação das demais fontes renováveis na matriz energética.

O aproveitamento do recurso solar destaca-se no contexto das fontes renováveis devido à abundância de radiação incidente na Terra (CHEN, 2011) e versatilidade de aplicações. Além da conversão fotovoltaica, notória pelo seu significativo desenvolvimento recente, a energia proveniente do sol pode ser utilizada em processos de conversão térmica. Dentre as aplicações térmicas, destacam-se: aquecimento de água para uso residencial e industrial, usinas heliotérmicas (MA et al., 2021), dessalinização (THAKUR et al., 2021), secagem (KAMARULZAMAN; HASANUZZAMAN; RAHIM, 2021) e refrigeração (FIGAJ; ŻOŁĄDEK, 2021).

O uso térmico da energia solar está em expansão global (REN21, 2021) e tem grande potencial de avanço no Brasil, dados os altos níveis de radiação incidente no país e a alta demanda de energia térmica nos setores residencial e industrial. No ano de 2021, apenas 0,8% da energia consumida no Brasil foi gerada a partir da energia solar, dos quais 60% foram gerados por conversão fotovoltaica e 40% por conversão térmica (EPE, 2022).

O setor industrial responde por 37% do consumo energético no país, dos quais 80% são utilizados na geração de calor para processos, como mostrado na Figura 1. Esses valores indicam uma grande oportunidade para o uso de sistemas de aquecimento solar (SAS) para suprimento da demanda térmica, porém esses sistemas são praticamente inexistentes no setor industrial brasileiro (PAYBACK, 2018).

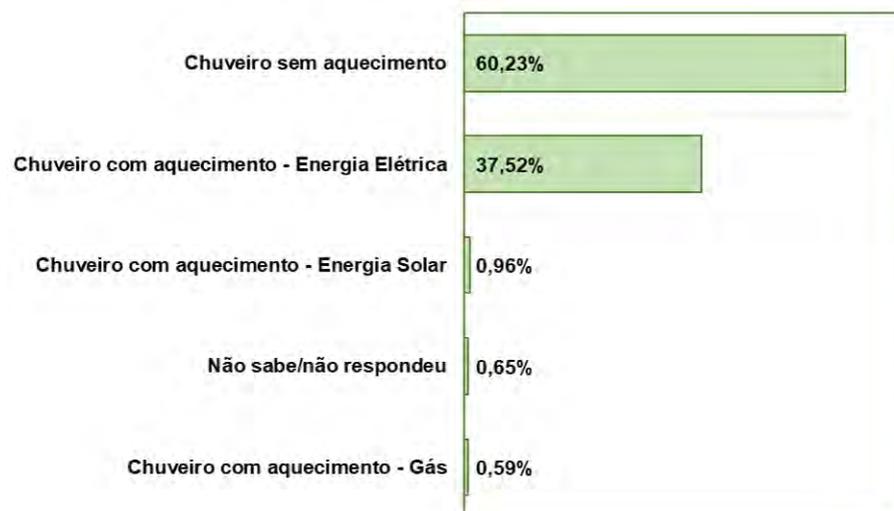
Figura 1 – Demanda de energia térmica na indústria brasileira



Fonte: Payback (2018)

Por outro lado, no setor residencial, a principal aplicação dos SAS é o aquecimento de água para banho, que representa aproximadamente 15% do consumo energético de uma residência brasileira (PROCEL, 2019). Como mostrado na Figura 2, mais de 37% da população brasileira utiliza chuveiros elétricos e menos de 1% utilizam aquecimento solar, o que demonstra o enorme potencial de crescimento dos SAS também nesse setor.

Figura 2 – Uso de chuveiros com aquecimento no Brasil.

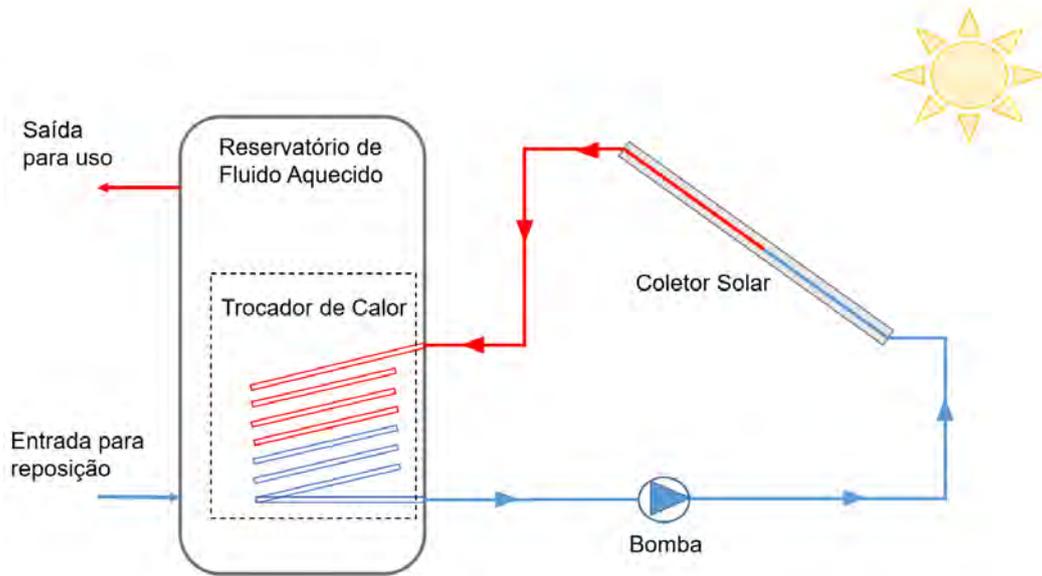


Fonte: PROCEL (2019)

O principal componente de um SAS é o coletor solar: dispositivo que tem como função a conversão da radiação solar em energia térmica, que é transferida a um fluido de trabalho (geralmente água, etilenoglicol, ar, sal fundido ou óleo térmico). Nos SAS que operam em baixas temperaturas (inferiores a 150 °C), os principais tipos de coletores utilizados são o de placa plana e o de tubos evacuados, que realizam a conversão fototérmica a partir de placas absorvedoras. O fluido de trabalho aquecido pelos coletores percorre um circuito fechado e passa

por um trocador de calor, através do qual a energia é transferida para outro fluido contido num reservatório armazenador de calor, como indicado no diagrama da Figura 3.

Figura 3 – Diagrama esquemático de um SAS.



Fonte: O Autor (2023)

O aperfeiçoamento dos coletores solares e o desenvolvimento de novos modelos de dispositivos com alta performance são fatores importantes na melhoria de desempenho dos SAS e consequente fomento da utilização desses sistemas. Neste contexto, uma alternativa aos coletores tradicionais é o coletor solar de absorção direta (CSAD), que apresenta potencial para uso na faixa de baixas temperaturas (TYAGI; PHELAN; PRASHER, 2009).

Os CSAD utilizam fluidos que absorvem radiação solar de forma eficiente, eliminando a necessidade de uma superfície absorvedora (que é necessária no caso dos coletores de placa plana e de tubos evacuados). Dessa forma, o calor obtido é distribuído com maior uniformidade no dispositivo, reduzindo as perdas térmicas para o ambiente em comparação a outros dispositivos termosolares.

O principal componente do CSAD é o seu fluido de trabalho, que deve ser um bom absorvedor de radiação no espectro UV-VIS-NIR, garantindo a conversão da energia fornecida pelo sol em calor. Tintas e corantes foram utilizados como fluidos nas primeiras tentativas de implementação dessa tecnologia (MINARDI; CHUANG, 1975), porém sem êxito. Posteriormente, no final da década de 2000, o desenvolvimento dos CSAD foi retomado com a utilização de fluidos com propriedades termofísicas e propriedades ópticas atraentes: os nanofluidos (NF) (TYAGI; PHELAN; PRASHER, 2009).

Nanofluidos são soluções coloidais compostas por partículas de dimensões nanométricas (nanopartículas) suspensas num fluido base (CHOI; EASTMAN, 1995). Os fluidos base mais utilizados são água, óleos, etilenoglicol, etanol e acetona, enquanto que as nanopartículas (NP)

podem ser compostas de materiais diversos, principalmente metais, óxidos metálicos e materiais baseados em carbono. Inicialmente, os NF foram explorados em aplicações de engenharia térmica por exibir alta condutividade térmica quando comparados aos fluidos de transferência de calor tradicionais. Além disso, o uso de suspensões com partículas em dimensões micrométricas em sistemas térmicos pode causar acúmulos e obstruções em tubulações e equipamentos (EASTMAN et al., 1996), problemas que são evitados com o uso de NFs.

Nanopartículas metálicas apresentam características ópticas determinadas pelo fenômeno de ressonância de plasmon de superfície localizado (RPSL). A RPSL ocorre devido à separação de cargas causada pela interação da luz com os elétrons livres presentes na NP e resulta em propriedades ópticas que dependem do material da NP, da sua morfologia e do meio no qual está dispersa. Assim, é possível identificar NFs com absorção na faixa espectral da radiação solar, permitindo seu uso como fluido de trabalho em CSAD.

A quantidade de energia absorvida por um CSAD é relacionada, além das propriedades ópticas e térmicas do fluido, à espessura da camada de NF utilizada e também é diretamente proporcional à área de coleção quando não há concentração solar. Dessa forma, para coletar quantidades consideráveis de energia, são necessários grandes volumes de NF, o que ocasiona elevação dos custos de produção do coletor.

O volume de NF necessário para operação de um CSAD pode ser reduzido com a utilização de sistemas de concentração, que utilizam espelhos para focalizar a luz proveniente do sol em coletores com área de coleta reduzida (BORTOLATO et al., 2017). Porém, este tipo de coletor demanda o uso de sistemas complexos para ajuste contínuo do posicionamento dos espelhos em relação à posição aparente do sol. Assim, o desenvolvimento de sistemas de concentração solar estruturalmente mais simples pode contribuir para o avanço de CSAD que necessitem de quantidades reduzidas de NF quando comparados a coletores sem concentração.

Uma das formas de obter concentração solar é a partir do uso de sistemas lenticulares de focalização (GÓMEZ-MALAGÓN et al., 2021). O uso desse tipo de sistema combinado com o emprego de NFs de alta absorção óptica no espectro visível tem potencial para aplicação em CSAD com eficiência superior à dos coletores já desenvolvidos.

1.1 MOTIVAÇÃO

Devido a fatores como estabilidade química, biocompatibilidade, e pico de RPSL na faixa visível do espectro, as NPs de ouro são as mais utilizadas em aplicações fototérmicas (BAFFOU, 2017). Pelo fato de CSAD necessitarem de um volume razoável de NF para funcionarem (cerca de 20 l/m²), o elevado preço do ouro é um fator limitante para o seu uso em coletores solares, mesmo considerando fluido com baixa concentração. Visando reduzir a quantidade de ouro necessária para operação de um CSAD, estudos recentes buscam encontrar configurações geométricas de NPs de ouro que possuam desempenho de conversão fototérmica superior ao de nanoesferas,

que constituem a geometria de NPs mais utilizada (DUAN et al., 2018b).

Outra vertente do desenvolvimento tecnológico de CSAD consiste na busca por NFs compostos por materiais alternativos passíveis de utilização como fluido de trabalho dos coletores, que possuam baixo custo e alto desempenho na conversão solar quando comparados às NPs de ouro (QU et al., 2017; GUPTA; AGRAWAL; MATHUR, 2015). Também é possível combinar NPs de vários materiais para compor NFs híbridos e aplicar em CSAD (QIN et al., 2017; DUAN et al., 2018a). Os NFs híbridos podem ter as concentrações relativas de cada tipo de NP otimizadas para absorção solar através de técnicas de otimização, como algoritmos genéticos, por exemplo (SEO et al., 2020).

O desenvolvimento de NFs com alta performance para utilização em coletores é um aspecto importante para viabilizar aplicações em escala comercial. Porém, devido à complexidade do processo de produção de NFs estáveis para utilização nos dispositivos, torna-se importante buscar alternativas de *designs* de coletores que necessitem de quantidades menores de NFs, contribuindo para a viabilização dos CSAD (PENG; SADAGHIANI, 2021).

Apesar dos esforços investidos no desenvolvimento dos CSAD, nota-se que ainda não há fluidos de trabalho e/ou *designs* de coletores capazes de consolidar esse tipo de coletor como um produto viável do ponto de vista comercial. Para alcançar viabilidade, é necessário o desenvolvimento de configurações mais eficientes para os CSAD, contemplando aspectos de custo e performance. Destarte, a presente Tese de Doutorado investiga o uso de estruturas para alta performance de CSAD, de forma a contribuir para a viabilização desse dispositivo.

Assim, as contribuições propostas no trabalho são:

- Avaliação de NFs compostos por nanocascas de ouro dopadas com ferro em CSAD;
- Avaliação de NFs compostos por nitretos de metais de transição em CSAD;
- Avaliação de NFs compostos por nanogaiolas metálicas em CSAD;
- Avaliação de NFs plasmônicos híbridos otimizados para uso em CSAD;
- Avaliação de sistemas lenticulares em CSAD.

1.2 ORGANIZAÇÃO DO TRABALHO

A Tese está organizada em cinco capítulos, sendo este primeiro uma introdução que contém uma contextualização relacionada ao uso térmico da energia solar, mais especificamente de coletores de absorção direta.

No Capítulo 2 é feita uma revisão de literatura que trata do uso de NFs plasmônicos em aplicações de energia solar e do estado da arte relativo a CSAD. A revisão foi feita de forma narrativa, destacando os trabalhos seminais e as principais contribuições recentes.

No Capítulo 3 são descritos os procedimentos aplicados para a obtenção dos resultados do trabalho. É feita uma descrição teórica das propriedades ópticas dos NFs, da modelagem do CSAD e da otimização espectral de NFs híbridos via algoritmo genético. Em seguida, são apresentadas as técnicas experimentais de caracterização térmica dos NFs e do CSAD lenticular.

No Capítulo 4 são apresentados os resultados e as devidas discussões. O capítulo é dividido em cinco seções, sendo cada uma delas referente a uma das contribuições anteriormente propostas.

O Capítulo 5 refere-se à conclusão do trabalho, destacando os principais resultados do trabalho, suas implicações no desenvolvimento dos CSAD e sugestões para futuros trabalhos.

2 REVISÃO DE LITERATURA

Este capítulo trata de uma revisão da literatura dividida em quatro seções. Inicialmente, é feita uma revisão que trata da evolução do uso de NFs em aplicações de energia solar. Em seguida, realiza-se uma revisão de estado da arte sobre os CSAD. As duas seções seguintes tratam da modelagem das propriedades ópticas de NFs e da modelagem dos CSAD, respectivamente.

2.1 NANOFLUIDOS PLASMÔNICOS EM APLICAÇÕES DE ENERGIA SOLAR

Devido aos avanços tecnológicos do século XX, a fabricação, manipulação e observação de estruturas com dimensões nanométricas viabilizou-se, tornando a nanotecnologia um campo promissor no século XXI (BAYDA et al., 2020). Apesar da ascensão dessa tecnologia ser recente, artesãos romanos do século IV já utilizavam a adição de NPs metálicas para alterar as cores de vidros, como no icônico exemplo da Taça de Licurgo, mostrada na Figura 4. De forma similar, nanopartículas podem ser adicionadas a fluidos, causando alterações em suas propriedades ópticas e termofísicas, dando origem aos NFs.

Figura 4 – Taça de Licurgo, com aparência (a) esverdeada pela luz refletida (iluminada de fora para dentro) e (b) avermelhada pela luz transmitida (iluminada de dentro para fora).



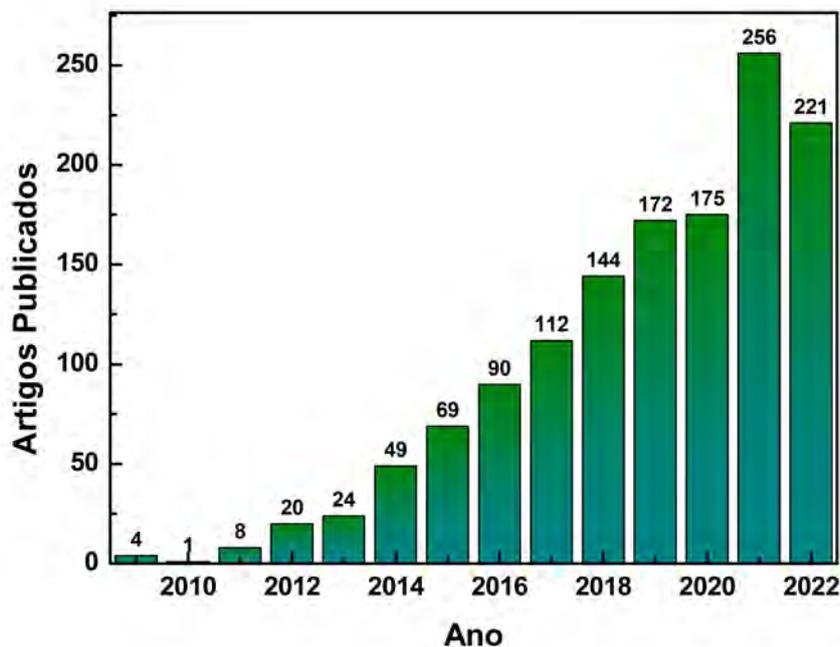
Fonte: Bayda et al. (2020)

NFs são definidos como soluções coloidais compostas por partículas de dimensões nanométricas suspensas num fluido base (CHOI; EASTMAN, 1995). Esta classe de fluidos foi desenvolvida inicialmente para uso em sistemas térmicos, visto que a adição de NPs de determinados materiais em baixas concentrações resulta num aumento acentuado da condutividade térmica do fluido base (EASTMAN et al., 1996; AKILU et al., 2016).

Além das boas propriedades termofísicas, NFs compostos por alguns materiais exibem características de conversão fototérmica no espectro visível. A capacidade de absorção de luz pelas NPs presentes no NF se dá pela RPSL, que ocorre quando o campo eletromagnético incidente tem frequência próxima da frequência de oscilação dos elétrons livres presentes na NP (BAFFOU, 2017). O fenômeno é descrito com maior detalhamento na Seção 2.3.

As propriedades ópticas e termofísicas dos NFs, combinadas com a possibilidade da sua utilização em sistemas térmicos sem riscos de obstruções em componentes (EASTMAN et al., 1996), tornam esses fluidos propícios para uso em sistemas de aquecimento solar (OTANICAR et al., 2010). Assim, com o desenvolvimento simultâneo dos setores de termoplasmônica e energia solar, há um crescimento acentuado no interesse por aplicações de NF em energia solar. Esse crescimento pode ser visto no gráfico da Figura 5, que mostra a evolução da quantidade de publicações que contêm simultaneamente as palavras “*Nanofluid*” e “*Solar*” no título ao longo dos últimos anos, com dados obtidos no Portal Periódicos CAPES.

Figura 5 – Evolução da quantidade de publicações que contêm simultaneamente “*Nanofluid*” e “*Solar*” no título ao longo dos últimos anos.



Fonte: O Autor (2023)

Dentre as aplicações de NFs em energia solar, destacam-se o uso em coletores solares térmicos (XIONG et al., 2021), coletores híbridos fotovoltaicos e térmicos (PV/T) (HOSSAIN; KARIM; BHUIYAN, 2022), dessalinização, armazenamento de energia (SUN et al., 2022), refrigeração termoelétrica (AHAMMED; ASIRVATHAM; WONGWISES, 2016), esterilização solar (LIU et al., 2022) e resfriamento radiante (HU et al., 2022).

NFs com alta condutividade térmica podem ser explorados em coletores solares de placa plana. A avaliação experimental do uso de NFs de TiO_2 e Al_2O_3 num coletor de placa plana revelou um aumento de até 6% em sua eficiência térmica, quando comparado ao uso de água destilada como fluido de trabalho (VITAL; BARBOSA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2016). Resultados similares foram obtidos para NF de SiO_2 (NOGHREHABADI; HAJIDAVALLOO; MORAVEJ, 2016) e, por avaliação numérica, com o uso de NF de CuO (SINT et al., 2017). Aumentos de eficiência ainda mais significativos para coletores de placa plana, variando entre 15% a 20% de incremento na eficiência em comparação com o uso de água pura foram relatados para NFs compostos por outros óxidos metálicos, como MgO (CHOUDHARY; SACHDEVA; KUMAR, 2020b), ZnO (CHOUDHARY; SACHDEVA; KUMAR, 2020a) e Fe_3O_4 (CHOUDHARY; SACHDEVA; KUMAR, 2021). Apesar dos materiais supramencionados apresentarem baixo custo de produção, sua aplicação em dispositivos termossolares é limitada pelo baixo desempenho nas aplicações de absorção direta de radiação.

Nanoestruturas metálicas, que exibem o fenômeno de RPSL e elevada absorção óptica, são bastante atraentes para aplicações de NFs em energia solar. Os principais materiais plasmônicos utilizados para aplicações envolvendo absorção de luz no espectro visível são os metais nobres, sendo o ouro mais utilizado que os demais devido principalmente à sua estabilidade química e bom desempenho plasmônico. A avaliação experimental da conversão fototérmica de NFs compostos de metais nobres suspensos em água revela que ouro (ZHANG et al., 2014), prata (FILHO et al., 2014) e cobre (HE et al., 2013) são materiais com alto potencial de utilização em CSAD. Porém, devido ao alto custo dos metais nobres, outros materiais têm sido estudados para aplicações de conversão fototérmica. Destacam-se: alumínio, nitretos metálicos, ligas metálicas, cristais semicondutores dopados e grafeno (BAFFOU, 2017).

Para obtenção de um NF com um espectro de absorção adequado para aplicações em energia solar, além da seleção do material das NPs, é importante definir sua morfologia e o material do meio hospedeiro (fluido base) (GÓMEZ et al., 2008), dado que todos esses parâmetros influenciam a faixa espectral absorvida pelo NF. Os principais meios hospedeiros utilizados para NFs voltados a esse tipo de aplicação são água, etilenoglicol, propilenoglicol e óleos térmicos (HEWAKURUPPU et al., 2015; DELFANI; KARAMI; AKHAVAN-BEHABADI, 2016).

Quanto à morfologia das NPs, é frequente o emprego de esferas, justificado pela simplicidade da síntese de partículas com essa geometria (FAROOQ et al., 2018; HOSSEINI; DEHAJ, 2021). Entretanto, o uso de morfologias mais complexas é oportuno para obtenção de dispositivos solares, considerando que modificações no formato das NPs permitem sintonizar o espectro de absorção do fluido para maximizar a absorção de radiação (BAFFOU, 2017). Apesar do aumento de complexidade no processo de fabricação de partículas com morfologias não esféricas, a absorção otimizada dessas NPs possibilita o uso de quantidades reduzidas de material para obter um desempenho equivalente ao obtido com NPs esféricas em maior concentração (DUAN et al., 2018b).

NPs com geometria elipsoidal apresentam espectros com dois picos de absorção devido à ocorrência de dois modos de oscilação de plasmon, que podem ser ajustados pela razão de aspecto das partículas. Utilizando nanoelipsoides de ouro e prata, é possível absorver o dobro da quantidade de energia absorvida por uma partícula esférica para uma dada concentração (RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2015). O mesmo efeito de sintonização de espectro por ajuste dos modos de oscilação transversal e longitudinal pode ser obtido com NPs em formato de bastões (DU; TANG, 2016).

A absorção de radiação solar por nanoestruturas plasmônicas com morfologias tetraédricas, octaédricas e cúbicas de ouro e prata foi investigada e revelou espectros de absorção compatíveis com o espectro solar (RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2018). Utilizando nanocubos de prata, verificou-se experimentalmente o potencial de aplicação desse tipo de estrutura em CSAD (GUIMARÃES et al., 2021).

Estruturas multicamadas, também conhecidas como nanocascas ou *matrioskas*, são amplamente investigadas como absorvedores de radiação solar. Combinando camadas de metais nobres intercaladas com camadas de sílica, essas estruturas possuem desempenho de absorção solar superior ao de estruturas esféricas simples (RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2018; VIEIRA et al., 2021). Além disso, essas estruturas possuem custo de material reduzido, visto que para produzir nanocascas com o mesmo desempenho de uma esfera maciça, é utilizada uma quantidade inferior de metal nobre (FAROOQ et al., 2018). Um avanço recente no uso de nanocascas de ouro foi a obtenção de NPs com espectro de absorção largo pela adição de dopagem de ferro. Essas NPs têm desempenho superior às nanocascas de ouro puro quando utilizadas em CSAD (FAROOQ et al., 2020).

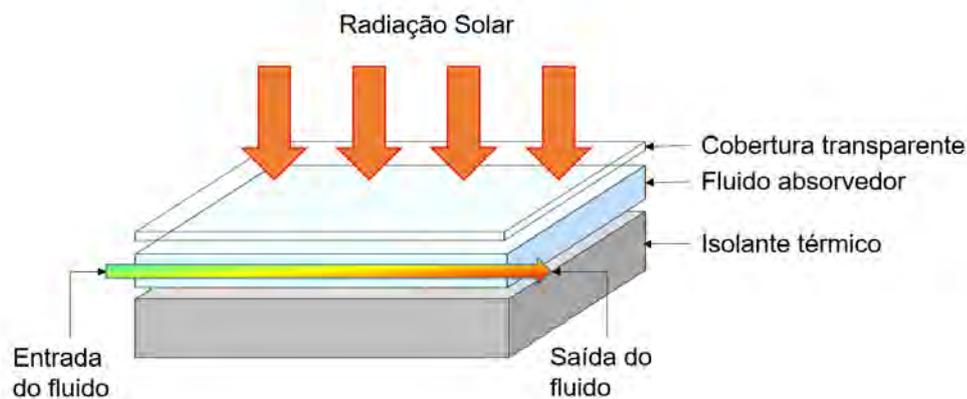
Outra possibilidade de sintonização do espectro de absorção de NFs plasmônicos para aplicações em energia solar é com o uso de NFs híbridos. Esses NFs podem ser compostos por NPs com diferentes morfologias e/ou materiais, que combinados geram um fluido com o espectro de absorção com características específicas (CHEN et al., 2016; JEON; PARK; LEE, 2016). Além disso, é possível otimizar o espectro obtido através de técnicas de otimização que determinam a concentração ideal de cada tipo de NP presente na mistura (SEO et al., 2020).

As propriedades de absorção de luz dos NFs plasmônicos podem ser aplicadas em outros dispositivos de conversão solar térmica além do CSAD. Uma aplicação importante é nos coletores PV/T, que são compostos por um CSAD sobre uma célula fotovoltaica, o que permite que a radiação solar seja aproveitada simultaneamente para produção de energia elétrica e calor (DINIZ; VITAL; GÓMEZ-MALAGÓN, 2022). Outra forma de aproveitamento da conversão fototérmica desses fluidos é na melhoria do processo de geração de vapor em destiladores solares (BOUÇANOVA et al., 2022; WANG et al., 2017b; AMJAD et al., 2017). Ademais, as NPs plasmônicas podem ser adicionadas aos fluidos de transferência de calor em dispositivos solares térmicos de altas temperaturas, como por exemplo coletores com concentração de luz por calha parabólica (KRISHNA et al., 2020) e disco parabólico (LONI et al., 2020).

2.2 COLETORES SOLARES DE ABSORÇÃO DIRETA

Os CSAD são dispositivos que utilizam um fluido absorvedor de luz que eleva sua temperatura devido à conversão fototérmica da radiação solar. A construção do equipamento se dá pelo confinamento do fluido de trabalho entre uma superfície transparente no topo e uma superfície adiabática no fundo, como mostrado na Figura 6. O fluido é submetido a um fluxo mássico e o calor absorvido ao longo do coletor resulta num ganho de temperatura entre a entrada e a saída do coletor.

Figura 6 – Diagrama esquemático de um CSAD



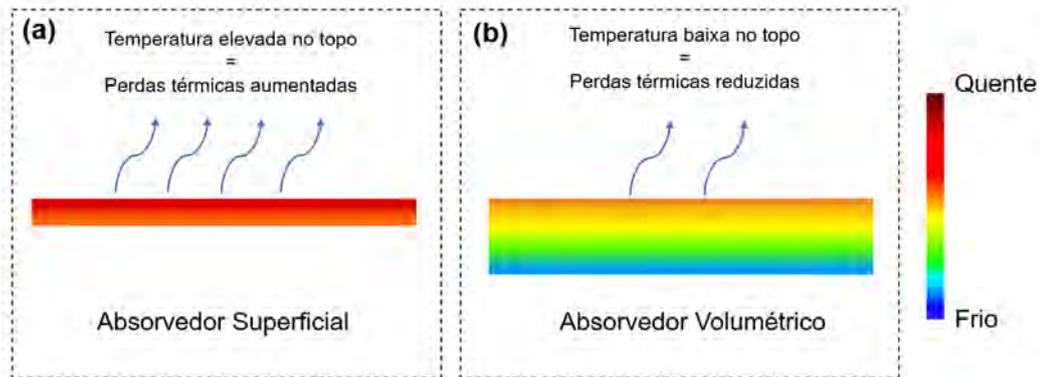
Fonte: Vital et al. (2022)

Em contraponto aos CSAD, os coletores solares térmicos tradicionais possuem, entre a cobertura e o fluido, uma superfície que absorve a radiação solar e transfere calor para um fluido de trabalho. Placas absorvedoras delgadas e com alta condutividade térmica são utilizadas para favorecer a transferência de calor ao fluido, porém essas características ocasionam significativas perdas térmicas por convecção e radiação para o ambiente (HEWAKURUPPU et al., 2015).

Considerando que as perdas térmicas dos coletores ocorrem majoritariamente pela superfície superior, através mecanismo de convecção (DUFFIE; BECKMAN; BLAIR, 2020), uma alternativa para mitigar essas perdas é utilizar o próprio fluido de trabalho do coletor como elemento absorvedor volumétrico, posto que na transferência térmica por convecção o fluxo de calor para o ambiente é proporcional à temperatura da superfície. Assim, comparando os desempenhos dos absorvedores superficial e volumétrico acumulando a mesma quantidade de energia, percebe-se que a distribuição de temperaturas mais uniforme do absorvedor volumétrico resulta numa diminuição das perdas térmicas, conforme ilustrado na Figura 7.

A primeira tentativa de empregar absorvedor volumétrico num coletor foi realizada por Minardi e Chuang (1975). O dispositivo pioneiro utilizava misturas de tinta preta com água e etilenoglicol como fluido de trabalho, e tinha desempenho superior à dos coletores de placa plana. Apesar do bom desempenho do coletor, havia dificuldade de utilização do coletor num sistema de aquecimento completo, visto que fragmentos de tinta poderiam se acumular em outros

Figura 7 – Comparação entre as perdas térmicas em absorvedores (a) superficiais e (b) volumétricos para uma mesma quantidade de calor acumulado.



Fonte: O Autor (2023)

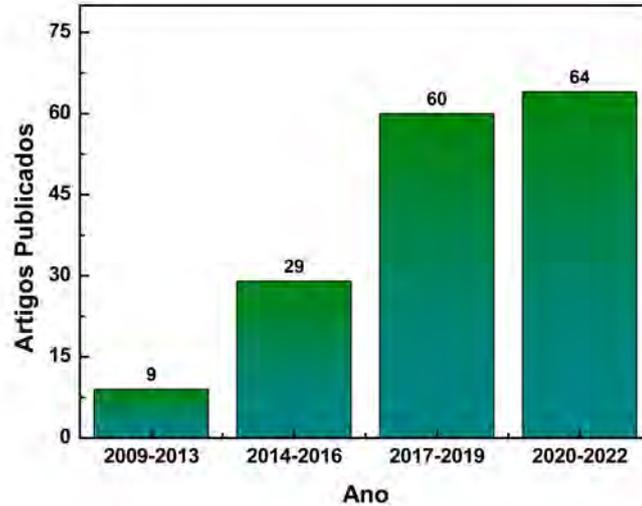
componentes do sistema (e.g. trocadores de calor), causando obstruções e interrompendo o funcionamento. Na década seguinte, houve tentativas esparsas e infrutíferas de aperfeiçoamento dos fluidos de trabalho desses coletores, que também eram conhecidos como “*black liquid collectors*” (VISKANTA, 1987; BURKE et al., 1982).

Após um longo período de inatividade em relação ao CSAD, houve uma retomada do desenvolvimento do dispositivo ao final da década de 2000 (TYAGI; PHELAN; PRASHER, 2009; OTANICAR et al., 2010). O interesse no tema é crescente desde então, como pode ser visto no gráfico da Figura 8, que mostra a evolução na quantidade de artigos relacionados a esse tipo de coletor no período de 2009 a 2022. A quantidade de artigos científico é ainda reduzida, indicando que o tema ainda encontra-se em estágio inicial. O ressurgimento do interesse no dispositivo foi impulsionado principalmente pela consolidação tecnológica de fluidos capazes de realizar conversão fototérmica livre dos obstáculos existentes, no caso dos corantes, e com possibilidade de ajuste do espectro de absorção: os nanofluidos plasmônicos.

Para realização da revisão de literatura, foi realizada busca na plataforma Portal Periódicos CAPES, considerando artigos que contêm as expressões “*Direct Absorption Solar Collector*” OU “*Direct Absorption Collector*” OU “*DASC*” no título. Após remoção de artigos duplicados ou não relacionados a coletores solares, restaram 162 dos 188 artigos encontrados inicialmente.

Para verificar a viabilidade técnica de um CSAD, o seu desempenho é medido por alguns parâmetros operacionais, sendo os mais explorados: temperatura de saída do NF, eficiências energética e exergética. A eficiência exergética pode ser definida como uma relação entre o desempenho real de um dispositivo e o desempenho de um sistema termodinâmico ideal (reversível), ou seja: a eficiência exergética é uma forma de mensurar a qualidade da energia convertida pelo coletor, representando o potencial de geração de trabalho mecânico (KALOGIROU et al., 2016).

Figura 8 – Evolução da quantidade de publicações relacionadas a coletores solares de absorção direta ao longo dos últimos anos.



Fonte: O Autor (2023)

Além das características supramencionadas do NF (composição e morfologia das NPs e fluido base), os principais fatores que influenciam o desempenho de um CSAD incluem: concentração de partículas, geometria do coletor, vazão mássica, intensidade de radiação incidente, materiais da estrutura do coletor e temperaturas de operação. Esses são os parâmetros operacionais mais explorados na literatura e estão listados no Quadro 1.

Quadro 1 – Principais parâmetros operacionais de um CSAD.

Coletor Solar de Absorção Direta

Parâmetros de Entrada	Indicadores de Desempenho
Composição das NPs	Temperatura de saída do NF
Morfologia das NPs	Eficiência energética
Fluido base do NF	Eficiência exergética
Concentração de NPs	
Geometria do coletor	
Materiais do coletor	
Vazão mássica do NF	
Intensidade de radiação	
Temperatura de entrada do NF	
Temperatura ambiente	

Fonte: O Autor (2023)

Apesar da abundância de trabalhos avaliando a performance desses coletores na literatura, a comparação dos dispositivos explorados em diferentes trabalhos é, por vezes, inviável. Isso ocorre porque há ausência de padronização nas escolhas dos parâmetros operacionais do coletor, tornando as comparações inexatas. Assim, o desempenho de um CSAD utilizando determinado NF é frequentemente comparado ao desempenho do mesmo coletor utilizando um outro NF de referência ou o fluido base sem a presença de NPs. Outra opção é realizar comparação de performance entre o CSAD e outros tipos de coletores.

A primeira avaliação numérica de um CSAD foi realizada explorando um modelo bidimensional resolvido pelo Método das Diferenças Finitas para um dispositivo utilizando NF de alumínio e foi verificado que o CSAD exibe uma eficiência 10% superior à de um coletor de placa plana com a mesma área (TYAGI; PHELAN; PRASHER, 2009). A modelagem matemática desenvolvida no trabalho mencionado foi uma importante contribuição e continua sendo utilizado como referência para trabalhos de alto impacto mais de uma década depois. Porém, a escolha do material das NPs não foi a melhor, visto que o espectro de absorção de NPs esféricas de alumínio em água apresenta pico na faixa UV. Dessa forma, para alcançar desempenho satisfatório, foi necessário utilizar uma concentração de NPs relativamente alta (fração volumétrica de 1,6%). Utilizando o mesmo modelo para conduzir uma análise de sensibilidade, foi verificado desempenho semelhante para um CSAD utilizando NF de carbono amorfo, porém num regime de baixa concentração (BHALLA; KHULLAR; TYAGI, 2019).

Utilizando diferentes NFs (de prata e de nanotubos de carbono), Otanicar e colaboradores avaliaram experimentalmente um CSAD de pequenas dimensões e obtiveram eficiências energéticas entre 50% e 60% (OTANICAR et al., 2010). Os valores podem ser considerados baixos considerando o desempenho típico de coletores térmicos de placa plana (75%), porém são satisfatórios visto que o dispositivo tinha dimensões reduzidas e pouco isolamento térmico. O mesmo grupo de pesquisa realizou uma comparação do desempenho de diversos NFs para aplicações em CSAD e concluiu que o NF de ouro, apesar de ter boa performance na conversão fototérmica, apresenta custo de produção mais de 60 vezes maior que o NF de prata e mais de 360 vezes maior que o NF de alumínio (TAYLOR et al., 2011).

Apesar do baixo custo de produção dos NFs baseados em óxidos metálicos, os espectros de absorção de luz desses materiais não exibem picos na banda de luz visível. Dessa forma, são demandadas concentrações muito elevada de NPs para que o CSAD com esses fluidos alcance patamares de alta eficiência energética, o que resulta num incremento na potência de bombeamento necessária para o fluxo do fluido (concentrações elevadas causam aumento na densidade e viscosidade do NF) (AKILU et al., 2016). Empregando um modelo analítico, a performance de um CSAD utilizando NF de alumina (Al_2O_3) revelou eficiência térmica de até 85% com fração volumétrica de 0,6% (TURKYILMAZOGLU, 2016). Por outro lado, a avaliação experimental de um coletor com o mesmo material mostrou uma eficiência máxima de 18,8%, porém a concentração explorada foi de 0,05% (GUPTA; AGRAWAL; MATHUR, 2015).

A conversão fototérmica utilizando NF de TiO_2 revelou um desempenho máximo de 16% para uma fração volumétrica de 0,5% (XUAN; DUAN; LI, 2014).

Nanomateriais baseados em carbono possuem alto potencial de aplicação em CSAD (KARAMI et al., 2014; HORDY et al., 2014). A avaliação experimental de um coletor utilizando nanotubos de carbono indicou eficiência energética superior a 90% e aumento de temperatura de até 60 °C, porém houve redução do desempenho após a exposição a vários ciclos de iluminação solar (QU et al., 2017). O mesmo material, aplicado num CSAD de dimensões compatíveis com o uso para aquecimento residencial, proporcionou eficiência térmica superior a 80% (DELFANI; KARAMI; AKHAVAN-BEHABADI, 2016). A conversão solar térmica utilizando NF de grafeno também foi analisada experimentalmente e foram alcançados patamares de eficiência superiores a 70% em regime de baixa concentração de NPs (LIU et al., 2015).

NFs que utilizam nanoesferas de materiais metálicos são frequentemente utilizados em sistemas de absorção direta. Explorando um modelo de CSAD em escala com NF de prata em fração volumétrica de 0,02%, foi obtida experimentalmente uma eficiência energética superior a 90% com fluido em regime de vazão mássica nula (CHEN et al., 2016b). Por outro lado, considerando o fluido em movimento contínuo, a eficiência energética obtida com NF de prata é inferior a 50%, enquanto a eficiência exérgica é de 5% (GORJI; RANJBAR, 2016). Também utilizando coletor em escala com fluido estático com NF de ouro, eficiência energética superior a 80% foi obtida, confirmando o potencial do material para aplicações em CSAD (CHEN et al., 2016a). A partir de avaliação paramétrica de CSAD utilizando NFs metálicos, constata-se que é possível obter eficiência exérgica de 5,8% (SHARAF et al., 2019).

Avaliações numéricas de CSAD utilizando NFs com NPs de morfologia mais complexas que esferas maciças revelaram a obtenção de altos patamares de eficiência térmica para baixas concentrações. Estruturas como nanodiscos, nanoprismas e nanobastões de prata são capazes de gerar NFs que melhoram o desempenho de coletores quando comparando com nanoesferas do mesmo material (MALLAH et al., 2018). Para coletores contendo NFs com nanocascas de ouro, é possível obter o mesmo desempenho que seria obtido utilizando esferas maciças, porém com apenas 1/5 da fração volumétrica (DUAN et al., 2018b). Considerando que o núcleo da casca é de SiO_2 , o custo de produção dos NFs é significativamente reduzido. A avaliação do uso de NF híbrido contendo nanocascas de prata com diferentes dimensões demonstrou a possibilidade de obtenção de eficiência térmica de até 90% com concentração volumétrica de apenas 0,005% (DUAN et al., 2018a).

Os nitretos de alguns metais de transição da família 4B (TiN, ZrN e HfN), têm sido explorados para aplicações em nanoplasmonica por possuírem características de RPSL comparáveis às de metais nobres, porém com custo de produção reduzido (LALISSE et al., 2016; BAFFOU, 2017). Um dos resultados deste trabalho envolve a avaliação do uso de NFs constituídos por esses materiais em CSAD.

Utilizando NFs híbridos contendo NPs com diferentes dimensões (CHEN; CHEN;

ZHOU, 2022), morfologias (VIEIRA et al., 2021) e materiais (SAINZ-MAÑAS et al., 2022), é possível obter CSAD com bom desempenho e utilizando baixas concentrações de partículas (LIU et al., 2022; MALLAH et al., 2019). A otimização de alguns parâmetros de construção do CSAD em conjunto com ajuste de proporções de diferentes NPs na composição do NF a ser utilizado no coletor indicou combinações de parâmetros para maximizar performance e minimizar o custo de produção do NF (QIN et al., 2017). Análises mostram que um NF híbrido com NPs de ouro e prata têm potencial para proporcionar aos CSAD desempenho semelhante ao obtido com NPs de apenas um metal, porém com concentração de partículas reduzida, devido ao alargamento do espectro de absorção (CHEN et al., 2016).

Outra forma de aprimorar o desempenho de um CSAD é explorando concentração de radiação solar nas configurações de calha parabólica (BORTOLATO et al., 2017; AHBABI-SARAY; HEYHAT, 2022), disco parabólico (LONI et al., 2020) ou coletor concentrador parabólico composto (HAM; SHIN; CHO, 2022; WANG et al., 2017a). Com essas configurações, é possível obter temperaturas mais altas, que resultam em maior eficiência exergética dos dispositivos. Porém, o uso desses tipos de concentradores exige ajuste contínuo da posição do coletor para acompanhar o movimento aparente do sol. Recentemente, foi desenvolvida uma configuração que permite concentração sem a necessidade de ajuste contínuo de posição, utilizando uma cavidade óptica, e aumenta a eficiência energética em até 7% quando comparada à de um CSAD tradicional (PENG; SADAGHIANI, 2021). Em contrapartida aos sistemas de concentração supramencionados, que utilizam espelhos para concentrar a radiação solar, existe a possibilidade de realizar a concentração utilizando lentes. Essa possibilidade foi explorada em apenas um trabalho, porém o *design* proposto é suscetível a elevadas perdas ópticas (por possuir várias interfaces ópticas no caminho óptico da luz) e térmicas (pelo contato direto do tubo absorvedor com o ambiente) (LI et al., 2015).

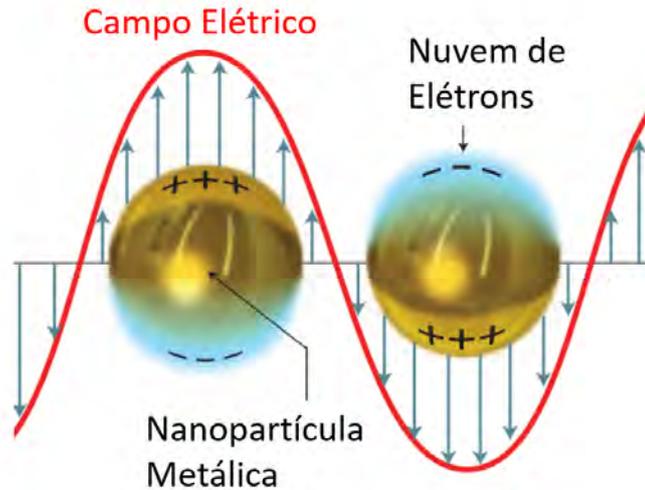
A análise dos trabalhos relacionados a CSAD baseados em NPs plasmônicas sugere que esses coletores possuem desempenho superior aos coletores planares convencionais. Os CSAD são indicados para operação em regime de baixas temperaturas (até 150 °C) para maximizar sua performance e evitar problemas relacionados à estabilidade das NPs. Os principais desafios para o desenvolvimento dos CSAD estão relacionados à estabilidade dos NFs, custos de produção, aumento da potência de bombeamento (devido ao aumento de viscosidade pela adição das NPs), possibilidade de erosão de componentes dos sistemas térmicos e toxicidade e ao impacto ambiental dos fluidos utilizados (SAINZ-MAÑAS et al., 2022; LIU et al., 2022; MALLAH et al., 2019; SREEKUMAR et al., 2022).

2.3 PROPRIEDADES ÓPTICAS DE NANOFUIDOS PLASMÔNICOS

O comportamento óptico dos NFs plasmônicos possibilita a conversão fototérmica de radiação solar e é decorrente do fenômeno de RPSL. Os plasmons de superfície localizados são oscilações coletivas dos elétrons livres da banda de condução de uma NP condutora, restringidas

pelos limites geométricos da partícula (ENOCH; BONOD, 2012). Essas oscilações podem ser descritas pela conversão contínua entre a energia potencial eletrostática e a energia cinética do sistema, com presença de amortecimento. Considerando que o campo elétrico da radiação eletromagnética incidente na partícula pode induzir um dipolo e gerar oscilação da nuvem de elétrons, como mostrado na Figura 9.

Figura 9 – Oscilação da nuvem de elétrons da NP induzida por um campo elétrico harmônico.



Fonte: Adaptada de Juan, Righini e Quidant (2011)

Quando a frequência de oscilação da luz incidente é compatível com a frequência de oscilação dos elétrons da NP, a interação gera ressonância. Como consequência da RPSL, há uma amplificação da absorção de luz nessas frequências. Para NPs de determinados materiais (ouro, prata e cobre, por exemplo), a frequência de ressonância encontra-se na faixa UV-VIS-NIR, possibilitando o uso dessas partículas para absorção de energia solar.

As propriedades ópticas dos NPs são dependentes das características dos materiais que o constituem (fluido base e NPs), e essa dependência é bem expressa em termos da permissividade (ϵ) desses materiais. Há disponíveis na literatura valores experimentais obtidos para diferentes materiais (PALIK, 1998; JOHNSON; CHRISTY, 1972; HALE; QUERRY, 1973). Apesar da validade desses valores para grande parte das aplicações, quando se trata de aplicações com partículas muito pequenas, efeitos quânticos tornam-se importantes e é necessário ajustar os valores de permissividade em função da dimensão das NPs. A permissividade para uma NP metálica (ϵ_{np}) pode ser modelada na forma (RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2018; TUERSUN; HAN, 2013):

$$\epsilon_{np}(\omega) = \epsilon_{mat} + \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega \frac{v_F}{L_\infty}} - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + j\omega \left(\frac{v_F}{L_\infty} + \frac{Av_F}{L_{eff}} \right)}, \quad (1)$$

em que ω é a frequência angular da luz incidente, ω_p é a frequência de plasma do material, ε_{mat} é a permissividade do material, v_F é a velocidade de Fermi, L_∞ é o livre caminho médio dos elétrons, A é um parâmetro adimensional e L_{eff} é o livre caminho médio reduzido efetivo. Os valores dos parâmetros para NPs de ouro e prata estão disponíveis na literatura (FURTADO; GÓMEZ-MALAGÓN, 2014).

A interação da luz com uma NP pode ser quantificada em termos de suas seções de choque de espalhamento (σ_{esp}), absorção (σ_{abs}) e extinção ($\sigma_{ext} = \sigma_{esp} + \sigma_{abs}$). As seções de choque podem ser relacionadas com as potências espalhada (P_{esp}) e absorvida (P_{abs}) pela partícula em cada comprimento de onda (λ) na seguinte forma:

$$P_{esp} = I(\lambda)\sigma_{esp}(\lambda) \quad (2)$$

e

$$P_{abs} = I(\lambda)\sigma_{abs}(\lambda), \quad (3)$$

em que I é a irradiância espectral incidente na partícula.

Os valores dessas seções transversais para NPs esféricas muito pequenas em relação ao comprimento de onda da luz incidente (λ) podem ser obtidos adotando a aproximação quase-estática através das seguintes relações (BAFFOU, 2017):

$$\sigma_{esp}(\lambda) = \frac{8\pi}{3}k^4\varepsilon_m^2a^6 \left| \frac{\varepsilon_{np} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{np} + 2\varepsilon_m} \right|^2 \quad (4)$$

e

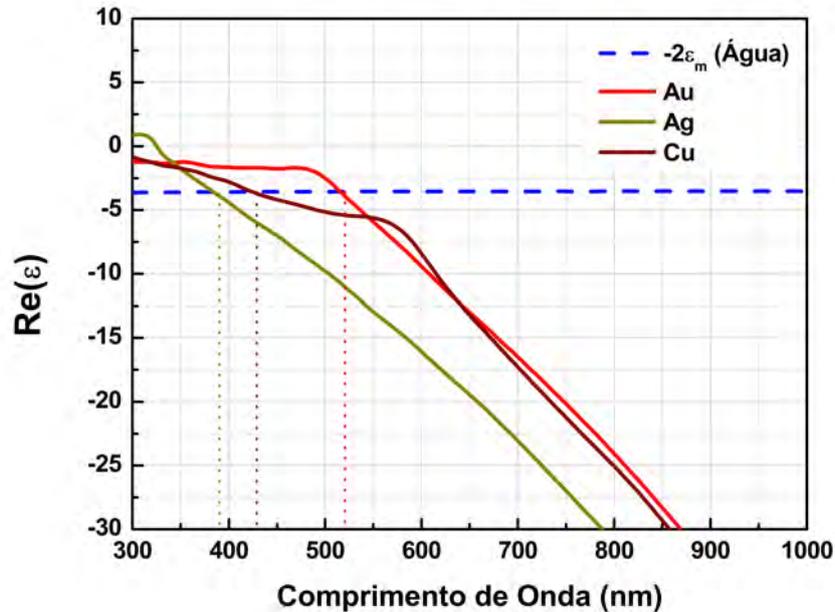
$$\sigma_{abs}(\lambda) = 4\pi\varepsilon_m a^3 \text{Im} \left[\frac{\varepsilon_{np} - \varepsilon_m}{\varepsilon_{np} + 2\varepsilon_m} \right], \quad (5)$$

em que a é o raio da partícula, ε_m é a permissividade do hospedeiro e k é o número de onda da luz incidente.

Das Equações 4 e 5, nota-se que os valores das seções de choque são maximizados para a condição $\text{Re}\{\varepsilon_{np}\} = -2\varepsilon_m$, na qual ocorre a RPSL e é também conhecida como condição de Fröhlich (FAN; ZHENG; SINGH, 2014). Materiais metálicos apresentam a parte real da permissividade negativa e alguns metais nobres (como ouro, prata e cobre, por exemplo), atendem à condição de ressonância em comprimentos de onda no espectro UV-VIS, considerando meios hospedeiros típicos (vácuo, ar e água, por exemplo). As magnitudes máximas das seções de choque são limitadas devido à existência de uma parte imaginária na permissividade dos materiais das NPs ($\text{Im}\{\varepsilon_{np}\} \neq 0$). A Figura 10 apresenta os valores da parte real da permissividade para ouro, prata e cobre, comparados com a condição de Fröhlich, considerando a água

como meio hospedeiro. Os valores de comprimento de onda para ocorrência da RPSL são de aproximadamente 520 nm, 390 nm e 430 nm para ouro, prata e cobre, respectivamente.

Figura 10 – Permissividade de metais nobres comparados à condição de Fröhlich para água como meio hospedeiro.



Fonte: O Autor (2023)

Além do tipo de material, a geometria das NPs também influencia nos seus espectros de espalhamento e absorção. Para partículas esféricas que não atendem à condição $a \ll \lambda$, as Equações 4 e 5 tornam-se inválidas. Nesse caso, uma abordagem frequentemente utilizada para cálculo das seções de choque é a Teoria de Mie, que consiste na obtenção de soluções analíticas para as Equações de Maxwell (MIE, 1908). Essas soluções foram desenvolvidas visando a compreensão das cores características de soluções coloidais de ouro e descrevem as seções de choque da NP através das seguintes expressões (BOHREN; HUFFMAN, 2008):

$$\sigma_{esp}(\lambda) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (6)$$

$$\sigma_{ext}(\lambda) = \frac{2\pi}{k^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) Re \{a_n + b_n\} \quad (7)$$

e

$$\sigma_{abs}(\lambda) = \sigma_{ext}(\lambda) - \sigma_{esp}(\lambda), \quad (8)$$

em que a_n e b_n são os coeficientes de espalhamento. Considerando iguais as permeabilidades do meio e da NP, pode-se descrever os coeficientes como:

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi'_n(x) - \psi_n(x)\psi'_n(mx)}{m\psi_n(mx)\xi'_n(x) - \xi_n(x)\psi'_n(mx)} \quad (9)$$

e

$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi'_n(x) - m\psi_n(x)\psi'_n(mx)}{\psi_n(mx)\xi'_n(x) - m\xi_n(x)\psi'_n(mx)}, \quad (10)$$

onde m é a razão entre o índice de refração da NP e o índice de refração do meio e $x = ka$ é o parâmetro dimensional da NP. As funções especiais de Riccati-Bessel $\psi_n(x) = xj_n(x)$ e $\xi_n(x) = xh_n(x)$ são escritas em termos de funções esféricas de Bessel (j_n) e funções de Hankel esféricas (h_n).

As expressões da Teoria de Mie podem ser adaptadas para outras geometrias como estruturas esféricas com cascas e cilindros infinitos, porém algumas aproximações são consideradas, o que pode induzir a erros em situações específicas (BOHREN; HUFFMAN, 2008). Além disso, outras abordagens para obtenção de seções de choque de espalhamento e absorção através de soluções analíticas foram aplicadas a diferentes geometrias, como no caso de esferoides (ASANO; YAMAMOTO, 1975; MYROSHNYCHENKO et al., 2008). Entretanto, algumas abordagens analíticas disponíveis possuem restrições ou são demasiadamente complexas, limitando sua utilização. Dessa forma, para a obtenção das propriedades ópticas de NPs plasmônicas de morfologias arbitrárias torna-se útil o emprego de métodos numéricos, dentre os quais destacam-se Método dos Elementos Finitos (MEF) (SMAJIC et al., 2009), Método das Diferenças Finitas no Domínio do Tempo (MYROSHNYCHENKO et al., 2008), Método de Elemento de Fronteira (HOHENESTER; TRÜGLER, 2012) e Aproximação de Dipolo Discreto (BHATIA; VERMA; SINHA, 2020).

As seções de choque descrevem NPs individuais. A fim de considerar os efeitos de todas as NPs dispersas no fluido base (ou seja, do NF) na absorção de luz, é necessário obter o coeficiente de atenuação do NF (α_{nf}) da seguinte forma:

$$\alpha_{nf}(\lambda) = \frac{p}{V_{np}}\sigma_{abs}(\lambda), \quad (11)$$

onde V_{np} é o volume da NP e p é a fração volumétrica, ou seja, a concentração em termos da razão entre o volume das NPs e o volume total da solução coloidal. De posse do coeficiente de atenuação, é possível calcular a irradiância espectral absorvida (I_{abs}) ao longo de uma camada de NF aplicando a Lei de Beer-Lambert como mostrado a seguir:

$$I_{abs}(\lambda) = I(\lambda)(1 - e^{-\alpha_{nf}(\lambda)h}), \quad (12)$$

em que h é a espessura da camada de NF (caminho óptico).

Dessa forma, é possível introduzir o coeficiente de absorção solar ponderado (A_m), que representa a razão entre a irradiância absorvida pelo NF e a irradiância solar incidente como:

$$A_m = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda)(1 - e^{-\alpha_{nf}(\lambda)h})d\lambda}{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda)d\lambda} = \frac{\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{abs}(\lambda)d\lambda}{G_0}, \quad (13)$$

em que G_0 é a irradiância solar incidente, dada pelo espectro da norma ASHRAE G173-03 (STANDARD, 2008).

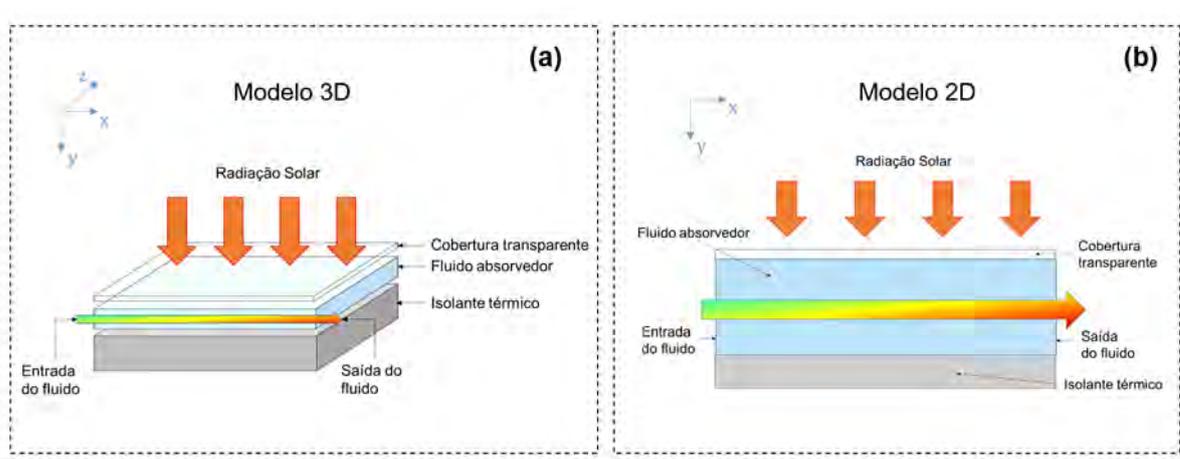
Para quantificar o fluxo de calor gerado no NF (q_r) pela absorção de luz em aplicações de conversão fototérmica para energia solar, é necessário realizar a integração da irradiância absorvida para a faixa espectral da energia emitida pelo sol, na seguinte forma:

$$q_r = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I_{abs}(\lambda)d\lambda. \quad (14)$$

2.4 PERFORMANCE DO COLETOR SOLAR DE ABSORÇÃO DIRETA

O comportamento do CSAD pode ser descrito considerando regime estacionário num modelo de transferência de calor em duas dimensões. A modificação da representação em três dimensões apresentada na Figura 11(a) para duas dimensões, mostrada na Figura 11(b), é factível porque as perdas térmicas pelas laterais do coletor são desprezíveis em relação às perdas pelo topo (TYAGI; PHELAN; PRASHER, 2009). Assim, o perfil de temperatura é praticamente constante ao longo do eixo z (Figura 11(a)).

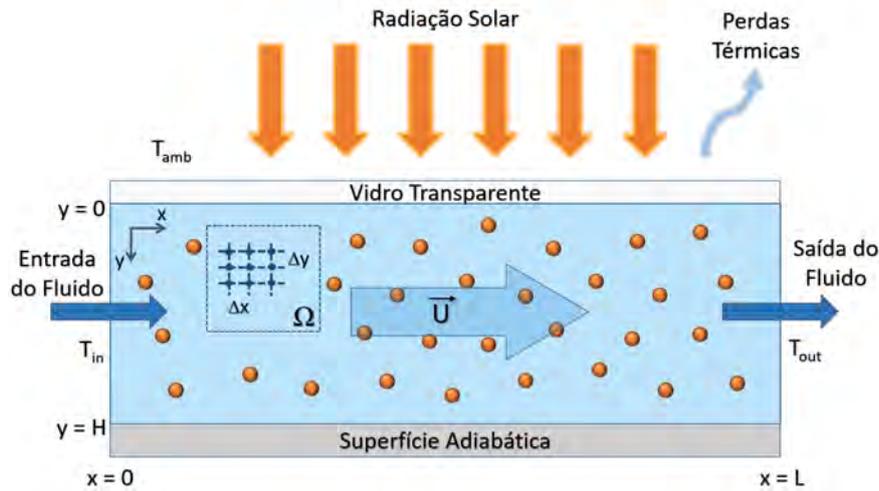
Figura 11 – Representação de um DASC em (a) 3D e (b) 2D.



Fonte: Adaptado de Vital et al. (2022)

Conforme a representação detalhada do modelo de transferência de calor (Figura 12), o NF é separado do ambiente por um vidro no topo ($y = 0$) e por uma superfície adiabática no fundo do coletor ($y = H$), em que H é a espessura do coletor. A entrada do NF no coletor ocorre em $x = 0$ e ele escoá até $x = L$, onde L é o comprimento do coletor. A velocidade do escoamento (U) é considerada uniforme.

Figura 12 – Modelagem da transferência de calor no DASC.



Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

A radiação solar incide perpendicularmente à superfície superior do coletor e a geração de calor no fluido de trabalho dá-se através da absorção de luz pelo NF. Ocorre transporte de calor devido ao escoamento do fluxo e difusão pelo fenômeno de condução, de forma que a equação governante do modelo é dada por (BHALLA; KHULLAR; TYAGI, 2019):

$$\kappa_{nf} \frac{\partial^2 T}{\partial y^2} - \frac{\partial q_r}{\partial y} = \rho_{nf} C_{nf} U \frac{\partial T}{\partial x}, \quad (15)$$

em que T é a temperatura do fluido e κ_{nf} , ρ_{nf} e C_{nf} são a condutividade térmica, a densidade e o calor específico do NF, respectivamente.

As condições de contorno da Equação 15 são dadas por:

$$T|_{x=0} = T_{in}, \quad (16)$$

$$\kappa_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=0} = h_{perdas} (T - T_{amb}), \quad (17)$$

e

$$\kappa_{nf} \frac{\partial T}{\partial y} \Big|_{y=H} = 0, \quad (18)$$

em que T_{in} é a temperatura de entrada do NF no coletor (com valor constante), T_{amb} é a temperatura ambiente e $h_{perdas} = 10 \text{ W/m}^2\text{K}$ (DUAN et al., 2018b; JEON; PARK; LEE, 2016) é o coeficiente de transferência de calor por convecção, que contabiliza as perdas térmicas do coletor para o ambiente. Como não há transferência de calor pelo fundo do coletor (Equação 18), são consideradas apenas as perdas pelo topo (Equação 17).

As soluções da Equação 15 fornecem os valores de temperatura $T(x, y)$ em função da posição no coletor, o que permite analisar a performance do dispositivo em cenários com diferentes parâmetros. Um dos indicadores de desempenho do coletor é a temperatura de saída do NF (T_{out}), que é obtida através da média aritmética dos valores de temperatura para $x = L$, dada pela seguinte expressão:

$$T_{out} = \frac{1}{N_y} \sum_{n=1}^{N_y} T(L, y), \quad (19)$$

em que $N_y = \frac{H}{\Delta y}$ é a quantidade de linhas na malha de diferenças finitas. A partir da temperatura de saída do NF, é possível obter os outros dois principais indicadores de desempenho do CSAD: as eficiências energética e exérgica.

A eficiência energética (η_{en}) é definida como a razão entre a energia absorvida pelo NF e a energia incidente no coletor, sendo expressa na seguinte forma (DUFFIE; BECKMAN; BLAIR, 2020):

$$\eta_{en} = \frac{\dot{m}C_{nf}(T_{out} - T_{in})}{A_c G_0}, \quad (20)$$

em que \dot{m} é a vazão mássica do NF no coletor e A_c é a área da superfície superior do coletor.

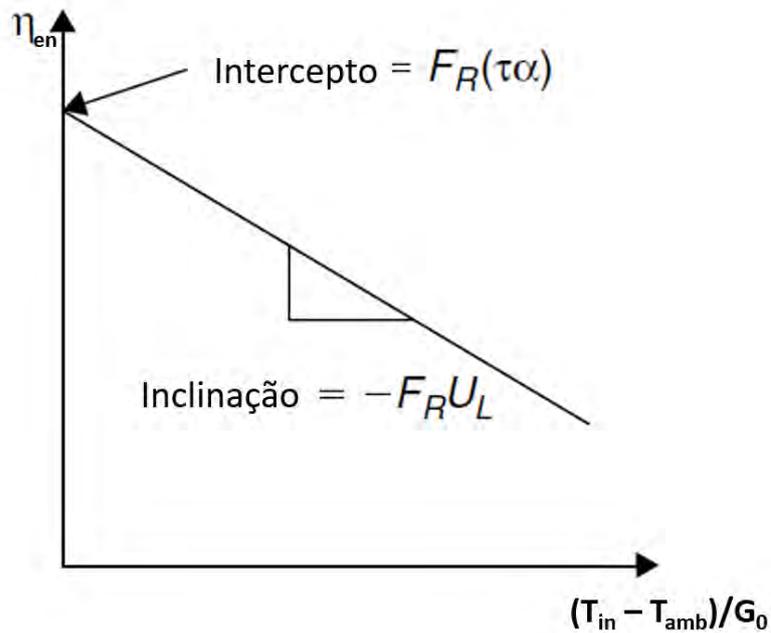
Uma forma usual de caracterizar o comportamento térmico de um coletor solar é através da sua curva de eficiência, que é obtida pelo cálculo da eficiência energética para diferentes valores de temperatura de entrada do fluido no coletor. A partir desses valores, é gerada uma curva da eficiência energética em função da temperatura de entrada normalizada, como no exemplo mostrado na Figura 13.

Para alguns tipos de coletores (incluindo os coletores de absorção direta), a curva pode ser modelada como uma reta na seguinte forma (KALOGIROU, 2013):

$$\eta_{en} = F_R(\tau_0\alpha_0) - \frac{F_R U_L (T_{in} - T_{amb})}{G_0}, \quad (21)$$

em que $F_R(\tau_0\alpha_0)$ é o intercepto da curva com o eixo vertical e representa o valor de máxima eficiência do coletor e o produto $F_R U_L$ é dado pela inclinação da reta e quantifica as perdas térmicas no coletor.

Figura 13 – Exemplo de curva de eficiência de um coletor solar térmico.



Fonte: Adaptado de Kalogirou et al. (2016)

Enquanto a eficiência energética aborda exclusivamente a quantidade da energia gerada em um sistema, a eficiência exergética mensura a qualidade da energia produzida. A eficiência exergética considera a Segunda Lei da Termodinâmica e é uma medida do quanto um processo real se aproxima de um processo ideal (reversível) (KALOGIROU et al., 2016). Dessa forma, essa variável avalia a capacidade de gerar trabalho mecânico do calor gerado por um sistema (NUÑEZ et al., 1998). A eficiência exergética para dispositivos termosolares é expressa como (SHARAF et al., 2019; PETELA, 1964):

$$\eta_{ex} = \frac{\dot{m}C_{nf}(T_{out} - T_{in})\left(1 - \frac{T_{amb}}{T_{out}}\right)}{A_c G_0 \left(1 - \frac{4T_{amb}}{3T_{sun}} + \frac{T_{amb}^4}{3T_{sun}^4}\right)}, \quad (22)$$

em que $T_{sun} = 5800$ K é a temperatura do sol.

3 MATERIAIS E MÉTODOS

Neste capítulo são descritos os procedimentos utilizados para a obtenção dos resultados do trabalho. O capítulo está dividido em duas seções: a primeira trata da descrição teórica e a segunda dos procedimentos experimentais adotados para a realização do trabalho.

3.1 DESCRIÇÃO TEÓRICA

Nesta seção são apresentados os métodos teóricos utilizados no trabalho. São descritas as propriedades ópticas dos NFs, as simulações do CSAD e do CSAD lenticular e o processo de otimização do espectro de absorção dos NFs.

3.1.1 Propriedades Ópticas dos Nanofluidos

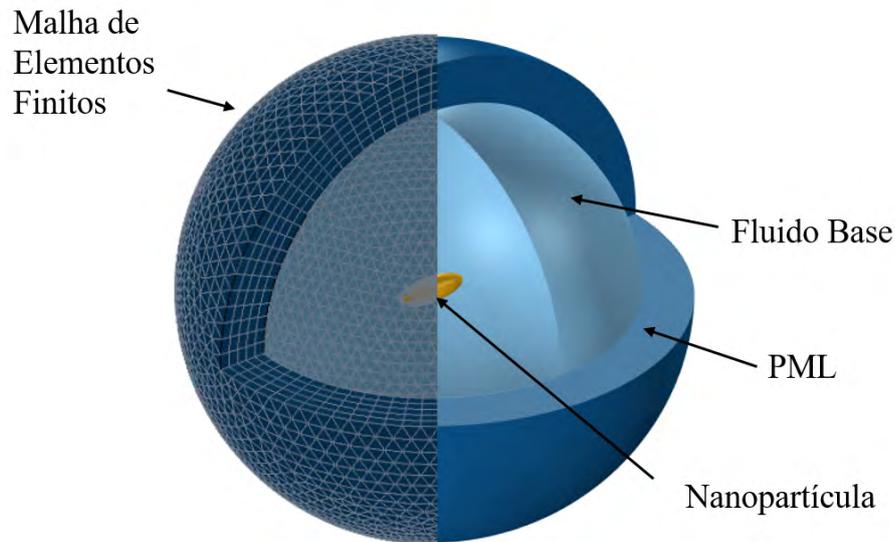
No presente trabalho, foi utilizada a abordagem analítica da Teoria de Mie para os cálculos de propriedades ópticas de partículas esféricas e o MEF para as NPs com outras morfologias.

O MEF foi concebido inicialmente para cálculos estruturais na área de mecânica dos sólidos, mas o seu uso foi rapidamente expandido para outras áreas da engenharia e da física (BATHE, 2007). O método visa a obtenção de soluções aproximadas para equações diferenciais a partir da discretização do domínio físico do problema em subdomínios, permitindo a análise de estruturas geometricamente complexas. Esses subdomínios (ou elementos) podem assumir diferentes geometrias (retângulos, triângulos ou tetraedros, por exemplo) e o conjunto dos elementos é denominado malha de elementos finitos. A redução das dimensões dos elementos (refinamento da malha) resulta numa maior precisão das soluções, porém também tem como consequência o aumento do custo computacional para obtenção da solução. Após a discretização do domínio físico, é escolhida uma função de interpolação (geralmente linear) para aproximar a variação da grandeza física entre elementos vizinhos (JIN, 2015). Em seguida, são aplicadas as leis físicas que regem o problema, o que resulta na geração de um sistema de equações a ser resolvido numericamente.

Neste trabalho, a aplicação do MEF foi realizada através do software *COMSOL Multiphysics*, extensamente utilizado para obtenção de propriedades ópticas de NPs plasmônicas (KHOURY; NORTON; VO-DINH, 2009; GHARIBSHAHI et al., 2020; DAUD et al., 2022). O domínio do problema é definido em três dimensões e são modelados a NP, o meio hospedeiro (fluido base do NF) e uma *Perfectly Matched Layer* (PML), que consiste numa região absorvedora que evita reflexões do campo eletromagnético. Esses elementos e a discretização do domínio estão mostrados na Figura 14.

Utilizando o módulo de ondas eletromagnéticas, é possível obter soluções para o campo

Figura 14 – Domínio computacional no software *COMSOL Multiphysics*.



Fonte: O Autor (2023)

elétrico (\mathbf{E}) através da Equação da Onda (derivada das Equações de Maxwell) apresentada a seguir (ZHAO et al., 2008):

$$\nabla \times \frac{1}{\mu} (\nabla \times \mathbf{E}) - k^2 (\varepsilon - \frac{j\sigma}{\omega\varepsilon_0}) \mathbf{E} = 0 \quad (23)$$

Em que μ é a permeabilidade, ε_0 é a permissividade no vácuo e σ é a condutividade elétrica.

A partir dos valores de campo, é possível calcular a seção de choque de espalhamento através da integração do vetor de Poynting numa esfera imaginária ao redor da NP. Adicionalmente, a partir da integração das perdas de energia no domínio da NP (considerando perdas magnéticas, por condução e por polarização), obtém-se a seção de choque de absorção (YUSHANOV; CROMPTON; KOPPENHOEFER, 2013). Para validação do modelo empregado, foram obtidas as propriedades ópticas para NPs esféricas e os valores foram comparados com os obtidos através de método analítico (Teoria de Mie).

3.1.2 Simulação do Coletor Solar de Absorção Direta

Para avaliar a performance do CSAD, a Equação 15 foi resolvida numericamente através do Método das Diferenças Finitas. O método utiliza aproximações das derivadas presentes na equação diferencial, transformando o problema num sistema de equações algébricas. Para tal, o domínio do NF (Ω), representado na Figura 12, foi discretizado numa malha retangular com espaçamentos $\Delta x = 5$ mm na direção horizontal e $\Delta y = 1$ μ m na direção vertical. Assim,

as derivadas parciais envolvendo a temperatura do NF foram aproximadas na seguinte forma (MAZUMDER, 2015; RUGGIERO; LOPES, 1997):

$$\frac{\partial T}{\partial x} = \frac{T(x + \Delta x) - T(x - \Delta x)}{2\Delta x} \quad (24)$$

e

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2} = \frac{T(y + \Delta y) - 2T(y) + T(y - \Delta y)}{\Delta y^2}. \quad (25)$$

O sistema de equações gerado foi resolvido através do Método Iterativo de Gauss-Seidel (ÖZİŞİK et al., 2017; MAZUMDER, 2015). O critério de convergência utilizado foi de variação de 10^{-4} nos valores de temperatura e o modelo foi validado com resultados numéricos presentes na literatura (BHALLA; KHULLAR; TYAGI, 2019; TYAGI; PHELAN; PRASHER, 2009). Toda a solução foi implementada em *scripts* no software *MATLAB*.

Para regime de baixas concentrações de NPs (caso explorado no trabalho), as propriedades térmicas do NF são praticamente iguais aos do fluido base (VITAL et al., 2021; CABALEIRO et al., 2015). Assim, foram adotados os valores das propriedades térmicas da água (GREEN; SOUTHARD, 2019).

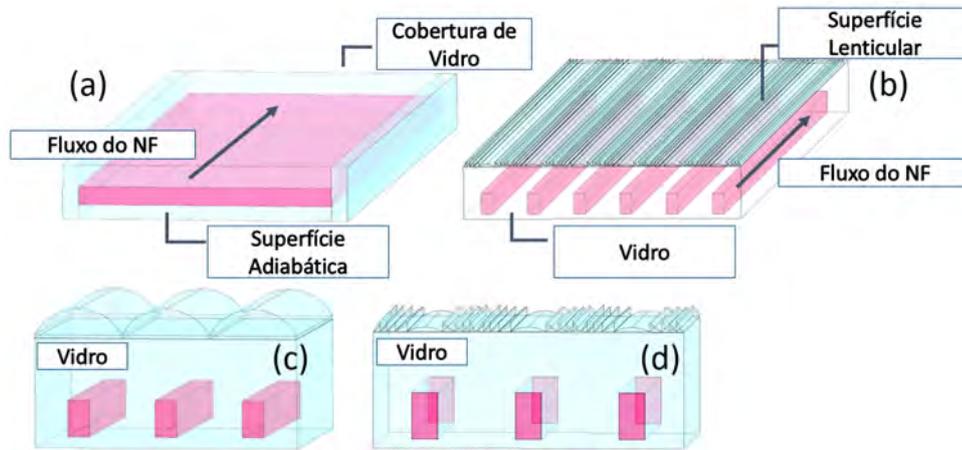
3.1.3 Simulação do Coletor de Absorção Direta Lenticular

Considerando que um dos maiores desafios para a implementação de um CSAD é o custo dos NFs, é desejável minimizar a quantidade de fluido utilizada no coletor. Em coletores solares, é possível manter a área de coleta de radiação reduzindo as dimensões do elemento absorvedor por meio de sistemas de concentração solar (RABL, 1985; DUFFIE; BECKMAN; BLAIR, 2020). Os sistemas de concentração mais utilizados são os de calha parabólica, fresnel linear, torre central e disco parabólico (LOVEGROVE; STEIN, 2012). Todos esses tipos de sistemas, que utilizam espelhos como elementos concentradores, necessitam de sistemas de rastreamento solar e foram concebidos para aplicações nos regimes de média e alta temperaturas. Para aplicações em baixas temperaturas e sem necessidade de rastreamento, são empregados os coletores parabólicos compostos, que também utilizam elementos refletivos para concentrar luz solar (KIM; HAN; SEO, 2008; GOSWAMI, 2022).

O sistema de concentração proposto neste trabalho consiste numa configuração lenticular que focaliza a radiação solar incidente em dutos que contêm o NF, reduzindo a quantidade de fluido necessária em comparação a um CSAD tradicional, como mostrado na Figura 15.

O sistema lenticular pode ser baseado em lentes cilíndricas, como mostrado na Figura 15(c) ou lentes fresnel, apresentado na Figura 15(b),(d).

Figura 15 – Modelo do CSAD Lenticular. (a) CSAD tradicional; (b) CSAD Lenticular; (c) Sistema lenticular com lentes cilíndricas; (d) Sistema lenticular com lentes fresnel.



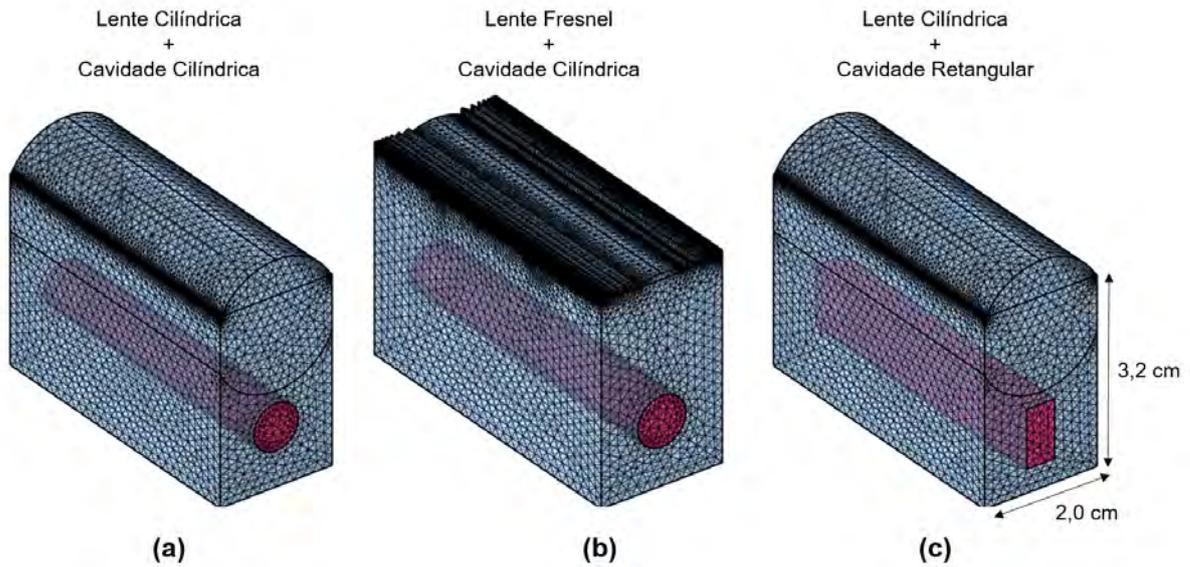
Fonte: O Autor (2023)

Para analisar os desempenhos óptico e térmico do coletor lenticular, foram realizadas a modelagem e a simulação do dispositivo no software *COMSOL Multiphysics*, utilizando o MEF. Para reduzir o custo computacional das simulações e considerando que o coletor consiste num arranjo de estruturas lenticulares em paralelo, optou-se por realizar a simulação de apenas uma estrutura lenticular de cada tipo (lente cilíndrica ou lente fresnel), como apresentado na Figura 16. Foram analisados coletores com as cavidades que contêm o NF apresentando geometria cilíndrica Figura 16(a, b) e retangular Figura 16(c), porém com a mesma área de seção transversal. As dimensões utilizadas foram selecionadas visando a possibilidade de fabricação de um protótipo para validar o modelo computacional. Além das estruturas lenticulares, também foi analisado o modelo de um CSAD tradicional com a mesma área de coleta para fins comparativos.

Para análise do comportamento óptico do coletor, foi empregado o módulo de óptica de raios do software. Foi utilizada uma pupila com 6 cm de diâmetro e as duas lentes exploradas possuem a mesma distância focal (22 mm). A malha de elementos finitos utilizada foi tetraédrica, definida com base em testes de sensibilidade. O dispositivo foi avaliado quanto à sensibilidade ao ângulo de incidência da radiação e ao comportamento relativo à dispersão de luz.

O desempenho térmico do coletor foi avaliado utilizando o módulo de transferência de calor do software. As relações utilizadas são as mesmas aplicadas ao CSAD tradicional, dadas pelas Equações 15 a 22. O modelo do coletor lenticular, entretanto, é mais complexo que o modelo do CSAD tradicional, visto que deve ser considerada a difusão de calor no vidro e a absorção de luz varia de acordo com o caminho óptico que os raios incidentes percorrem no NF. A partir da análise térmica, foram obtidas a temperatura de saída, a eficiência energética e a eficiência exergética dos coletores.

Figura 16 – Geometrias do CSAD Lenticular exploradas no software *COMSOL Multiphysics*.



Fonte: O Autor (2023)

3.1.4 Otimização via Algoritmo Genético

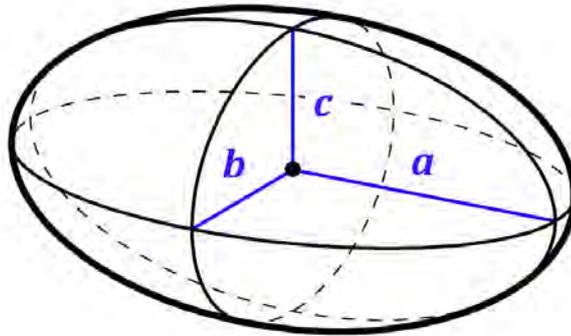
Como apresentado anteriormente no Quadro 1, há uma elevada quantidade de características que influenciam no desempenho dos coletores de absorção direta, o que torna importante a obtenção de combinações desses fatores que maximizem a performance dos coletores (KARAMI; BOZORGI; DELFANI, 2021; DINIZ; VITAL; GÓMEZ-MALAGÓN, 2022). Analisar todas as combinações possíveis de parâmetros é computacionalmente custoso, o que limita a resolução ou a extensão das faixas de valores dos dados a avaliar. Uma solução para isso é a aplicação de técnicas voltadas ao design de experimentos, como por exemplo o Método de Taguchi (BHALLA; KHULLAR; TYAGI, 2019; TSUI, 1992) e o Método de Superfície de Resposta (GORJI; RANJBAR, 2017; GORJI; RANJBAR, 2015). Entretanto, em estudos numéricos, uma forma eficiente de realizar a otimização do desempenho de coletores é utilizando Algoritmo Genético (AG).

AGs são algoritmos estocásticos de otimização inspirados em mecanismos evolucionários presentes na Teoria de Darwin (MIRJALILI, 2019). Para aplicações em CSAD, esses algoritmos podem ser utilizados para realizar a otimização do dispositivo como um todo (QIN et al., 2017) ou a otimização do espectro de absorção de NFs híbridos para uso nos coletores (SEO et al., 2020), permitindo a obtenção de fluidos com alto potencial de absorção de luz em regime de baixas concentrações de NPs.

Neste trabalho, um AG customizado é utilizado para otimização da fração de radiação incidente absorvida por um NF híbrido contendo nanoelipsoides de diferentes materiais (ouro e prata) com quatro diferentes valores de razão de aspecto (AR). A descrição da geometria de um

nanoelipsoide genérico é apresentada na Figura 17. Para este trabalho, os valores dos semi-eixos foram definidos como $b = c = 2.5 \text{ nm}$ e $a = AR \times b$, com valores de AR inteiros entre 1 e 4.

Figura 17 – Descrição de um elipsoide.



Fonte: Adaptado de Wikipedia (2022)

O algoritmo, é implementado como *script* no MATLAB e possui a fração de energia absorvida (Equação 13) como função alvo (ou função *fitness*). Os parâmetros a serem modificados para maximização da função alvo são as concentrações relativas dos diferentes tipos de NPs presentes no NF em questão, que são representadas como cromossomos. Inicialmente, são geradas populações com combinações aleatórias de cromossomos, que são otimizadas ao longo de gerações através dos mecanismos de seleção, recombinação e mutação. A Figura 18 apresenta o fluxograma do AG utilizado.

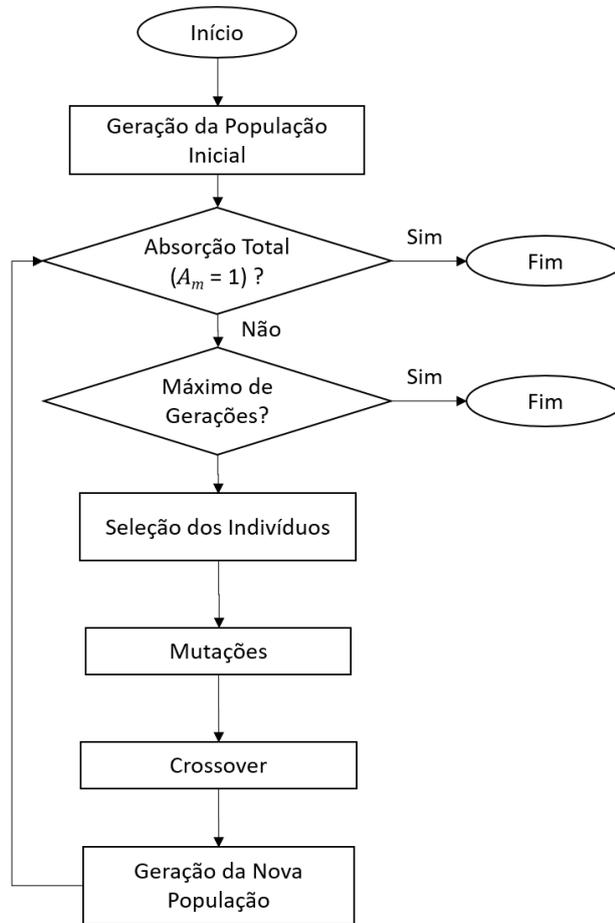
Os dados de entrada do algoritmo são as seções de choque de absorção para cada tipo de NP, previamente obtidas numericamente via *COMSOL Multiphysics*, e o espectro de absorção do fluido base. O primeiro passo do algoritmo é a geração de uma população inicial aleatória com um número de indivíduos N_i . Cada indivíduo da população possui 4 cromossomos e são representados na forma de um vetor de dados com 4 posições, em que cada posição indica a concentração relativa de partículas para cada tipo de partícula ($AR = 1$, $AR = 2$, $AR = 3$ e $AR = 4$), de forma que a soma dos valores das 4 posições é sempre unitária. Por exemplo, considerando uma população inicial com 5 indivíduos, é gerada a população mostrada na Figura 19.

Supondo que o algoritmo é aplicado a um NF com fração volumétrica $p = 10 \times 10^{-5}$, o indivíduo Ind_1 é um NF composto por concentrações relativas de $p = 1,5 \times 10^{-5}$ para NPs com $AR = 1$, $p = 0,5 \times 10^{-5}$ para NPs com $AR = 2$ e assim por diante.

O passo seguinte é a obtenção do espectro de absorção de cada indivíduo, considerando as contribuições de cada tipo de NP na forma:

$$\alpha_{AR} = \frac{f_{AR} \times p}{V_{npAR}} \sigma_{absAR}, \quad (26)$$

Figura 18 – Fluxograma do algoritmo genético customizado utilizado no trabalho.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 19 – Exemplo de uma população com 5 indivíduos.

	<i>AR = 1</i>	<i>AR = 2</i>	<i>AR = 3</i>	<i>AR = 4</i>
<i>Ind</i> ₁	[0, 15	0, 05	0, 45	0, 35]
<i>Ind</i> ₂	[0, 23	0, 18	0, 57	0, 02]
<i>Ind</i> ₃	[0, 08	0, 13	0, 71	0, 08]
<i>Ind</i> ₄	[0, 00	0, 21	0, 42	0, 37]
<i>Ind</i> ₅	[0, 81	0, 02	0, 11	0, 06]

Fonte: O Autor (2023)

em que f_{AR} é a concentração relativa para cada valor de AR . Assim, o coeficiente de atenuação para cada indivíduo pode ser encontrado pela seguinte expressão:

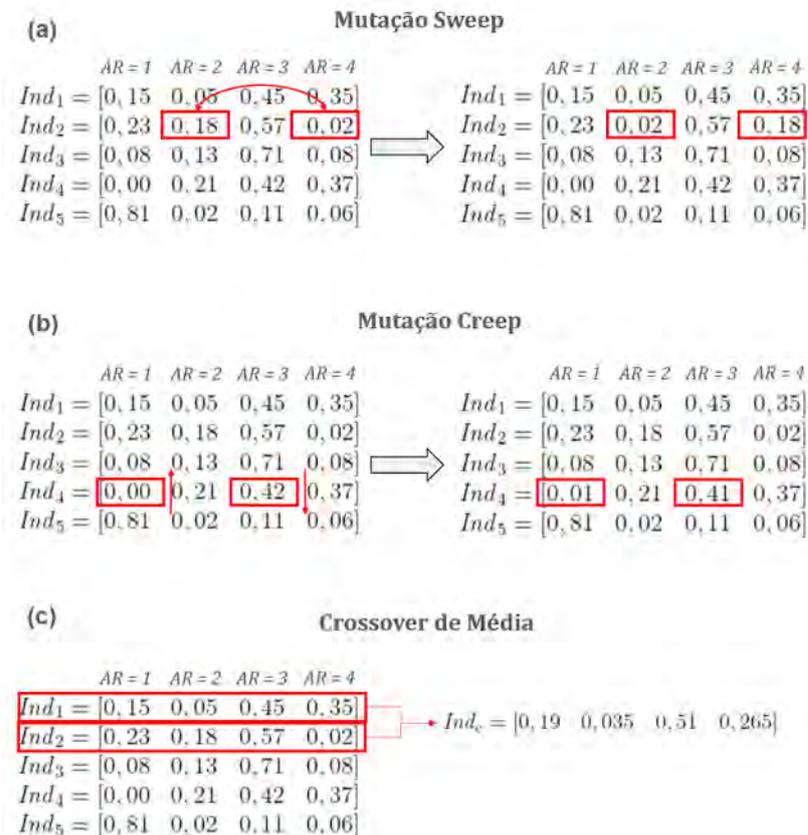
$$\alpha_{nf}(Ind_n) = \alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3 + \alpha_4 + \alpha_{fb}, \quad (27)$$

em que α_{fb} é o coeficiente de atenuação do fluido base.

O passo seguinte é o cálculo do coeficiente de absorção solar ponderado pela expressão da Equação 13. Se algum dos indivíduos for capaz de absorver toda a radiação solar incidente ($A_m = 1$), o código é interrompido, já que o valor de A_m foi otimizado. Caso nenhum dos indivíduos forneça o valor otimizado, os indivíduos são ordenados de forma decrescente de acordo com o valor de A_m . Em seguida, é realizada a seleção: uma quantidade de indivíduos selecionados por elitismo (N_{elite}), ou seja, os N_{elite} melhores indivíduos são copiados e armazenados para fazer parte da próxima geração. Para evitar que o algoritmo fique preso em valores de máximos locais, também é determinado um valor N_{aleat} de indivíduos que são selecionados aleatoriamente para a próxima geração (mecanismo de aumento da diversidade genética).

Em seguida, indivíduos são selecionados aleatoriamente para a aplicação dos mecanismos de mutação e crossover. No mecanismo de mutação por *sweep*, há uma recombinação dos cromossomos de determinado indivíduo, como mostrado na Figura 20(a). Já na mutação por *creep*, é realizado um incremento no valor de um dos cromossomos e um decremento no valor de outro, de modo que a soma de todos os valores continue unitária, como mostrado na Figura 20(b). O mecanismo de crossover aplicado foi o de média, no qual um indivíduo é gerado através da média aritmética de dois indivíduos selecionados da população, como apresentado na Figura 20(c).

Figura 20 – Mecanismos de crossover e mutação no algoritmo genético.



Após a aplicação dos mecanismos mencionados, os indivíduos que não foram selecionados por elitismo ou não sofreram crossover ou mutação são descartados e são criados novos indivíduos para que a nova população tenha o mesmo tamanho da população inicial. Assim, os valores de A_m são calculados para a nova população e o processo é repetido até que seja encontrado um indivíduo com o valor máximo de $A_m = 1$ ou que seja alcançada uma quantidade predefinida de gerações.

3.2 DESCRIÇÃO EXPERIMENTAL

Nesta seção são descritos os procedimentos de caracterização térmica dos NFs e do CSAD lenticular.

3.2.1 Caracterização Térmica de Nanofluidos

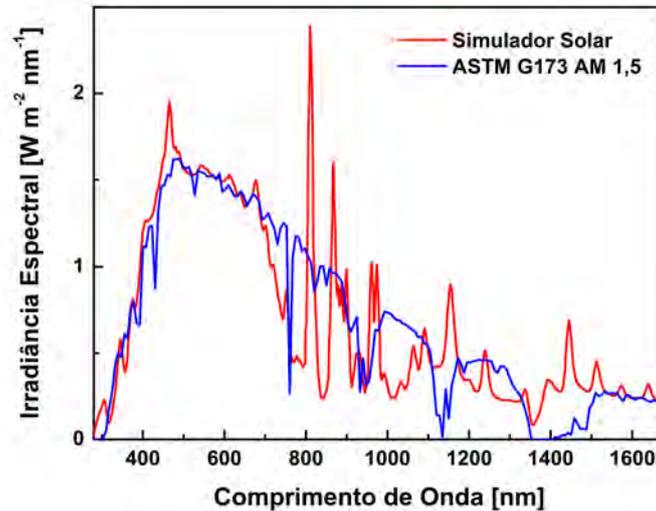
O comportamento da temperatura das amostras de NF sob radiação solar é analisado expondo uma amostra do fluido à luz fornecida por um simulador solar Newport LCS-100. O equipamento é classificado como classe A em relação ao casamento espectral, o que significa que o casamento espectral relativo entre a luz do simulador e a luz solar possui desvios entre 0,75 e 1,25 vezes em relação ao valor ideal. Em relação à uniformidade espacial da irradiância, o dispositivo é classe B (diferenças de até 5% entre valores de intensidade em diferentes regiões). Considerando a estabilidade temporal, o simulador é classe B, apresentando instabilidades de até 5% ao longo do tempo de experimento (COMMISSION et al., 2020). O gráfico da Figura 21 mostra a comparação entre o espectro fornecido pelo simulador e o espectro solar (STANDARD, 2008).

Um espelho côncavo guia o feixe e um diafragma íris ajusta a abertura para obter um ponto com 1 cm de diâmetro e intensidade de 450 W/m^2 na amostra. Uma câmera termográfica modelo FLIR E4 mede a temperatura da amostra por 30 minutos a uma taxa de quadros de 3,7 fps. O desvio máximo na medição é de 2% para a faixa de temperaturas explorada no trabalho (IMAGING, 2019). O método adotado para medir o desempenho da conversão fototérmica já foi explorado na literatura com configurações experimentais semelhantes (VIEIRA et al., 2021; CHEN et al., 2022). A Figura 22 mostra o diagrama esquemático do experimento.

O método utilizado permite comparações entre amostras de NFs compostos por diferentes tipos de NPs ou de diversas amostras de NFs de um mesmo material em diferentes concentrações volumétricas. As comparações são realizadas com base nas curvas de evolução da temperatura ao longo do tempo, que evidenciam a propensão dos fluidos para aplicações em energia solar de acordo com a máxima variação de temperatura alcançada durante o experimento.

As análises foram realizadas com NFs contendo os seguintes tipos de NPs: esferas de ouro (da empresa Nanocomposix), esferas de nitreto de titânio (obtidas em parceria (POPOV

Figura 21 – Irradiância espectral normalizada para o simulador solar e o espectro ASTM G173-03.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 22 – Diagrama esquemático do experimento para caracterização térmica de nanofluidos.



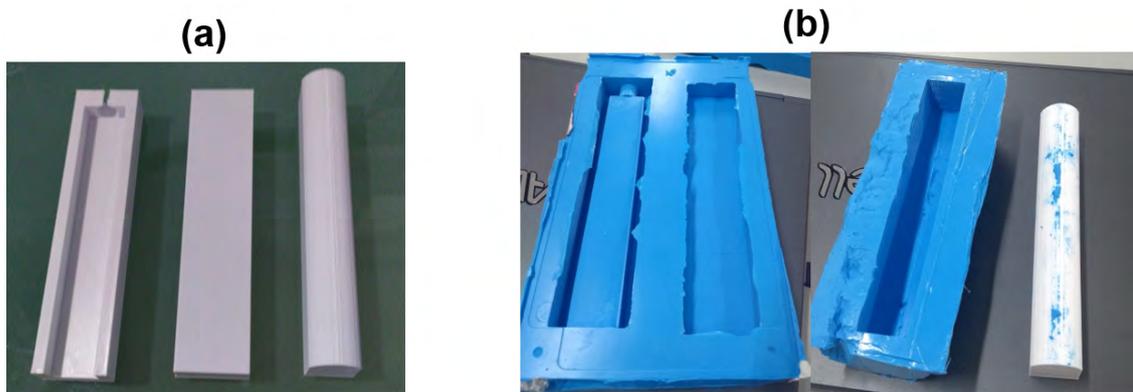
Fonte: O Autor (2023)

et al., 2019)), nanogaiolas metálicas (obtidas em parceria (NAZEMI; EL-SAYED, 2018)). As NPs de nitreto de titânio foram produzidas numa abordagem *top-down*, através do processo de ablação a laser pulsado em líquido. Já as nanogaiolas metálicas foram produzidas numa abordagem *bottom-up*, através da adição de íons de ouro a nanocubos de prata.

3.2.2 Caracterização do Coletor de Absorção Direta Lenticular

Para avaliação experimental do sistema lenticular, foram fabricados protótipos de um CSAD tradicional e um lenticular. A partir do modelo gerado no software *COMSOL Multiphysics*, foram exportados arquivos no formato *Standard Tessellation Language* (STL), a partir do qual foram impressas peças compostas do polímero poliácido láctico (PLA) numa impressora 3D modelo Sethi3D S3, mostrados na Figura 23(a). A partir dessas peças, foram confeccionados moldes em borracha de silicone, exibidos na Figura 23(b). Os moldes foram preenchidos com resina epóxi transparente da marca Redelease, o que resultou em peças transparentes com a mesma geometria das peças impressas em PLA. Devido à imperfeição geométrica dos moldes, as peças em resina precisaram passar por um processo de polimento para adquirir um bom nível de transmitância no espectro visível (aproximadamente 90%).

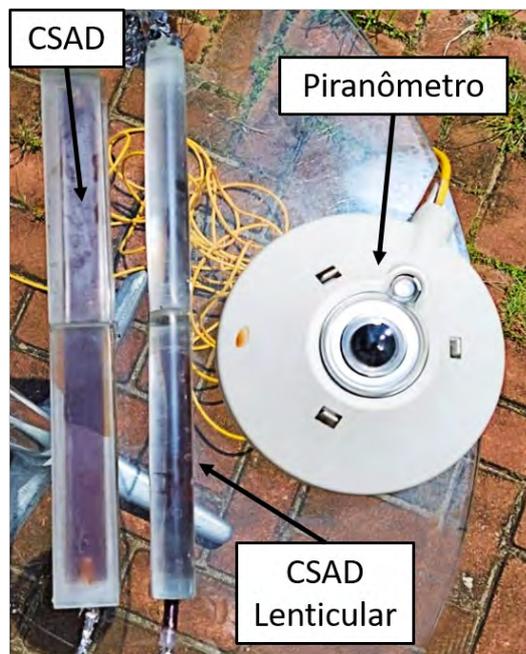
Figura 23 – Processo de fabricação dos protótipos de CSAD. (a) Peças em PLA; (b) Moldes em borracha de silicone; (c) Peças em resina epóxi transparente.



Fonte: O Autor (2023)

Foram realizados ensaios para comparar os desempenhos dos protótipos a partir da análise da evolução da temperatura dos coletores ao longo do tempo. Para realizar a medição de temperatura, foram inseridos dois termopares tipo J nas extremidades de cada um dos coletores. Os testes foram realizados sob radiação solar artificial (ensaio *indoor*) e natural (ensaio *outdoor*) e a irradiância instantânea foi medida a partir de um piranômetro modelo *Kipp&Zonen* CMP 6. Os dados de radiação e temperatura foram armazenados num *datalogger* modelo NOVUS FieldLogger. A configuração experimental é mostrada na Figura 24. Os ensaios *outdoor* foram realizados em Recife, entre os dias 19/10/2021 e 28/10/2021, no horário entre 11h e 12h.

Figura 24 – Configuração experimental para ensaios com CSAD lenticular.



Fonte: O Autor (2023)

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nesse capítulo são apresentados os resultados dos diversos estudos que compõem esta Tese. Para cada tópico, é realizada inicialmente uma breve contextualização, seguida pela apresentação dos resultados e discussões pertinentes.

4.1 NANOCASCAS DE OURO DOPADAS COM FERRO

O uso de NFs compostos por nanocascas de ouro com núcleo de sílica dispersas em água apresenta-se promissor para aplicações em CSAD, dado que é possível obter desempenho superior e utilizando baixas concentrações, quando comparado ao uso de nanopartículas esféricas do mesmo material (DUAN et al., 2018b).

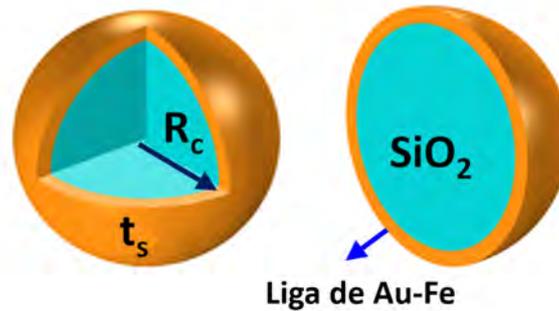
Por outro lado, estudos mostram que a adição de materiais dopantes em metais nobres induz modificações às propriedades ópticas dos materiais (SHIM et al., 2019; LIU et al., 2008). A adição de ferro como elemento dopante no ouro gera uma liga que apresenta maior absorção óptica e espalhamento óptico reduzido, quando comparada ao ouro puro (AMENDOLA et al., 2015; AMENDOLA et al., 2014). Essa alteração das propriedades ópticas dá-se pela introdução de transições interbanda pela adição de ferro. Além disso, os NFs que utilizam partículas compostas por essas ligas também apresentam maior estabilidade coloidal (AMENDOLA et al., 2013).

Dessa forma, o desempenho de um CSAD utilizando NFs compostos por nanocascas de ouro dopadas com ferro foi avaliado para diferentes níveis de dopagem e comparado ao desempenho de um coletor utilizando NF com nanocascas de ouro puro. Foram exploradas nanocascas com núcleo de sílica com raio $R_C = 60$ nm e espessura de casca $t_s = 20$ nm, como mostrado na Figura 25. Esse tipo de nanoestrutura tem processo de síntese química simples e já foi avaliado em outras aplicações de conversão fototérmica (HUSCHKA et al., 2011; XUAN; DUAN; LI, 2014).

A permissividade do material com diferentes quantidades de elemento dopante foi obtida aplicando interpolação linear aos dados experimentais disponíveis para o ouro puro (PALIK, 1998) e para uma liga com 84% de ouro e 16% de ferro (AMENDOLA et al., 2013; AMENDOLA et al., 2014). Nos gráficos da Figura 26, percebe-se uma alteração significativa nos valores da parte real (a) e da parte imaginária (b) da permissividade na faixa visível e infravermelho próximo com a adição de ferro ao ouro.

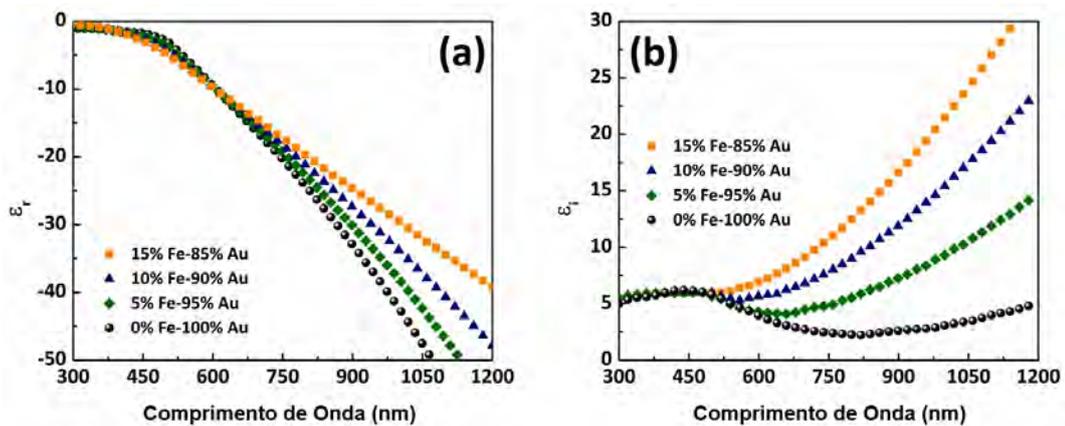
A presença de inclusões de ferro na estrutura da nanocasca de ouro introduz novas transições interbanda (LEE et al., 2003; BLABER; ARNOLD; FORD, 2010), que resultam no alargamento do espectro de absorção das NPs, como mostrado na Figura 27(a). Esse espectro mais largo favorece a absorção de radiação do espectro solar.

Figura 25 – Ilustração da nanocasca utilizada no NF para o CSAD.



Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2020)

Figura 26 – Parte real (a) e imaginária (b) da permissividade para o ouro dopado com ferro em diferentes níveis de dopagem.

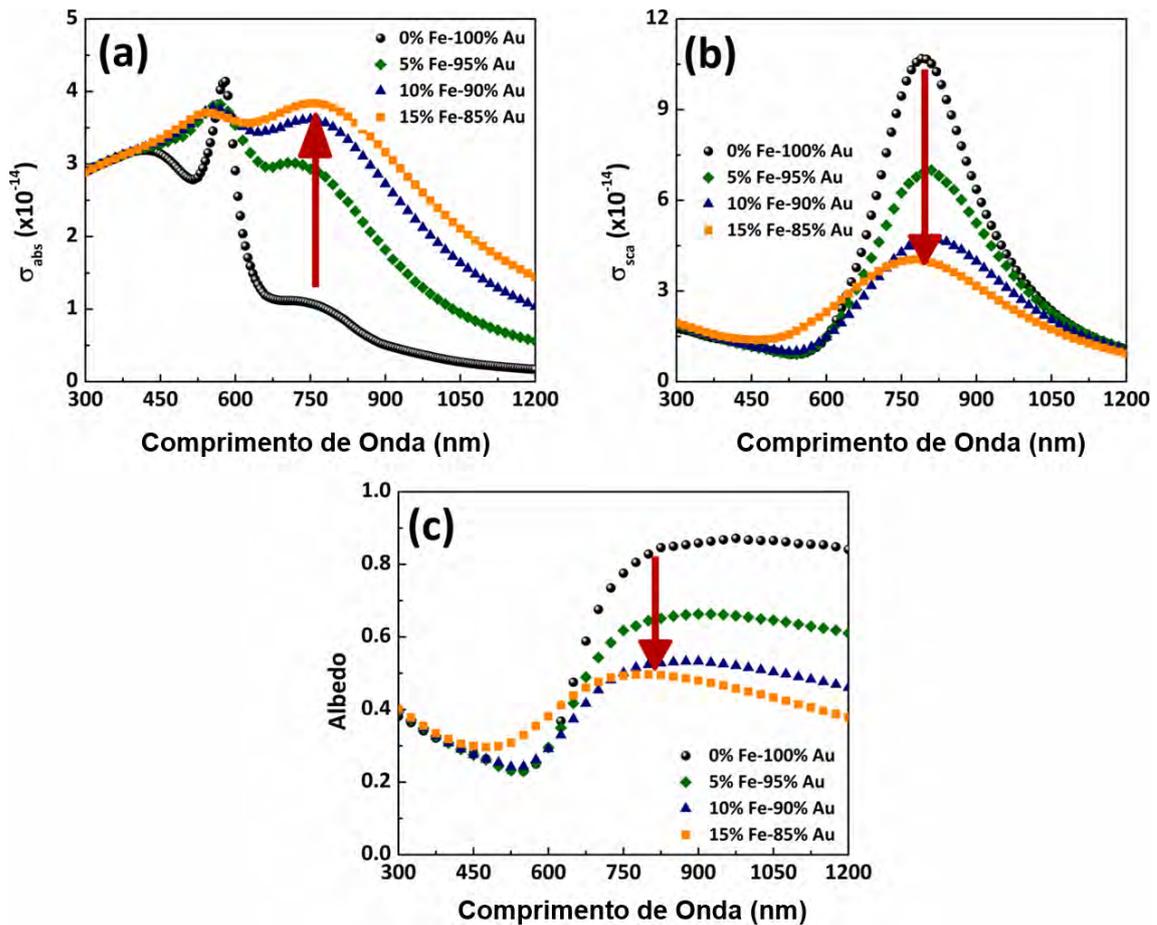


Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2020)

Um dos problemas no uso de NPs de grandes dimensões para absorção é que a seção de choque de espalhamento aumenta consideravelmente com o raio (conforme Equação 4). Porém, a adição do ferro como elemento dopante reduz esse impacto, visto que a seção de choque de espalhamento é minimizada na maior parte do espectro para níveis mais altos de dopagem, conforme o gráfico da Figura 27(b). Uma forma de avaliar a relação entre as seções de espalhamento e absorção é pela identificação do fator de albedo, definido pela razão $\sigma_{esp}/\sigma_{ext}$. Para aplicações de conversão fototérmica, é ideal que os valores do albedo sejam reduzidos, o que é alcançado para a maior parte do espectro com a adição de ferro como dopante em nanocascas de ouro, conforme mostrado na Figura 27(c).

Para avaliar o desempenho dos NFs contendo essas NPs, foram calculados os valores do coeficiente de absorção ponderado (Equação 13) para diferentes valores de fração volumétrica ($0 \leq p \leq 2 \times 10^{-5}$) e espessura ($0 \leq H \leq 2,5$ cm) da camada de NF. Os resultados são apresentados na Figura 28.

Figura 27 – Seções de choque de (a) absorção e (b) espalhamento e fator de albedo (c) para nanocascas de ouro com raio interno de 60 nm e espessura de 20 nm para diferentes dopagens.



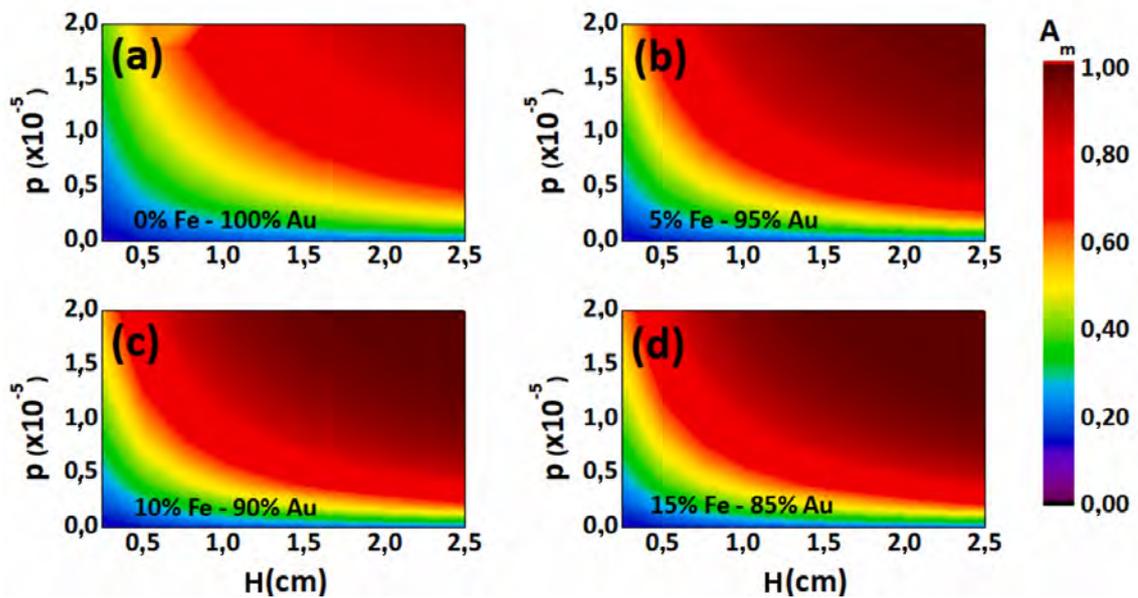
Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2020)

Para NPs sem a presença do elemento dopante, o máximo valor de A_m (Equação 13) é de aproximadamente 80% para uma concentração $p = 2 \times 10^{-5}$ e espessura $H = 2,5$ cm, como mostrado na Figura 28(a). Por outro lado, utilizando NPs com 15% de dopante, é possível absorver completamente a energia solar incidente ($A_m = 1$) para uma concentração $p = 1 \times 10^{-5}$ e espessura $H \approx 1,5$ cm (Figura 28(d)). O comportamento é semelhante para NPs com adição de 10% de elemento dopante (Figura 28(c)).

O comportamento térmico do CSAD foi analisado pela solução da Equação 15 pelo MDF, considerando um coletor com $H = 1$ cm, $p = 2 \times 10^{-5}$, $L = 1$ m, $A_c = 1$ m² e $U = 0,002$ m/s. Os perfis de distribuição espacial de temperatura dos coletores são mostrados na Figura 29 para NFs com NPs de ouro puro (a) e (c) e ouro dopado com ferro (b) e (d). Foram analisados os casos em que $T_{in} = T_{amb}$, Figura 29 (a, b), e $T_{in} = T_{amb} + 50$ K, Figura 29 (c, d).

No caso em que $T_{in} = T_{amb} = 298$ K, percebe-se um maior aumento da temperatura ao longo do coletor, que ocorre devido às perdas serem minimizadas. Já nos casos em que $T_{in} = T_{amb} + 50$ K, as perdas pelo topo são acentuadas, uma vez que as perdas por convecção

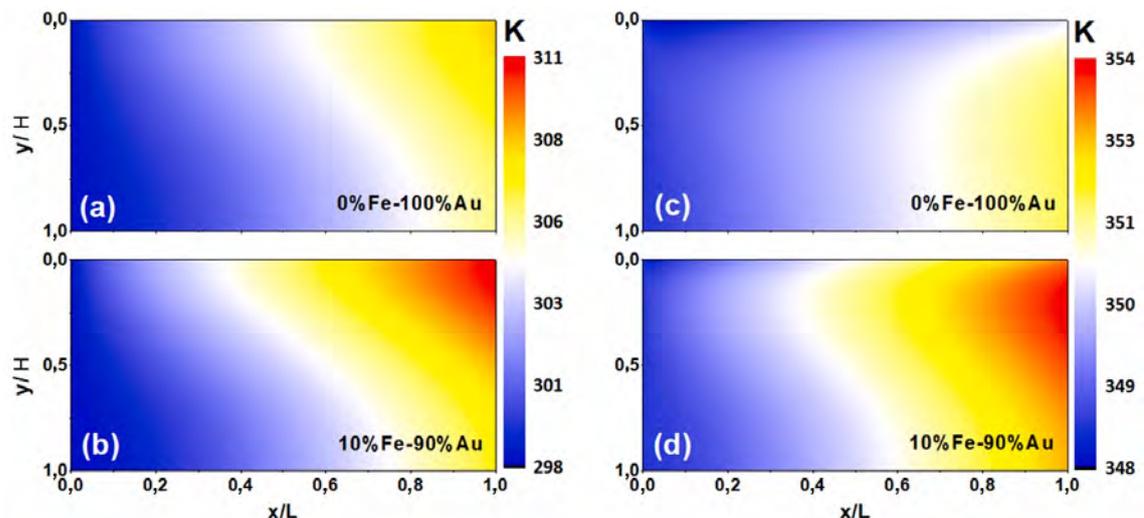
Figura 28 – Coeficiente de absorção ponderado (A_m) em função da fração volumétrica (p) e da espessura do coletor (H) para nanocascas de (a) ouro puro, (b) liga com 5% Fe - 95% Au, (c) liga com 10% Fe - 90% Au e (d) liga com 15% Fe - 85% Au.



Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2020)

são proporcionais à diferença $T - T_{amb}$ (Equação 17), causando uma menor variação entre as temperaturas de entrada e saída do coletor. Em relação ao dopante, percebe-se que os coletores que contêm NPs com ferro adicionado alcançam temperaturas significativamente mais elevadas do que os que contêm NPs de ouro puro.

Figura 29 – Perfis de temperatura para CSAD utilizando NFs com nanocascas de ouro puro (a) e (c) e ouro dopado com ferro (b) e (d). Foram analisados os casos em que $T_{in} = T_{amb}$ (a) e (b) e $T_{in} = T_{amb} + 50$ K (c) e (d).

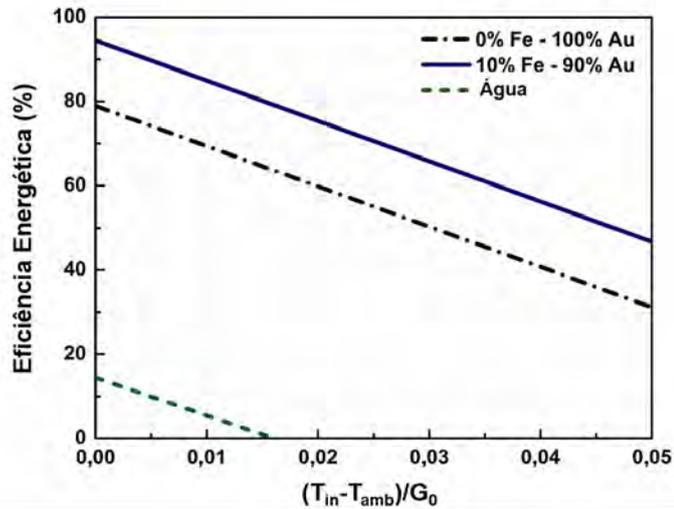


Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2020)

As eficiências energéticas de coletores utilizando nanocascas de ouro puro e nanocascas

de ouro dopado com ferro foram calculadas (Equação 20) e comparadas. A eficiência do coletor é obtida considerando diferentes valores de temperatura de entrada do NF no coletor, mostrada na Figura 30.

Figura 30 – Curva de eficiência energética para CSAD utilizando NF com nanocascas de ouro puro e nanoesferas de ouro dopado com ferro.



Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2020)

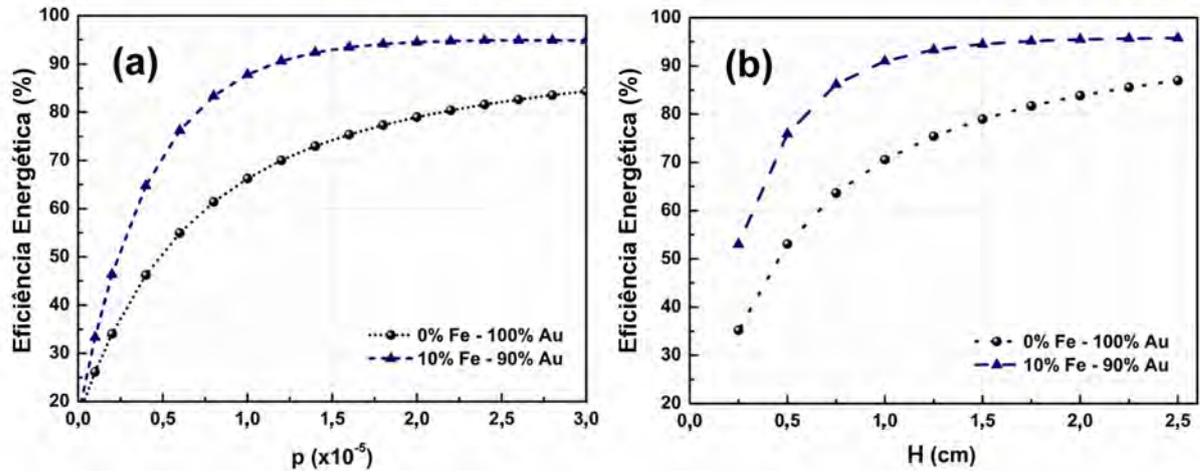
Os coletores que utilizam NFs possuem desempenhos notavelmente superiores ao de um CSAD utilizando água pura como fluido de trabalho. É notável também o ganho de performance pela adição do elemento dopante: enquanto o coletor que utiliza nanocascas de ouro puro apresenta eficiência máxima de aproximadamente 80%, o coletor com nanocascas dopadas com ferro apresenta eficiência térmica de 95%. As inclinações das retas apresentadas na Figura 30 são idênticas, o que é esperado já que os coletores analisados estão submetidos ao mesmo coeficiente de transferência de calor por convecção.

A eficiência energética do CSAD com nanocascas de ouro também foi avaliada em função da fração volumétrica do NF e da espessura do coletor, como mostrado nos gráficos da Figura 31.

É notável, novamente, o desempenho superior do coletor utilizando NF com NPs de ouro dopado com ferro para uma mesma concentração ou espessura, quando comparado ao desempenho do coletor com nanocascas de ouro puro. O coletor com partículas contendo ferro apresenta um efeito de saturação quando a eficiência energética chega a aproximadamente 95%, por consequência da total absorção da radiação incidente para $p \geq 2 \times 10^{-5}$, Figura 31(a), ou $H \geq 1,5$ cm, Figura 31(b). Por outro lado, o coletor com nanocascas de ouro puro ainda é capaz de chegar a valores mais elevados de eficiência com o aumento da concentração ou da espessura, visto que o NF não foi capaz de absorver toda a radiação incidente para as condições investigadas.

Os resultados apresentados nesta seção foram publicados no artigo intitulado “*Thermo-*

Figura 31 – Eficiência energética de CSAD com nanocascas de ouro em função (a) da fração volumétrica do NF (com $H = 1$ cm) e (b) da espessura do coletor (com $p = 2 \times 10^{-5}$).



Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2020)

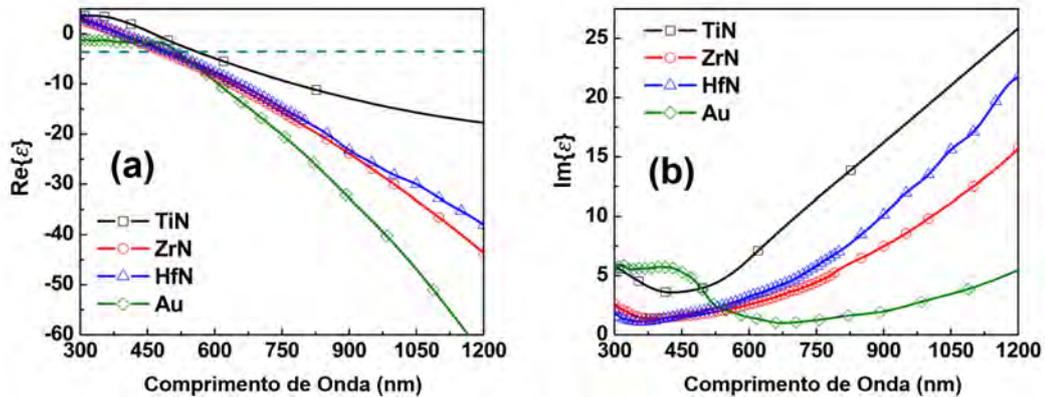
optical performance of iron-doped gold nanoshells-based nanofluid on direct absorption solar collectors”, na revista *Solar Energy* (FAROOQ et al., 2020).

4.2 NANOFLUIDOS DE NITRETOS DE METAIS DE TRANSIÇÃO

A largura espectral de RPSL de nanoesferas de metais nobres não é suficiente para que essas partículas absorvam radiação em todo o espectro solar. Apesar de ser possível a obtenção de espectros de absorção mais largos com NPs metálicas de morfologias mais complexas (como por exemplo cascas, bastões e cubos), pode ser desafiador produzir esses tipos de partículas em larga escala. Nanoesferas de materiais plasmônicos alternativos, como alguns nitretos de metais de transição (TiN, ZrN e HfN) apresentam bandas de absorção largas na faixa do visível e infravermelho próximo (LALISSE et al., 2016). Além disso, esses materiais possuem características favoráveis ao uso em aplicações de absorção solar, dentre as quais destacam-se a elevada estabilidade química, alto ponto de fusão, alta condutividade térmica e resistência à corrosão. Nitretos de metais de transição possuem custo consideravelmente inferior ao de metais nobres (KARABALLI; MONFARED; DASOG, 2020; GULER et al., 2012). Outro aspecto importante em relação a esses materiais é que suas propriedades ópticas podem ser ajustadas de acordo com parâmetros de síntese (características estequiométricas e temperatura de processo), que modificam a composição e a estrutura cristalina do material (GULER; SHALAEV; BOLTAS-SEVA, 2015). Considerando as características dos nitretos metálicos, nesta seção é avaliada a performance de CSAD com NFs contendo nanoesferas compostas por TiN, ZrN e HfN em água. O desempenho de coletores com esses materiais também é comparado ao de coletores com nanoesferas de ouro.

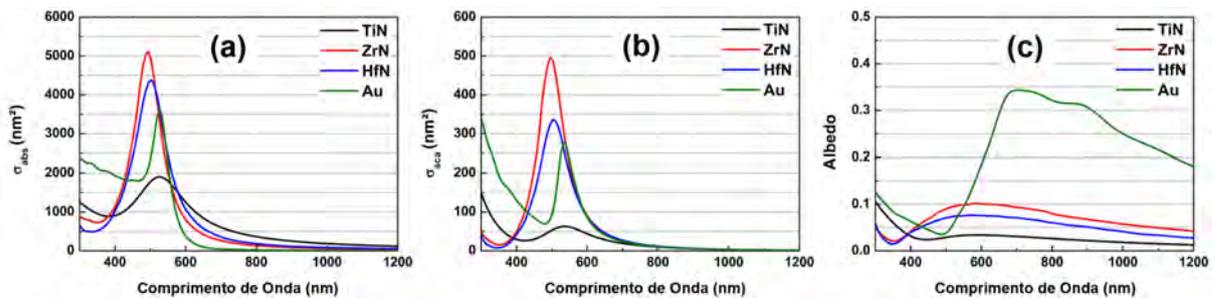
Os gráficos da Figura 32 mostram as partes real e imaginária da permissividade dos nitretos e do ouro. Percebe-se que as curvas de permissividade dos nitretos apresentam inclinações mais suaves que a curva do ouro, o que resulta na proximidade da condição de Fröhlich para uma maior faixa espectral. Como consequência, as NPs compostas pelos nitretos apresentam espectros de absorção mais largos, como exhibe o gráfico da Figura 33(a).

Figura 32 – Parte real (a) e imaginária (b) da permissividade para os nitretos metálicos e ouro. A linha tracejada em (a) indica a condição de Fröhlich.



Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

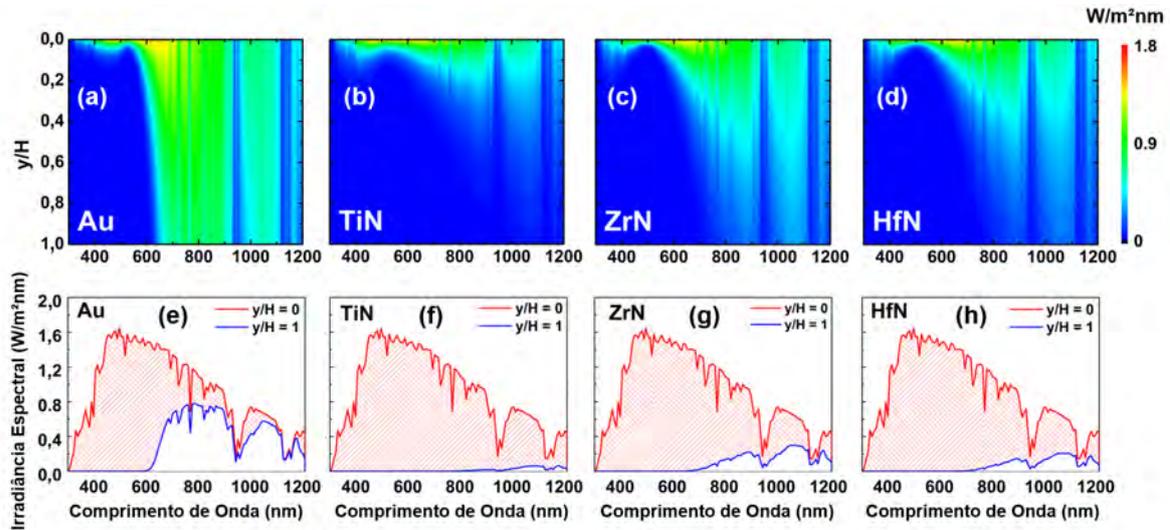
Figura 33 – Seções transversais de (a) absorção e (b) espalhamento e (c) fator de albedo para nanoesferas com raio de 20 nm compostas por nitretos metálicos e ouro.



Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

Além de espectros de absorção mais largos, percebe-se também que as NPs compostas por ZrN e HfN apresentam pico de RPSL com maior amplitude que as NPs de ouro. As NPs de TiN, apesar de apresentarem menor amplitude de pico de RPSL, são as que possuem espectro mais largo dentre todas as NPs analisadas. Quanto ao espectro de espalhamento, mostrado na Figura 33(b), percebe-se padrão semelhante ao espectro de absorção. Entretanto, ao analisar o albedo, no gráfico da Figura 33(c), verifica-se que as NPs de ouro possuem albedo muito mais elevado que as dos nitretos para grande faixa do espectro considerado, indicando um alto nível de espalhamento em relação à absorção. Dessa forma, NPs com partículas baseadas nos nitretos possuem maior capacidade de absorção de energia solar, como pode ser verificado nos gráficos da Figura 34.

Figura 34 – (a-d) Irradiância espectral ao longo de uma camada de NF com $a = 20$ nm, $p = 5 \times 10^{-5}$ e $H = 1$ cm. (e-h) Irradiâncias espectrais em $y = 0$ e $y = H = 1$ cm.



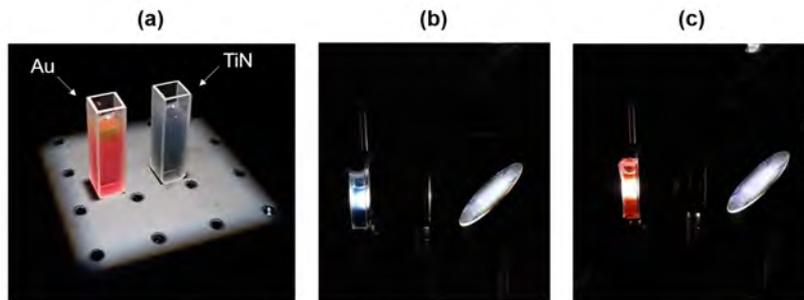
Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

Nos gráficos da Figura 34(a-d), é destacado o comportamento da irradiância espectral ao longo de uma camada de NF para os materiais analisados, de acordo com a Lei de Beer. Nesta análise, considera-se a irradiância solar incidente na superfície do NF $G_0 = 1000$ W/m². Percebe-se que o NF de ouro absorve toda a radiação na faixa entre 300 e 650 nm, porém tem alta transmitância para comprimentos de onda maiores. Já os NFs compostos pelos nitretos são capazes de absorver parte significativa da radiação em toda a faixa espectral analisada. As linhas de absorção para comprimentos de onda de aproximadamente 950 e 1100 nm comum a todos os NFs são características da água. Nos gráficos da Figura 34(e-h), são exibidas as irradiâncias espectrais no topo do coletor (linha vermelha) e no fundo do coletor (linha azul). A hachura em vermelho corresponde à irradiância absorvida por cada um dos NFs. Os fluidos baseados em nitretos apresentam maiores níveis de absorção solar que o ouro, com destaque para o TiN, que absorve praticamente toda a radiação incidente na camada de 1 cm considerada.

A fim de verificar experimentalmente a diferença de desempenho entre os NFs baseados em nitretos e o NF de ouro, foi realizada a caracterização dos NFs de ouro e nitreto de titânio, conforme descrito na Seção 3.2.1. A amostra de NF de ouro utilizada foi adquirida da *Nanocomposix* e a amostra de TiN foi sintetizada por ablação a laser e cedida pelo grupo de Andrei Kabashin, da *Aix-Marseille Université*. A Figura 35 mostra os NFs avaliados sob a radiação proveniente do simulador solar.

Os resultados da caracterização térmica dos fluidos, mostrados no gráfico da Figura 36, mostram os aumentos de temperatura dos NFs e dos seus fluidos base puros (o NF de ouro é baseado em água e o de nitreto de titânio é baseado em acetona). Nota-se um maior aumento de temperatura para o NF de TiN em relação ao de ouro. A elevação máxima de temperatura

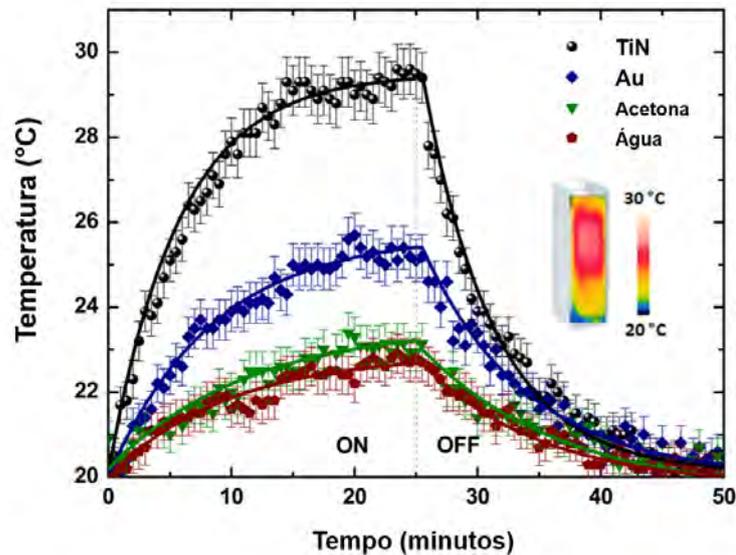
Figura 35 – (a) Amostras dos NFs de ouro e nitreto de titânio. (b) NF de nitreto de titânio e (c) NF de ouro sob iluminação do simulador solar.



Fonte: O Autor (2023)

do NF de TiN é de 9,4 °C, enquanto que a do NF de ouro é de 5,4 °C. O inserto no gráfico da Figura 36 mostra a distribuição de temperaturas ao longo da cubeta com NF de TiN, obtidas por termografia. A região de incidência da radiação alcança valores de temperatura mais elevados que o restante da cubeta. As curvas da Figura 36 foram obtidas pela média dos valores de temperatura na região de 1 cm² na qual a radiação incide na amostra.

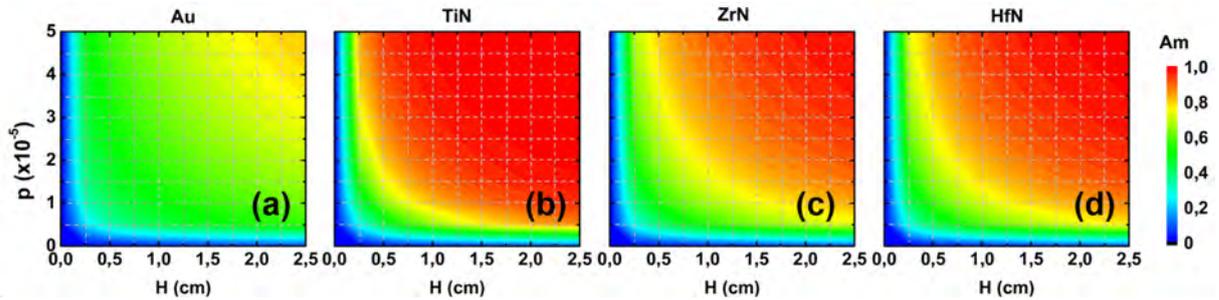
Figura 36 – Caracterização térmica dos NFs de nitreto de titânio e ouro.



Fonte: Adaptado de Farooq et al. (2023)

Para a análise dos coletores com os NFs de nitretos, primeiramente foi analisada a porção de energia absorvida pelos NFs, dada pelo coeficiente de absorção ponderado (Equação 13). O coeficiente é analisado para diversos valores de fração volumétrica e espessura do coletor no gráfico da Figura 37. O mapa de cores evidencia a maior absorção pelos NFs baseados em nitretos em comparação ao ouro. Considerando, por exemplo, uma concentração $p = 4 \times 10^{-5}$ e uma espessura $H = 1$ cm, os três NFs de nitretos absorvem mais que 90% da radiação incidente. Por outro lado, para o mesmo cenário, o NF de ouro absorve menos que 70%.

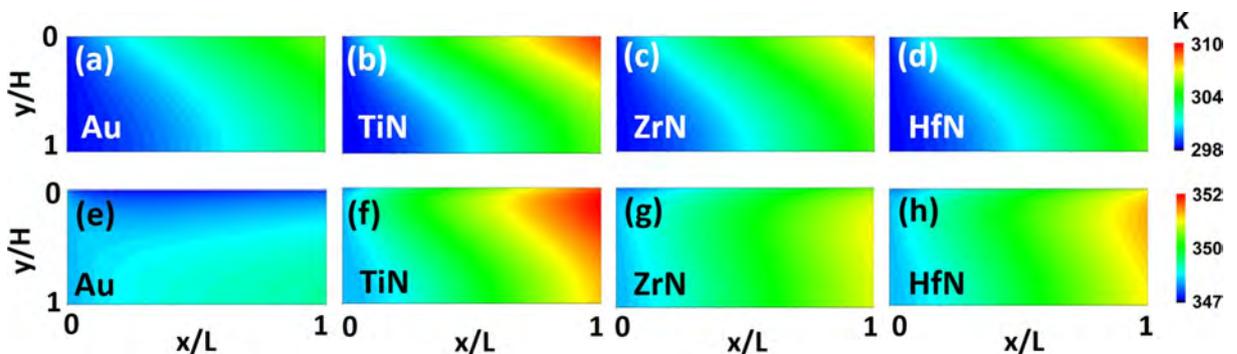
Figura 37 – Coeficiente de absorção ponderado (A_m) em função da fração volumétrica (p) e da espessura do coletor (H).



Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

A disparidade na capacidade de absorção de energia dos NFs explorados reflete-se no desempenho térmico dos CSAD utilizando esses fluidos, que pode ser verificado pelos perfis de temperatura apresentados na Figura 38, explorando um coletor com $H = 1$ cm, $p = 5 \times 10^{-5}$, $L = 1$ m, $A_c = 1$ m² e $U = 0,002$ m/s. As temperaturas nos coletores que utilizam NFs com nitretos alcançam valores mais elevados que o coletor utilizando NF de ouro. A variação de temperatura ($\Delta T = T_{out} - T_{in}$) nos casos em que $T_{in} = T_{amb}$ alcança o valor de 5,2 K para o NF de ouro, 8,7 K para o NF de TiN, 8,3 K para o NF de HfN e 8,2 K para o NF de ZrN. Por outro lado, na condição de fluido preaquecido o coletor com NF de ouro tem um ganho de temperatura de apenas 0,4 K, enquanto que os coletores com nitretos apresentam ganhos de 3,3 K para NF de TiN, 2,9 K para NF de HfN e 2,5 K para NF de ZrN. Os valores de ganho de temperatura são reduzidos com o aumento da temperatura de entrada devido ao aumento das perdas térmicas com o coletor operando a temperaturas mais elevadas.

Figura 38 – Perfis de temperatura para CSAD utilizando NFs de Au (a,e), TiN (b,f), ZrN (c,g) e HfN (d, h). Foram analisados os casos em que $T_{in} = T_{amb}$ (a-d) e $T_{in} = T_{amb} + 50$ K (e-h).

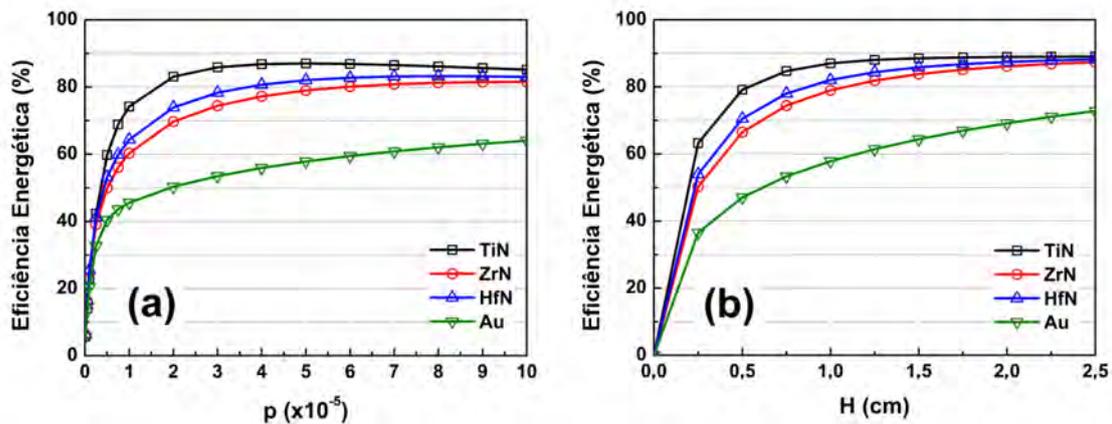


Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

Os valores de eficiência energética do CSAD em função da concentração, apresentados na Figura 39(a), mostram que, para valores de fração volumétrica de aproximadamente 5×10^{-5} ,

os coletores com NFs de nitretos alcançam eficiência superior a 80%, enquanto o coletor com NF de ouro tem eficiência energética de aproximadamente 60%. Apesar de o coletor que utiliza NF de TiN destacar-se como o de maior eficiência, percebe-se uma discreta redução de desempenho para concentrações superiores a 5×10^{-5} . Essa redução ocorre devido à absorção de luz muito significativa numa região ainda próxima ao topo, por onde ocorrem as perdas por convecção (BHALLA; KHULLAR; TYAGI, 2019).

Figura 39 – Eficiência energética do CSAD com nitretos em função (a) da fração volumétrica (com $H = 1$ cm) e (b) da espessura do coletor (com $p = 5 \times 10^{-5}$).



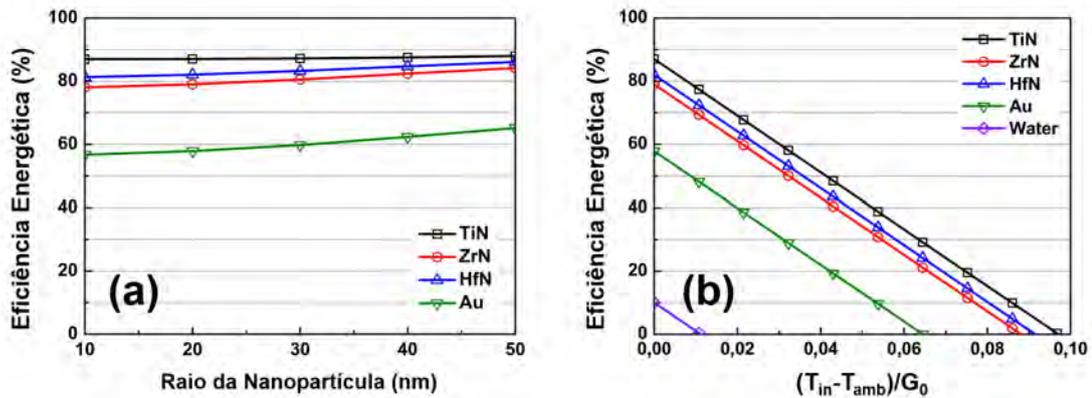
Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

Com o aumento da espessura do coletor, por outro lado, é possível maximizar a quantidade de energia absorvida sem aumentar as perdas térmicas. Conforme mostrado no gráfico da Figura 39(b), a eficiência energética dos coletores com NFs de nitretos aumenta com a espessura até o valor de aproximadamente 2,0 cm, para o qual toda a radiação é absorvida por esses fluidos e a eficiência se mantém por volta de 89%. Por outro lado, o NF de ouro não é capaz de absorver toda a radiação com essa espessura, considerando a concentração analisada ($p = 5 \times 10^{-5}$), de forma que a eficiência do coletor com esse NF chega a aproximadamente 72% para uma espessura de 2,5 cm.

A avaliação da eficiência energética do CSAD em função do tamanho das NPs utilizadas é mostrada na Figura 40(a). Percebe-se que a eficiência térmica do coletor que utiliza NF de TiN é a menos afetada pelo tamanho das NPs utilizadas. Por outro lado, o coletor com NF de ouro é o mais afetado, apresentando aumento de eficiência de aproximadamente 10% comparando o uso de partículas com raio $a = 50$ nm com NPs de raio $a = 10$ nm.

As curvas de eficiência para os CSAD utilizando água e NFs de nitretos e ouro como fluido de trabalho são exibidas na Figura 40(b). O desempenho dos coletores com NF é consideravelmente superior ao coletor utilizando água pura. Nota-se também que os coletores com NFs de nitretos apresentam eficiências energéticas no mínimo 30% maiores que a do coletor utilizando NF de ouro.

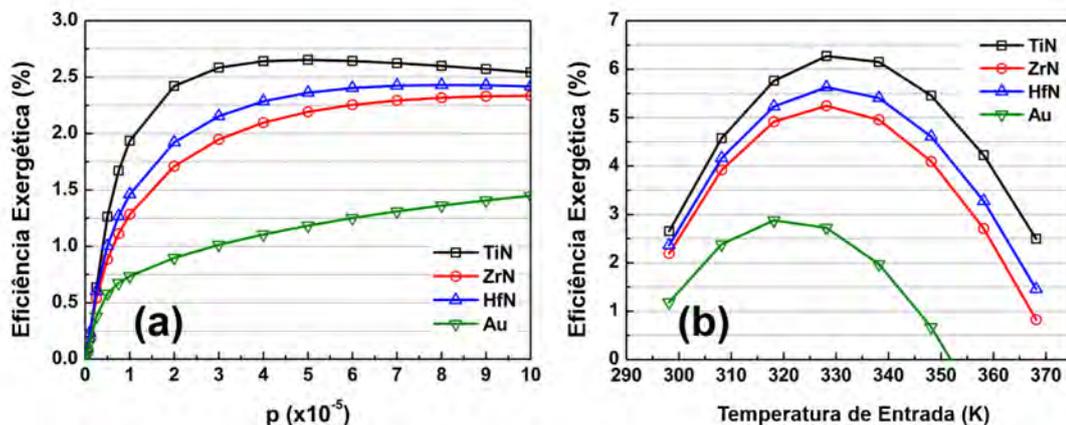
Figura 40 – Eficiência energética do CSAD com nitretos em função (a) do raio da NP e (b) da temperatura de entrada normalizada (com $p = 5 \times 10^{-5}$ e $H = 1$ cm).



Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

A eficiência exergética dos coletores (Equação 22) em função da concentração, como mostrado no gráfico da Figura 41(a), possui a mesma tendência da eficiência energética. Por outro lado, o comportamento da eficiência exergética em função da temperatura de entrada diverge do obtido para a eficiência energética. Isso ocorre porque a eficiência exergética depende da quantidade de energia absorvida e da temperatura de saída do coletor. Com o aumento da temperatura de entrada do NF, há uma redução na quantidade de energia absorvida e um aumento da temperatura de saída, ocasionando um *trade-off* entre essas variáveis. O comportamento do CSAD é semelhante ao reportado na literatura para coletores de placa plana (FARAHAT; SARHADDI; AJAM, 2009). A eficiência exergética máxima para o coletor com NF de ouro é de 2,9%, enquanto que as dos coletores com NFs de nitretos são de 6,3%, 5,2% e 5,6% para os NFs de TiN, ZrN e HfN, respectivamente.

Figura 41 – Eficiência exergética do CSAD com nitretos em função (a) da fração volumétrica (com $H = 1$ cm) e (b) da temperatura de entrada do fluido no coletor (com $p = 5 \times 10^{-5}$ e $H = 1$ cm).



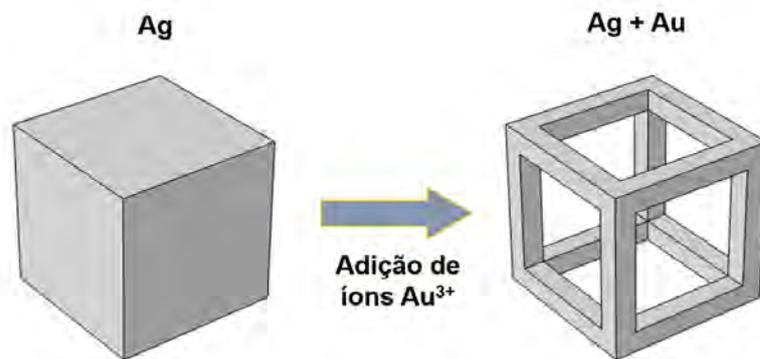
Fonte: Adaptado de Vital et al. (2021)

Os resultados de simulações apresentados nesta seção foram publicados no artigo intitulado “*Numerical assessment of transition metal nitrides nanofluids for improved performance of direct absorption solar collectors*”, na revista *Applied Thermal Engineering* (VITAL et al., 2021). Os resultados experimentais, em conjunto com resultados adicionais, estão contemplados no artigo “*Thermo-optical performance of bare laser-synthesized TiN nanofluids for direct absorption solar collector applications*” publicado na revista *Solar Energy Materials and Solar Cells* (FAROOQ et al., 2023).

4.3 NANOFLUIDOS COM NANOGAIOLAS METÁLICAS

Nanogaiolas metálicas são nanoestruturas formadas a partir do processo de adição de íons de ouro a nanocubos de prata, que resulta na remoção de parte da prata, dando origem a uma estrutura oca de ouro e prata (NAZEMI; EL-SAYED, 2018), como ilustrado na Figura 42.

Figura 42 – Ilustração do processo de formação de nanogaiolas metálicas.



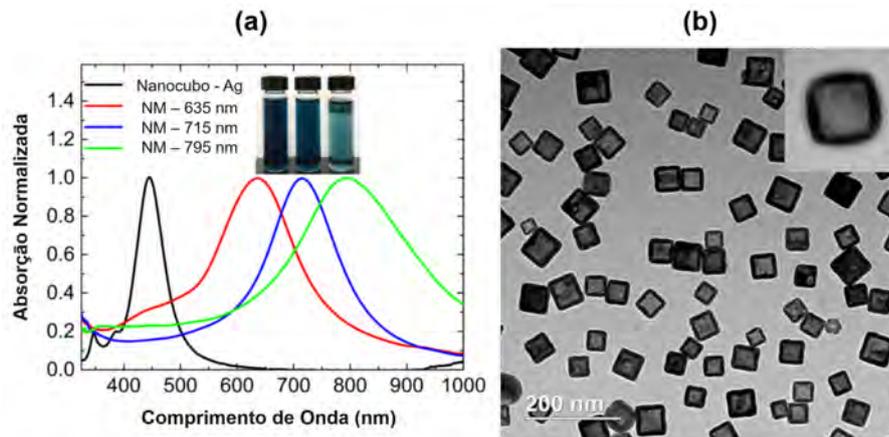
O Autor (2023)

De acordo com as quantidades de ouro adicionado e prata removida, é possível obter diferentes permissividades do material (a depender da liga metálica resultante) e diferentes morfologias (partículas com diferentes razões de aspecto). Conseqüentemente, os picos de RPSL dessas nanoestruturas podem ser ajustados, o que torna essas NPs apropriadas para uso em diferentes aplicações (SKRABALAK et al., 2008), dentre as quais destacam-se imageamento fotoacústico (KIM et al., 2010; YANG et al., 2007), terapia fototérmica (WANG et al., 2013), evaporação de água (QIU et al., 2020) e síntese eletroquímica (NAZEMI; EL-SAYED, 2018). A partir do ajuste adequado, é possível obter NPs com pico de ressonância largo e compatível com o espectro de emissão solar, o que torna essas partículas passíveis de uso em aplicações de absorção de energia solar (BOLDOO et al., 2020). Desta forma, o uso dessas NPs em CSAD é avaliado nesta seção.

O gráfico da Figura 43(a) mostra os espectros de absorção de nanogaiolas de diferentes composições e morfologias e, conseqüentemente, com diferentes picos de RPSL (em 635 nm,

715 nm e 795 nm). Para comparação, também é mostrado o espectro de absorção do nanocubo de prata a partir do qual são sintetizadas as nanogaiolas. Os NF mostrados no inserto do gráfico na Figura 43(a) foram disponibilizados para uso nessa tese pelo grupo de Mostafa A. El-Sayed, do *Georgia Institute of Technology*.

Figura 43 – (a) Espectro de absorção de nanogaiolas metálicas e (b) microscopia eletrônica de transmissão das nanogaiolas com pico de absorção em 635 nm.



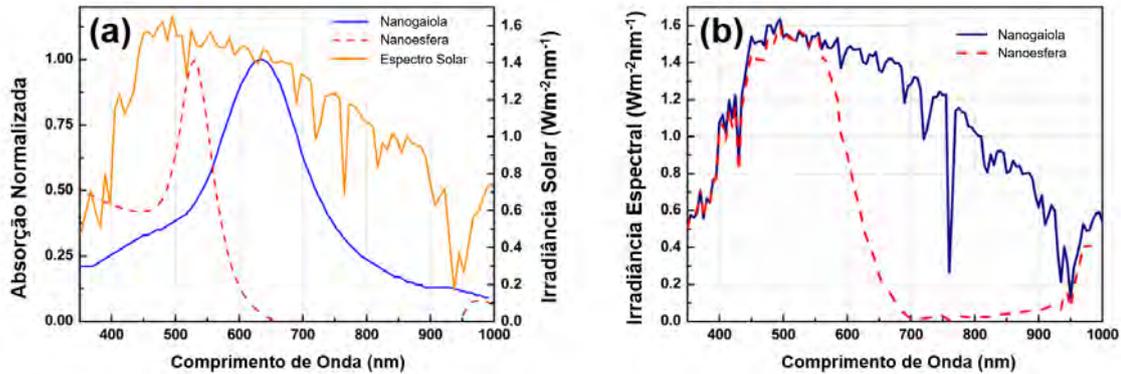
Fonte: Adaptado de Nazemi e El-Sayed (2018)

As partículas com pico de ressonância em 635 nm são compostas por 33% de ouro e 67% de prata, possuem arestas com dimensão média de 50 nm e não são completamente ocas, como mostrado na microscopia da Figura 43(b). Considerando a compatibilidade da absorção da NP com o espectro solar, essas NPs são as mais apropriadas para aplicações de absorção solar dentre as apresentadas. Assim, foram analisados os NFs contendo esse tipo de NP.

A comparação do espectro de emissão solar com os de absorção de NF utilizando as nanogaiolas metálicas e NF com nanoesferas de ouro com diâmetro de 50 nm é mostrada na Figura 44(a). Nota-se que o sol apresenta pico de emissão em aproximadamente 500 nm, enquanto que o NF com nanoesfera tem pico de absorção em 530 nm. Verificando as posições dos picos de absorção e do pico de emissão solar, percebe-se que as esferas apresentam pico de absorção mais próximo do pico de emissão do sol que as gaiolas. Entretanto, a largura do espectro de absorção das gaiolas faz com que o NF com nanogaiolas absorva uma maior porção da radiação solar, como mostrado no gráfico da Figura 44(b), que apresenta os espectros de radiação absorvida pelos NFs considerando uma concentração $p = 10^{-6}$ e espessura $H = 1$ cm.

Percebe-se que, devido ao espectro de absorção estreito, o NF com esferas absorve pouca radiação com comprimento de onda superior a 700 nm. Por outro lado, o NF com nanogaiolas absorve luz em toda a faixa do espectro solar analisada. A razão de radiação absorvida pelos NFs, dada pelo coeficiente de absorção ponderado, é apresentada no gráfico da Figura 45. A largura espectral da seção de absorção das nanogaiolas resulta numa elevada absorção de radiação solar por NFs contendo essas estruturas num regime de baixíssima concentração. Considerando, por

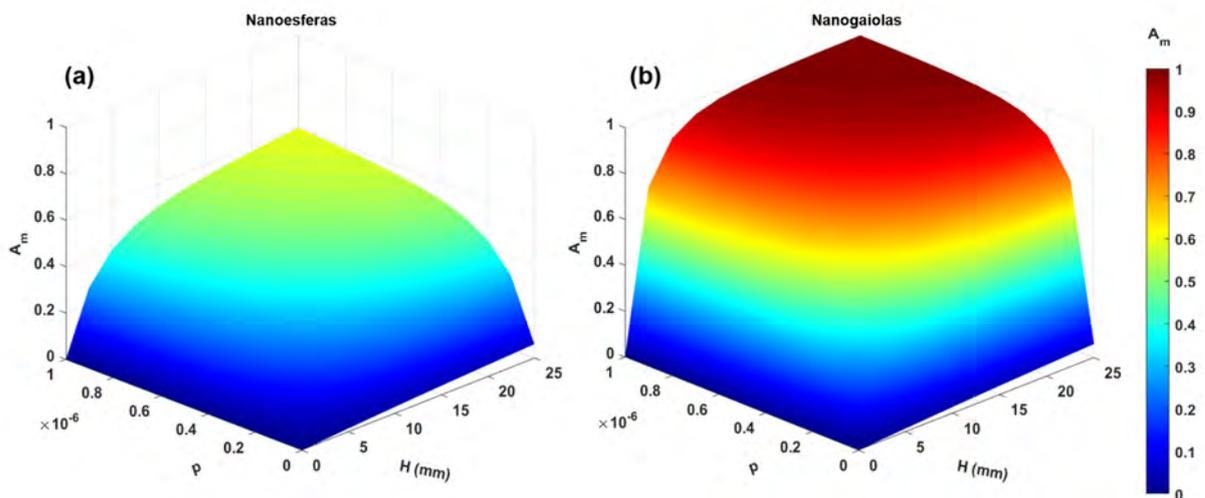
Figura 44 – (a) Espectro de absorção de NFs com nanoesferas de ouro com raio $a = 25$ nm e nanogaiolas metálicas comparados ao espectro solar. (b) Espectros de radiação absorvida por nanoesferas de ouro e nanogaiolas metálicas com $p = 10^{-6}$ e $H = 1$ cm.



Fonte: O Autor (2023)

exemplo, uma fração volumétrica de 10^{-6} e uma camada de NF com espessura $H = 2, 5$ cm, o NF com nanogaiolas é capaz de absorver completamente o espectro solar, enquanto que o NF com nanoesferas absorve aproximadamente 60% da energia incidente.

Figura 45 – Coeficiente de absorção ponderado (A_m) em função da concentração e da espessura para os NFs contendo (a) nanoesferas de ouro e (b) nanogaiolas metálicas.



Fonte: O Autor (2023)

A comparação da performance de NFs contendo nanogaiolas com NFs que compostos por outras estruturas plasmônicas é apresentada na Tabela 1, a partir dos valores do coeficiente de absorção ponderado. Verifica-se que os NFs com nanogaiolas são apropriados para aplicações de absorção solar em concentrações inferiores às demais estruturas em ordens de magnitude.

Tabela 1 – Coeficiente de absorção solar ponderado para diferentes nanoestruturas plasmônicas.

Material	Morfologia	Fração Vol.	H (cm)	Am (%)	Referência
Au+Ag	Nanogaiola	1×10^{-6}	1,0	96,6	-
SiO ₂	Nanoesfera	1×10^{-4}	0,5	20,0	(CHEN et al., 2018)
Au	Nanoesfera	3×10^{-5}	1,0	50,0	(RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2015)
Ag	Nanoesfera	3×10^{-5}	1,0	65,0	(RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2015)
CuO	Nanoesfera	1×10^{-3}	1,0	89,5	(CHEN et al., 2017)
CuO+ATO	Nanoesfera	1×10^{-3}	1,0	99,6	(CHEN et al., 2017)
TiN	Nanoesfera	5×10^{-5}	1,0	100,0	(VITAL et al., 2021)
Ag	Nanoelipsoide	3×10^{-5}	1,0	93,0	(RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2015)
Au	Nanoelipsoide	3×10^{-5}	1,0	100,0	(RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2015)
Au+SiO ₂	Nanocasca	1×10^{-4}	1,0	95,0	(DUAN et al., 2018b)
Au+Fe+SiO ₂	Nanocasca	1×10^{-5}	1,5	100,0	(FAROOQ et al., 2020)

Fonte: O Autor (2023)

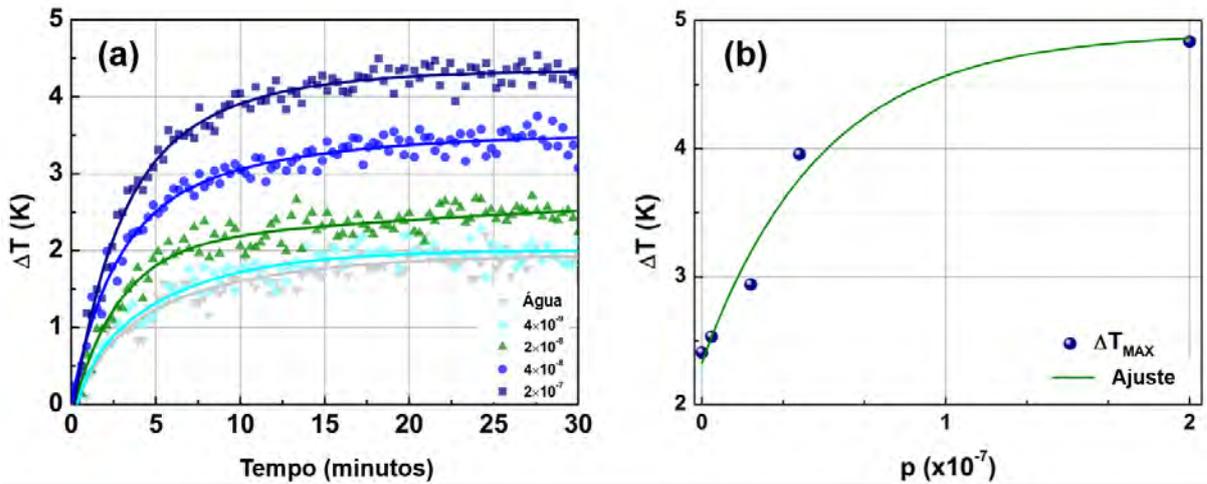
Os resultados experimentais da caracterização da conversão fototérmica dos NFs são apresentados para diferentes concentrações na Figura 46. Sob radiação solar, a temperatura do NF exibe um aumento significativo durante os primeiros cinco minutos e estabiliza após 25 minutos, como mostrado na Figura 46(a). O NF com fração volumétrica $p = 4 \times 10^{-9}$ tem comportamento térmico similar ao da água pura, com uma variação de 2 K após 30 minutos. Por outro lado, a amostra com concentração $p = 2 \times 10^{-7}$ apresenta um aumento de temperatura de 4,5 K no mesmo intervalo, o que representa um valor 125% maior que a variação de temperatura para a água pura.

Os máximos valores de incremento de temperatura alcançados nas amostras com diferentes concentrações são mostrados na Figura 46(b). A tendência da temperatura é de crescimento limitado, já que a absorção de energia é limitada (conforme Equação 12).

O experimento de conversão fototérmica também foi realizado utilizando NF com nanoesferas de ouro para comparação, conforme resultados mostrados na Figura 47. O aumento de temperatura para o NF com nanoesferas é de aproximadamente 3,5 K, enquanto que o NF com nanogaiolas alcança aumento de 4,5 K, mesmo com uma concentração de NPs 15 vezes inferior.

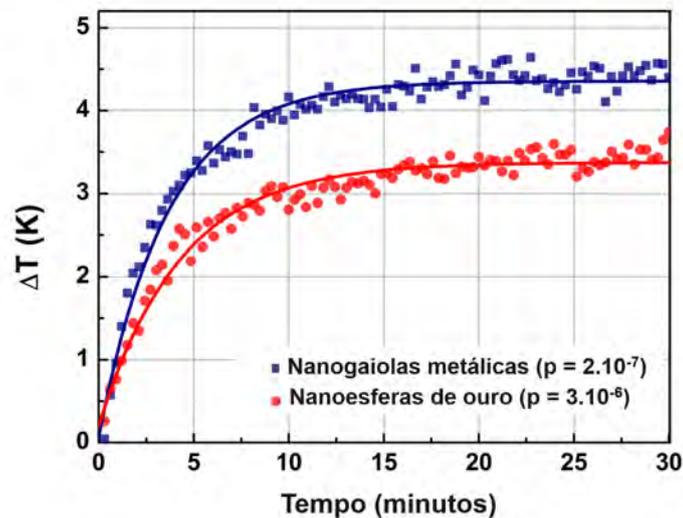
Para investigar o desempenho de CSAD utilizando esses NFs, foram realizadas simulações para obtenção da eficiência energética (Equação 20) em função da concentração de NPs e da espessura do coletor, com os resultados apresentados na Figura 48. Com uma concentração volumétrica baixa, de apenas 10^{-6} , o coletor que utiliza NF com nanogaiolas metálicas alcança eficiência de aproximadamente 90% com uma espessura de 1 cm, enquanto que o coletor com esferas de ouro apresenta eficiência inferior a 50% para o mesmo cenário. Para espessuras

Figura 46 – (a) Variação na temperatura do NF com nanogaiolas metálicas em função do tempo e (b) ganho máximo de temperatura em função da fração volumétrica.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 47 – (a) Conversão fototérmica de NFs com nanogaiolas metálicas e nanoesferas de ouro.

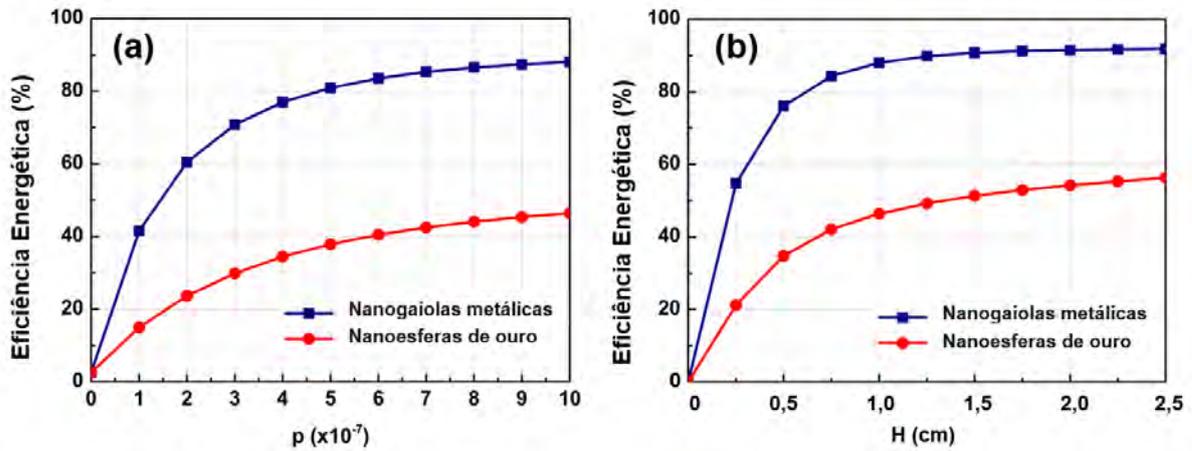


Fonte: O Autor (2023)

maiores que 1 cm, não há aumento da eficiência do CSAD com NF de nanogaiolas, visto que esse valor de espessura é suficiente para absorver toda a radiação solar incidente. Já para o NF com esferas de ouro, é possível aumentar a eficiência elevando os valores de concentração ou espessura. Entretanto, para alcançar valores de eficiência térmica de aproximadamente 90% com as nanoesferas, seria necessário utilizar um volume de ouro mais que mil vezes maior que a utilizada no NF com gaiolas.

A Figura 49 mostra o comportamento da eficiência energética do CSAD em função da

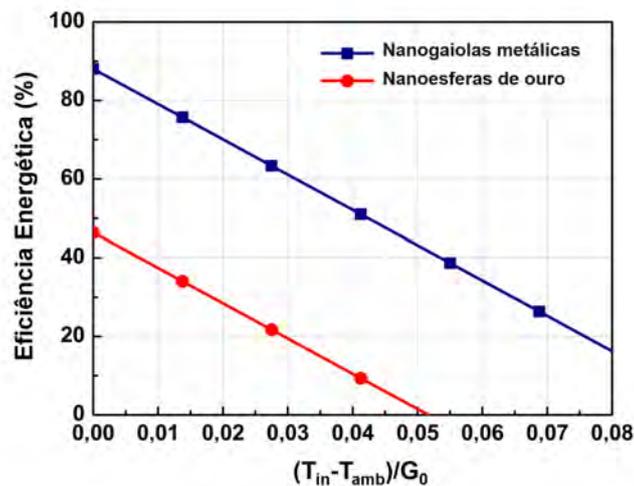
Figura 48 – Eficiência energética de um CSAD utilizando nanogaiolas metálicas e nanoesferas de ouro em função (a) da fração volumétrica (com $H = 1$ cm) e (b) da espessura do coletor (com $p = 10^{-6}$). Foi adotado $U = 0,002$ m/s.



Fonte: O Autor (2023)

temperatura de entrada normalizada. Mais uma vez, fica evidente a diferença significativa do desempenho entre os coletores com diferentes NFs. O coletor com gaiolas tem eficiência máxima 91% mais alta que a do coletor com esferas. As curvas também mostram que o coletor com NF contendo nanogaiolas alcança temperaturas mais elevadas que o coletor com nanoesferas. Assim, além de possuir melhor desempenho, o coletor com NF contendo nanogaiolas metálicas também possui maior versatilidade de aplicações que o coletor com NF contendo NPs esféricas de ouro.

Figura 49 – Curvas de eficiência energética de um CSAD utilizando nanogaiolas metálicas e nanoesferas de ouro em função da temperatura normalizada ($p = 10^{-6}$; $H = 1$ cm); $U = 0,002$ m/s.



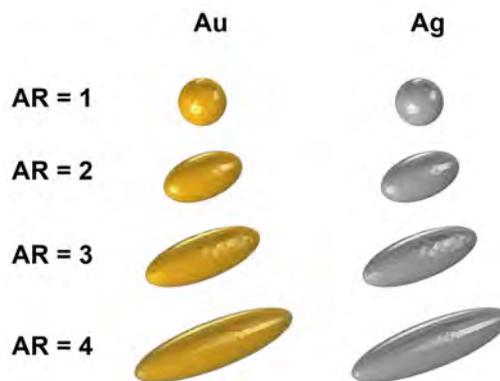
Fonte: O Autor (2023)

Um artigo com os resultados desta seção está em processo de preparação para submissão em periódico especializado.

4.4 NANOFLUIDOS PLASMÔNICOS HÍBRIDOS COM NANOELIPSOIDES

Nanoelipsoides são estruturas plasmônicas que possuem dois modos de oscilação e, conseqüentemente, dois picos RPSL. As propriedades de absorção dessas NPs podem ser ajustadas de acordo com a geometria (razão de aspecto) das partículas. Devido a essa característica, essas nanoestruturas têm potencial para uso em CSAD (RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2015; DU; TANG, 2016). Estudos anteriores exploraram o desempenho de NFs com nanoelipsoides de diferentes materiais e com diversas razões de aspecto na absorção de energia solar. Entretanto, não foi investigado o desempenho de NFs híbridos (NFs que combinam numa só solução NPs de diferentes morfologias ou materiais) com nanoelipsoides. Nesta seção, é investigado o uso de NF híbrido com nanoelipsoides de ouro e prata para absorção de energia solar. As configurações dos nanoelipsoides explorados são mostradas na Figura 50.

Figura 50 – Nanoelipsoides de ouro e prata com diferentes valores de razão de aspecto.

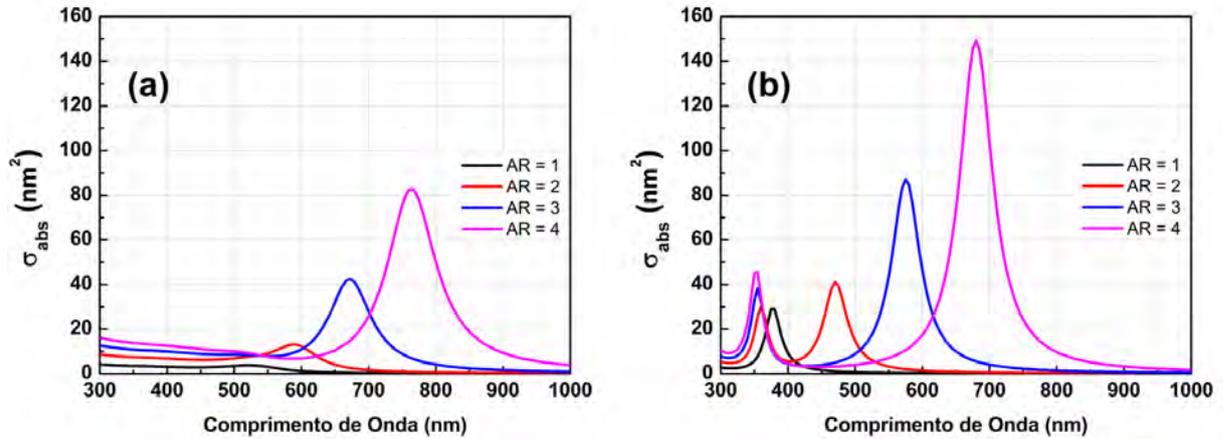


Fonte: O Autor (2023)

Os espectros das seções de choque de absorção dos nanoelipsoides, obtidos por simulações no software *COMSOL Multiphysics* são apresentados na Figura 51. Os picos de RPSL para os elipsoides de ouro, mostrados na Figura 51(a), possuem amplitude reduzida em relação aos dos elipsoides de prata, mostrados na Figura 51(b). Entretanto, os picos de absorção das partículas de ouro são mais largos que os das de prata. A presença de picos de absorção em diferentes regiões do espectro sugere que NFs compostos por combinações de NPs com diferentes razões de aspecto podem apresentar melhor desempenho na absorção de energia solar.

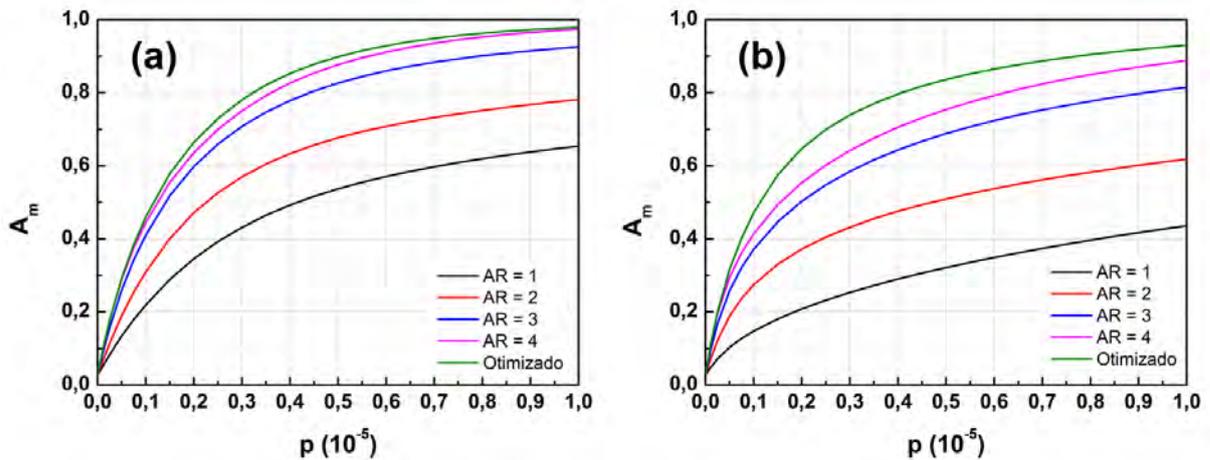
As proporções de cada tipo de NP (de acordo com a razão de aspecto) que otimizam o valor do coeficiente ponderado de absorção solar foram obtidas utilizando o algoritmo genético descrito na Seção 3.1.4. Os valores de A_m para NFs com nanoelipsoides em diferentes razões de aspecto e NFs híbridos são apresentados na Figura 52, para partículas de ouro (a) e prata (b) em função da concentração volumétrica de NPs.

Figura 51 – Seções de choque de absorção para nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 52 – Coeficientes ponderados de absorção solar para NFs com nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata com $H = 1$ cm.



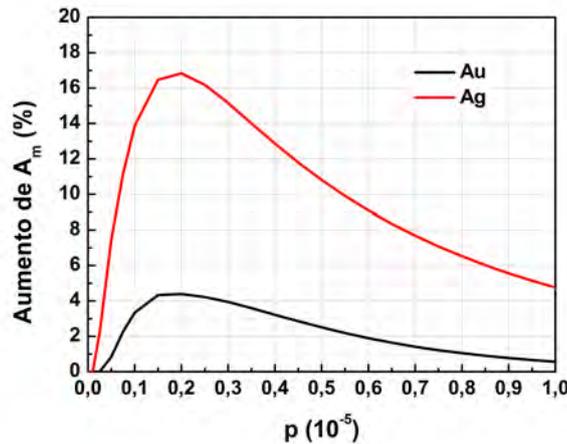
Fonte: O Autor (2023)

Os resultados para NFs com somente uma morfologia de NP estão de acordo com os disponíveis na literatura, que mostram um aumento dos valores de A_m com o valor da razão de aspecto para uma dada concentração (RATIVA; GÓMEZ-MALAGÓN, 2015). O NF híbrido com elipsoides de ouro é capaz de absorver 98% da radiação incidente para uma concentração $p = 1 \times 10^{-5}$, enquanto que o NF otimizado com elipsoides de prata absorve 93% da radiação incidente para a mesma concentração, considerando um caminho óptico de 1 cm. Nesse cenário, o NF com nanoelipsoides de ouro otimizado é composto por 18% do volume de NPs com partículas de $AR = 2$, 6% com partículas de $AR = 3$ e 76% com partículas de $AR = 4$. A composição otimizada do NF com NPs de prata para o mesmo cenário é semelhante, com volume

de partículas composto por 18% com NPs de $AR = 2$, 5% de $AR = 3$ e 77% de $AR = 4$.

O aumento nos valores de A_m pelo uso do NF otimizado é mais significativo quando são utilizadas NPs de prata, quando comparado ao uso de NPs de ouro. Por exemplo, o valor de A_m para o NF otimizado com partículas de prata é de 0,64 para $p = 0,2 \times 10^{-5}$. Para alcançar o mesmo valor de A_m com NF somente com nanoelipsoides de $AR = 4$, é necessário utilizar uma concentração $p = 3 \times 10^{-6}$, ou seja: é necessário empregar 50% a mais de material. Os aumentos nos valores de A_m para ambos os materiais pelo uso do NF otimizado são mostrados em função da concentração no gráfico da Figura 53. A comparação é realizada pela obtenção da razão entre valores de A_m para o NF híbrido e os valores para o NF contendo NPs com $AR = 4$ (que possuem a melhor performance dentre os não híbridos).

Figura 53 – Melhora nos valores de A_m devido ao uso de NFs híbridos otimizados com nanoelipsoides.



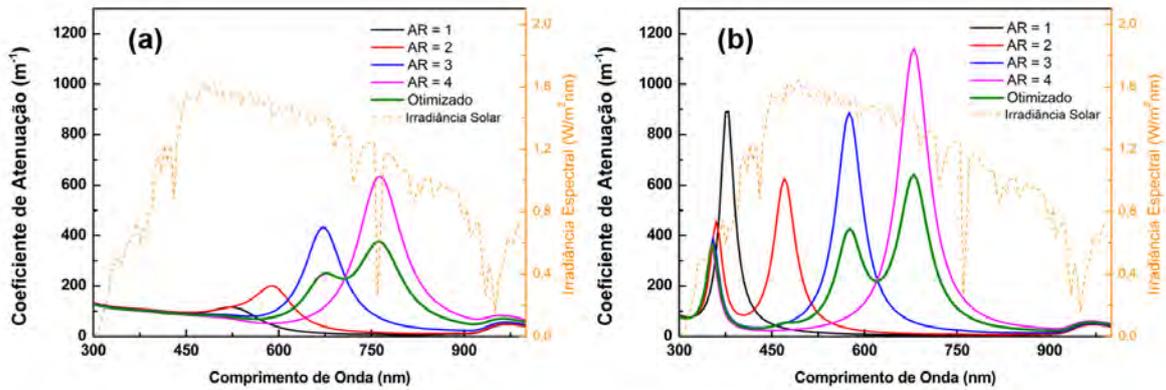
Fonte: O Autor (2023)

Para ambos os materiais, o maior aumento de performance ocorre para concentração $p = 0,2 \times 10^{-5}$. O máximo aumento no valor de A_m para o NF otimizado de prata é de 16,8%, enquanto que para o de ouro é de 4,4%. Os coeficientes de atenuação (Equação 11) para os NFs com diferentes tipos de NPs para esse caso são mostrados nos gráficos da Figura 54.

Comparando o NF híbrido otimizado com o NF que possui $AR = 4$, por exemplo, percebe-se que o coeficiente de atenuação, α_{nf} , do NF otimizado de ouro é maior que o com $AR = 4$ na faixa $300 \text{ nm} \leq \lambda \leq 710 \text{ nm}$ e menor no restante do intervalo analisado. Já para os NFs de prata, a faixa na qual o NF híbrido possui coeficiente de atenuação maior que o NF com NPs de $AR = 4$ é de 300 nm a 620 nm. O impacto dessas diferenças na absorção de radiação pode ser avaliado nos gráficos da Figura 55, que mostra a quantidade de radiação absorvida por cada tipo de NF.

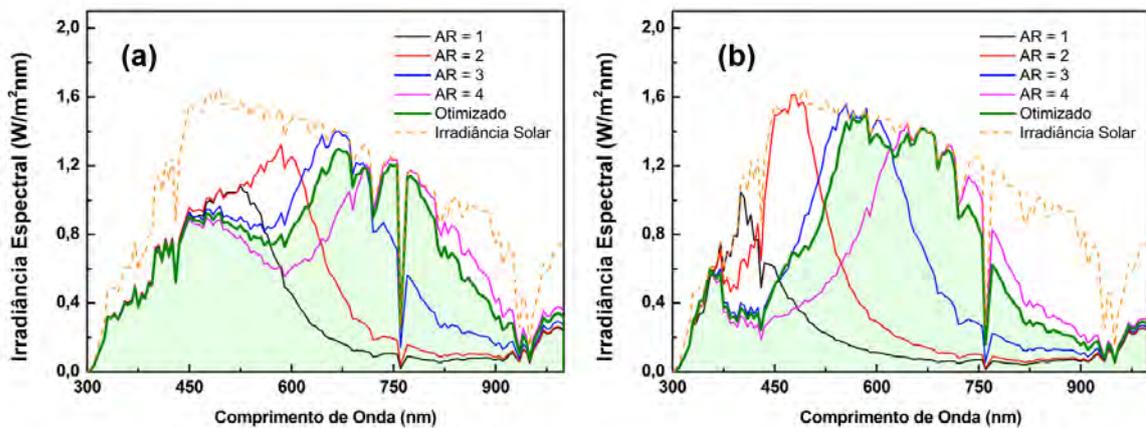
As linhas contínuas nos gráficos da Figura 55 representam a radiação absorvida por cada tipo de NF. Percebe-se que a área sob a curva de radiação absorvida pelo NF híbrido (destacada

Figura 54 – Coeficientes de atenuação para os NFs com diferentes tipos de nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata para $p = 0,2 \times 10^{-6}$ e $H = 1$ cm.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 55 – Radiação absorvida por NFs com diferentes tipos de nanoelipsoides de (a) ouro e (b) prata para $p = 0,2 \times 10^{-6}$ e $H = 1$ cm.



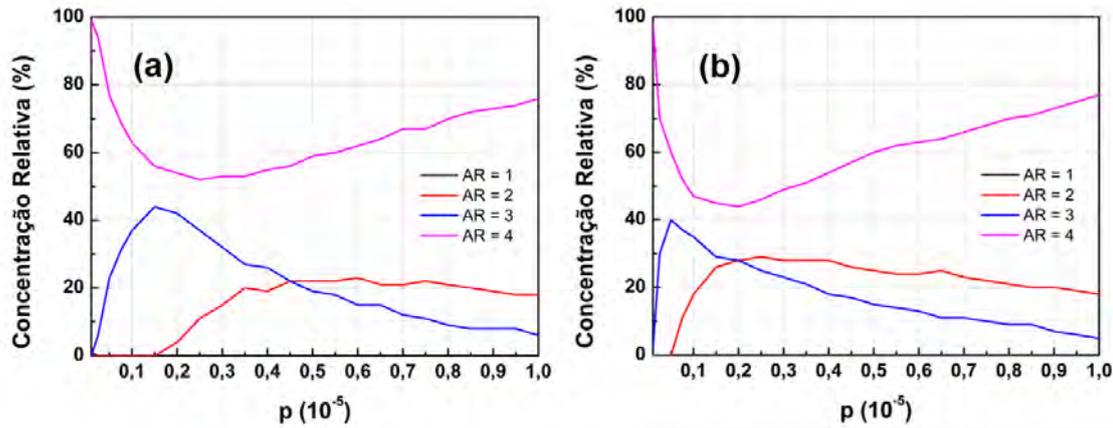
Fonte: O Autor (2023)

em verde) é maior que a área sob qualquer uma das demais curvas, tanto para os NFs de ouro quanto para os de prata. Percebe-se que o comportamento da radiação absorvida por cada tipo de NF segue a tendência dos coeficientes de atenuação mostrados anteriormente na Figura 54.

Nos nanofluidos otimizados, para cada valor de fração volumétrica analisado, são obtidos diferentes valores de concentração relativa para cada morfologia de NP. As concentrações relativas das NPs em função da concentração total do NF são apresentadas na Figura 56. Percebe-se que os perfis de concentração relativa são semelhantes nos materiais analisados. A proporção de NPs com $AR = 4$ é a maior para todas as concentrações analisadas nos dois materiais. Não há presença de NPs com $AR = 1$ nos NFs otimizados devido ao espectro dessas partículas possuírem apenas um pico de absorção que geralmente é sobreposto pelos picos de partículas

com outros valores de razão de aspecto.

Figura 56 – Proporções relativas das NPs com diferentes morfologias na composição dos NFs otimizados com NPs (a) de ouro e (b) de prata.



Fonte: O Autor (2023)

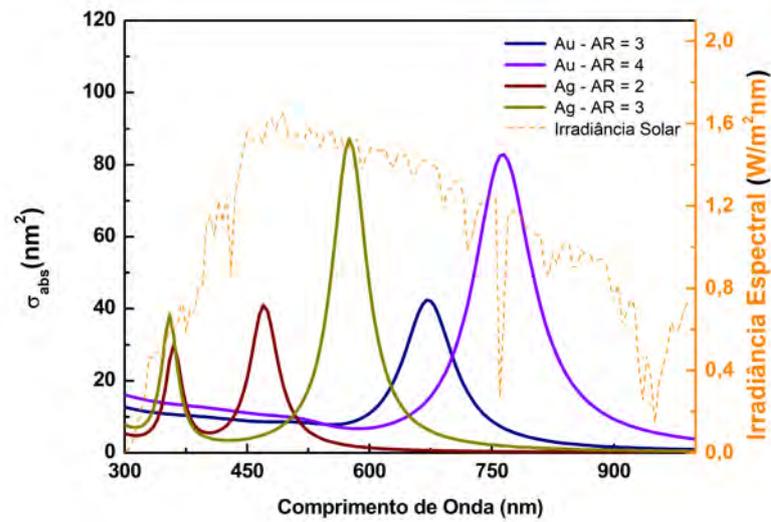
Além de NFs com partículas de diferentes morfologias, também foram avaliados NFs híbridos com combinações de diferentes materiais e morfologias. Para essa avaliação, considerando combinações com 4 tipos diferentes de partículas, foram analisados NFs com nanoelipsoides de ouro com $AR = 3$ e $AR = 4$ e nanoelipsoides de prata com $AR = 2$ e $AR = 3$. Essa configuração foi selecionada pela observação da complementaridade dos picos de absorção. Utilizando essas partículas, é possível combinar picos de absorção bem distribuídos ao longo do espectro analisado, como mostrado no gráfico da Figura 57, que mostra as seções transversais de absorção para as NPs utilizadas no NF híbrido com ouro e prata.

Utilizando algoritmo genético, as proporções relativas de cada tipo de partícula para otimizar o coeficiente de absorção solar ponderado foram encontradas em função da fração volumétrica, como exibido no gráfico da Figura 58. Apesar de haver variação nas proporções ideais de acordo com a concentração, percebe-se que a partícula que deve ser utilizada em maior proporção é a de ouro com $AR = 4$, seguida em ordem decrescente por prata com $AR = 3$, ouro com $AR = 3$ e prata com $AR = 2$. Esta ordem nas concentrações relativas é mantida para otimização ao longo de todo o intervalo de fração volumétrica analisado.

A avaliação do coeficiente de absorção solar ponderado foi realizada comparando o desempenho do NF híbrido otimizado com ouro e prata com os NFs híbridos otimizados que utilizam exclusivamente ouro ou prata. O gráfico com os valores de A_m em função da fração volumétrica é mostrado na Figura 59. O NF híbrido utilizando NPs de ouro e prata apresenta desempenho superior aos NFs híbridos otimizados aos que utilizam NPs com somente um dos dois materiais.

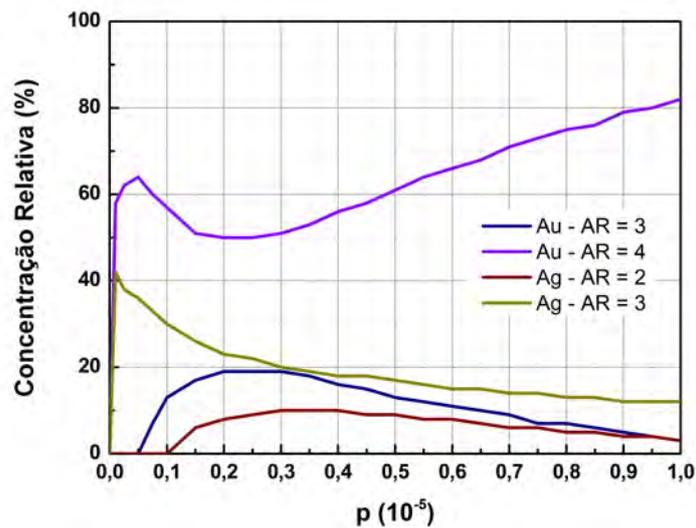
O máximo aumento no valor de A_m do NF híbrido bi-material em relação ao NF híbrido

Figura 57 – Seções de choque de absorção das NPs utilizadas no NF híbrido com ouro e prata.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 58 – Concentrações relativas dos diferentes tipos de NPs utilizadas no NF híbrido utilizando ouro e prata.

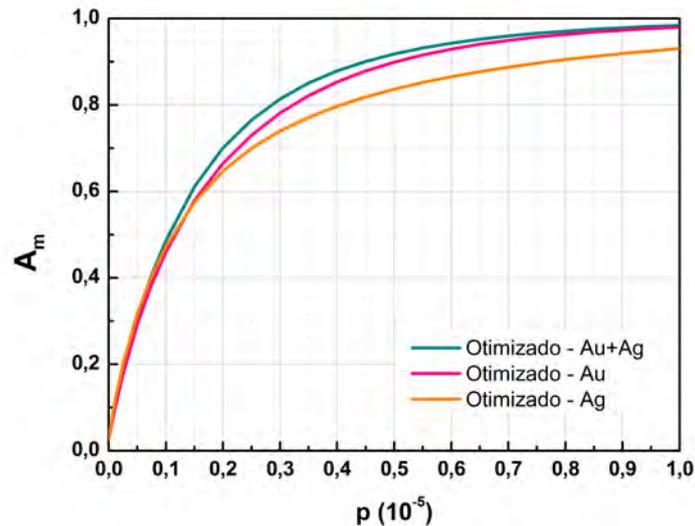


Fonte: O Autor (2023)

com NPs de ouro é de 5,7%, para uma concentração $p = 0,1 \times 10^{-5}$. Já em relação ao NF híbrido com NPs de prata, o aumento de performance chega a 10,2%, para uma fração volumétrica $p = 0,35 \times 10^{-5}$. Os aumentos de performance a partir da utilização do NF híbrido bi-material são mostrados nos gráficos das Figuras 60(a) e 60(b) em relação aos NFs com NPs de ouro e prata, respectivamente.

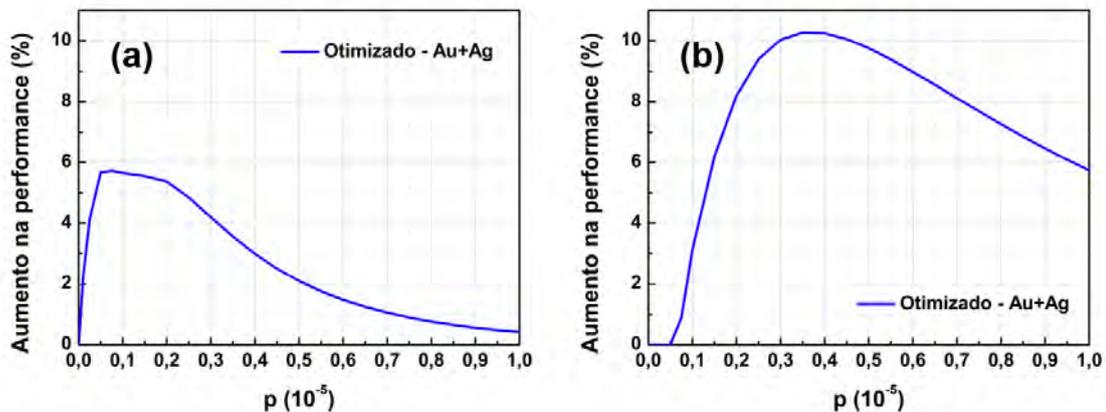
A partir da obtenção dos valores ótimos de concentrações relativas para um NF híbrido

Figura 59 – Coeficientes de absorção solar ponderados para os NFs híbridos otimizados utilizando ouro, prata e combinação de ouro e prata (com $H = 1$ cm).



Fonte: O Autor (2023)

Figura 60 – Aumento na performance pela utilização de NF híbrido com NPs de ouro e prata em relação a NFs híbridos utilizando NPs exclusivamente de (a) ouro e (b) prata.

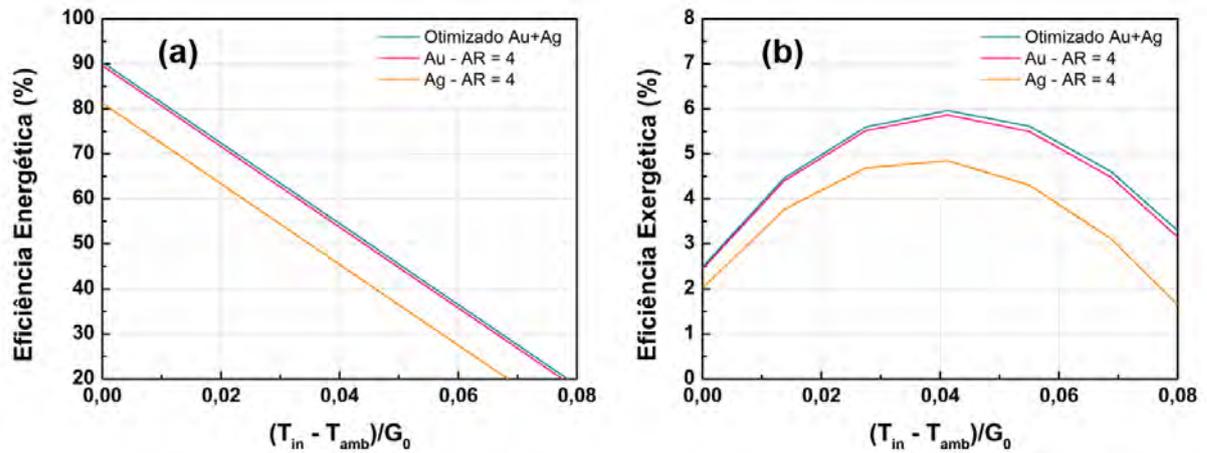


Fonte: O Autor (2023)

bi-material, é possível analisar o desempenho de um CSAD utilizando esse fluido. As curvas de eficiência energética e exérgica são mostradas nos gráficos da Figura 61. O desempenho do coletor com NF híbrido é comparado ao desempenho de coletores utilizando NFs com nanoeleipsóides de ouro e prata com $AR = 4$, que apresentam a melhor performance quando não há otimização.

O valor máximo de eficiência energética obtido com o NF híbrido otimizado é de 90,3%, enquanto os coletores utilizando NFs com eleipsóides de ouro e prata alcançam eficiências

Figura 61 – Eficiências (a) energética e (b) exergetica de um CSAD utilizando NFs com nanoe-lipsoides.



Fonte: O Autor (2023)

energéticas de 89,5% e 81,3%, respectivamente. Isso representa um aumento de 0,9% em relação ao uso de nanoe-lipsoides de ouro e de 11% em relação ao uso de partículas de prata. Em relação à eficiência exergetica máxima, o aumento é de 1,2% em relação ao coletor usando NF com nanoe-lipsoides de ouro e 22,9% em relação ao CSAD com elipsoides de prata.

Verifica-se que o aumento da eficiência energética de coletores com o NF híbrido otimizado não é significativo em relação ao NF de ouro com NPs de $AR = 4$. Entretanto, o mesmo procedimento de otimização pode ser aplicado em outras nanoestruturas com sucesso, como pode ser visto se forem consideradas apenas NPs de prata. Assim, o procedimento pode ser expandido para NPs de outros materiais e com diferentes morfologias. Os melhores resultados de otimização foram obtidos com as NPs de prata devido aos picos de absorção bem definidos e relativamente estreitos presentes nesse tipo de partícula. Assim, a otimização de NFs híbridos é mais relevante para NPs com essas características do que para partículas que apresentam bandas de absorção largas.

O procedimento de otimização aplicado nesta seção será expandido para NPs com outras morfologias e será disponibilizado ao público através de uma plataforma web aberta para otimização de NFs híbridos. Os resultados apresentados nesta seção estão em processo de organização para submissão de artigo em periódico especializado.

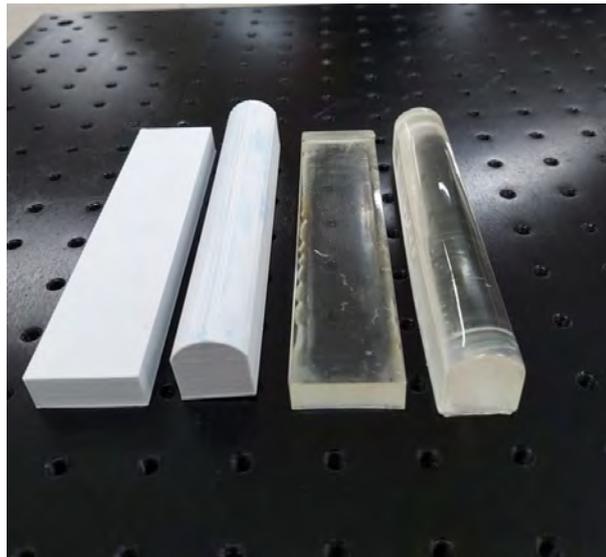
4.5 COLETOR DE ABSORÇÃO DIRETA LENTICULAR

Um dos principais desafios para o uso de CSAD em larga escala é o elevado custo dos NFs utilizados como fluido de trabalho. Dessa forma, uma redução na quantidade de NF necessária para a operação de um coletor pode resultar numa queda significativa nos custos

totais, favorecendo o uso de dispositivos desse tipo. Visando minimizar a quantidade de fluido necessária para a operação do coletor, uma estratégia a adotar é o uso de sistemas de concentração solar. Nesse tipo de sistema, a radiação incidente é concentrada numa área reduzida, de forma que a área do elemento absorvedor de radiação (superfície do NF) é inferior à área da superfície de captação de luz.

Neste trabalho, é proposta uma variação do CSAD com um sistema de concentração lenticular (L-CSAD). O modelo de coletor proposto, previamente apresentado nas Figuras 15 e 16, possui um sistema compacto de lentes em vidro e é capaz de reduzir a quantidade de NF proporcionalmente à razão de concentração utilizada. Inicialmente, foram realizadas análises numéricas para avaliar os desempenhos óptico e térmico do coletor com sistema lenticular. Posteriormente, um protótipo em resina epóxi foi construído e avaliado experimentalmente, conforme procedimento descrito na Seção 3.2.2. A Figura 62 mostra as coberturas dos coletores em resina obtidas a partir das peças em PLA.

Figura 62 – Coberturas dos coletores de absorção direta construídos.

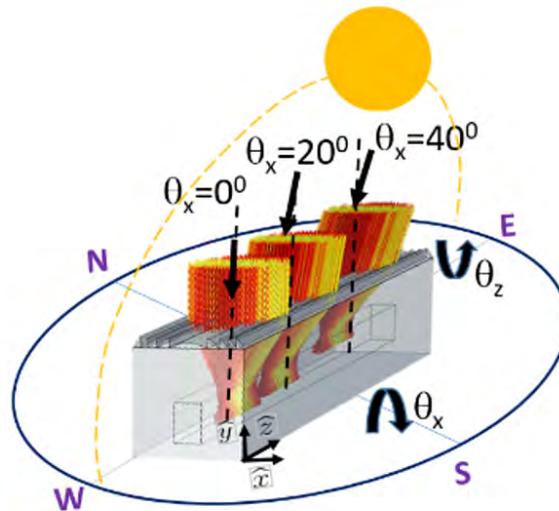


Fonte: O Autor (2023)

Um dos objetivos da análise óptica do coletor é avaliar a sensibilidade do dispositivo ao ângulo de incidência da radiação solar. Diferentemente da maior parte dos dispositivos de concentração solar, que possuem sistemas de seguimento solar, o sistema proposto é estacionário. Para tal, como mostrado na Figura 63, o coletor deve ser orientado com o eixo longitudinal (eixo z) na direção leste-oeste, de forma que a mudança da posição relativa do sol durante o dia não remove o foco do duto que contém o NF. Nessa análise, não foram consideradas variações sazonais do ângulo de declinação solar. Porém, o eixo lateral (eixo x), deve ficar alinhado aproximadamente na direção norte-sul, de forma que alterações sazonais do ângulo de declinação solar devem alterar a posição do foco, removendo-o do duto que contém o NF.

A análise de direcionalidade para luz com comprimento de onda de 500 nm é mostrada na

Figura 63 – Orientação do coletor com sistema lenticular.



Fonte: O Autor (2023)

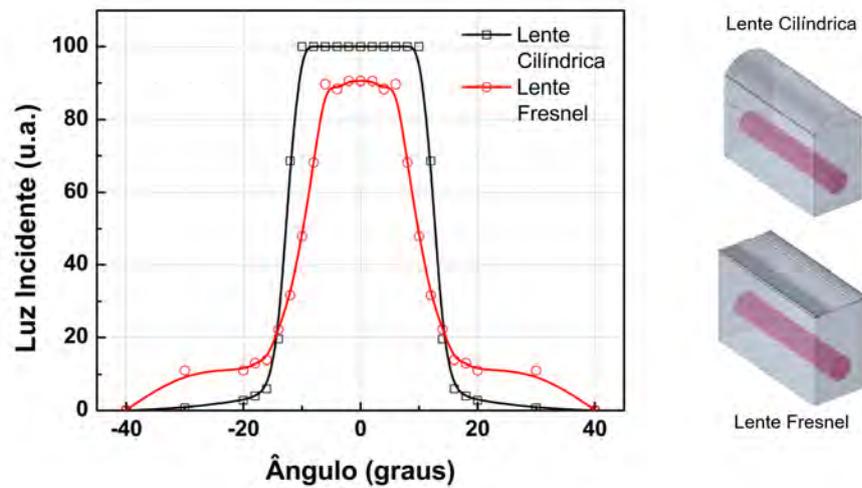
Figura 64. Os resultados indicam que para o coletor lenticular com lente cilíndrica, a totalidade da radiação incidente na cobertura do coletor é transmitida para a cavidade que contém o NF considerando um intervalo angular entre -10° e 10° (desconsiderando perdas por reflexão e absorção no vidro). Considerando os limites de tolerância obtidos, é possível a operação do coletor sem sistema de rastreamento para regiões de baixas latitudes (próximas à linha do Equador), contanto que haja ajustes sazonais considerando a variação do ângulo de declinação solar nas diferentes estações do ano. Para valores de ângulos além desse intervalo, a quantidade de luz que alcança o NF é reduzida significativamente. Já para o coletor com lente fresnel, parte da luz não é guiada para a cavidade mesmo para incidência em direção normal ao coletor. Além disso, o sistema com lente fresnel tem uma faixa mais estreita de ângulo de aceitação.

Os diagramas de raios exibidos na Figura 65(a) mostram o comportamento da luz para ângulos de 0 e 10° , indicando que a totalidade da luz chega à cavidade em ambos os casos. Na Figura 65(b), compara-se o desempenho de coletores com lentes cilíndrica e fresnel. Percebe-se que uma parcela da luz refratada não chega à cavidade que contém o NF.

A análise de direcionalidade para coletores com cavidade cilíndrica e retangular (ambos com lente cilíndrica) é mostrada na Figura 66. O intervalo de ângulos de incidência para o qual o coletor com cavidade retangular é capaz de transmitir toda a luz para o NF é entre -4° e 4° . Considerando um ângulo de incidência de 10° , apenas 10% da luz chega ao NF. Apesar de apresentar pior desempenho em relação à direcionalidade, o coletor com cavidade retangular apresenta maior caminho óptico, possibilitando uma maior absorção de luz pelo NF. Considerando o maior caminho óptico e simplicidade no processo de produção, o coletor com cavidade retangular foi selecionado para ser prototipado.

Como o coletor utiliza-se de refração para realizar a concentração, o efeito de dispersão

Figura 64 – Análise de direcionalidade comparando coletores com lentes cilíndrica e fresnel.



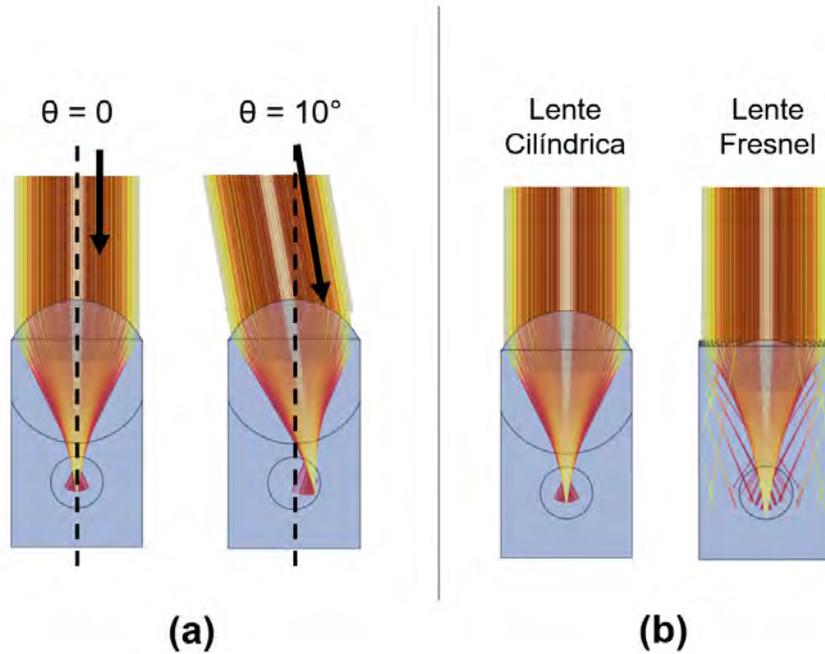
Fonte: O Autor (2023)

torna-se significativo (LORENZO; LUQUE, 1981; LORENZO, 1981). Dessa forma, o foco das lentes foi avaliado nos limites do intervalo espectral analisado (entre 300 nm e 1300 nm) e no comprimento de onda com o maior valor de intensidade espectral ($\lambda = 500$ nm). Os resultados, apresentados nos diagramas de raios da Figura 67(a), mostram que a posição do foco teve uma variação $\Delta f = 2$ mm, que não tem impacto significativo na performance do coletor, já que a altura do duto com NF é de 10 mm, o que garante a localização do foco dentro do NF em toda faixa espectral estudada. O feixe de luz segue um caminho óptico que pode ser aproximado por uma geometria bicônica detalhada na Figura 67(b). Essa geometria foi adotada para definir a geração de calor no coletor, considerando a Lei de Lambert-Beer.

A análise térmica de um CSAD com sistema lenticular utilizando NF como fluido de trabalho é mostrada na Figura 68. São avaliados os parâmetros de performance (temperatura de saída, eficiência energética e eficiência exergética) em função da velocidade de escoamento do fluido. A performance do coletor com sistema lenticular é comparada à de um CSAD tradicional com a mesma área de coleta. O NF adotado para a análise foi de TiN com $a = 20$ nm e $p = 10^{-5}$. É considerada radiação com incidência na direção normal aos coletores.

Os resultados da Figura 68(a) mostram que no regime de baixa velocidade de escoamento, os coletores alcançam elevadas temperaturas, porém baixa eficiência energética devido às maiores perdas térmicas presentes nesse regime. Já no regime de alta velocidade, a eficiência dos coletores é elevada, chegando a até 90%, porém há pouca elevação de temperatura do fluido. Nota-se que os dois tipos de coletores apresentam valores de eficiência energética semelhantes em praticamente toda a faixa de velocidades analisada. Entretanto, a temperatura de saída do coletor com sistema lenticular é significativamente mais elevada que a do coletor tradicional, principalmente nos regimes de baixa velocidade de escoamento. Isso se traduz numa maior eficiência exergética do

Figura 65 – Diagramas de raios comparando (a) o comportamento da luz num coletor com lente cilíndrica com variação de ângulo e (b) o desempenho de coletores com lentes cilíndrica e fresnel.



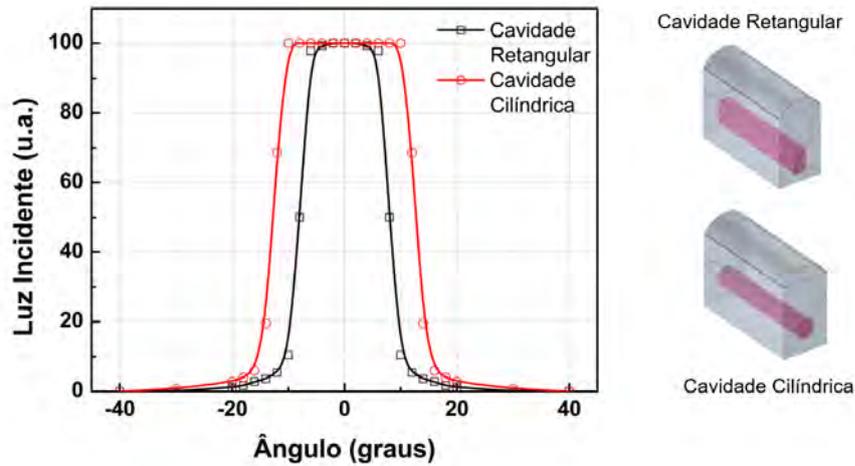
Fonte: O Autor (2023)

dispositivo com lente, como mostrado na Figura 68(b).

O L-CSAD foi avaliado experimentalmente a partir do protótipo descrito na Seção 3.2.2. O sistema lenticular adotado no protótipo foi o de uma lente cilíndrica construída em resina epóxi e com a mesma distância focal das lentes fresnel analisadas. Para comparação, foi construído um protótipo de CSAD sem sistema lenticular, com uma cobertura plana de mesmo material. Os protótipos dos coletores de absorção direta tradicional e lenticular são mostrados na Figura 69, ambos preenchidos com NF de ouro com nanoesferas de 50 nm de diâmetro. As setas verdes indicam a largura ocupada pelo NF no coletor sem concentração. Na Figura 69(a), os coletores estão sem as coberturas. Percebe-se que o fluido no coletor tradicional (na parte superior) possui uma largura maior que no coletor lenticular. Como ambos os coletores possuem a mesma profundidade e a largura do coletor tradicional é 4 vezes maior que a do coletor lenticular, o coletor com sistema de concentração necessita de apenas 1/4 do volume de NF utilizado no sistema sem concentração.

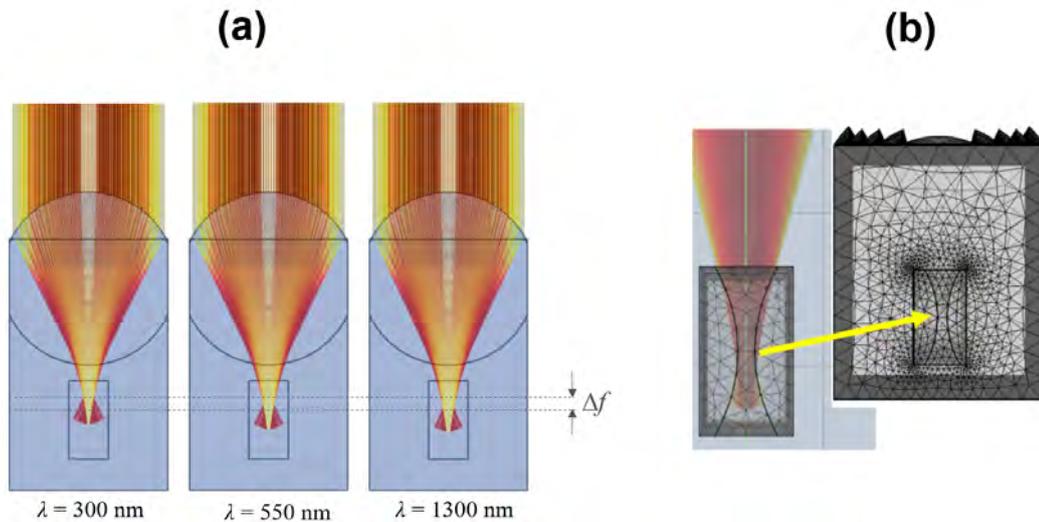
Os coletores com as coberturas são mostrados na Figura 69(b). Percebe-se que a largura aparente do coletor lenticular torna-se igual à do coletor tradicional, já que a lente cilíndrica da cobertura foi projetada para fornecer uma razão de concentração de 4 vezes. Dessa forma, para luz incidente na direção normal aos coletores, os dois modelos coletam a mesma quantidade de energia. Entretanto, devido ao menor volume, o fluido no coletor lenticular tem potencial para alcançar temperaturas mais elevadas.

Figura 66 – Análise de direcionalidade comparando coletores com cavidades cilíndrica e retangular.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 67 – (a) Diagramas de raio para diferentes comprimentos de onda de luz incidente. (b) Detalhe do caminho óptico no NF.

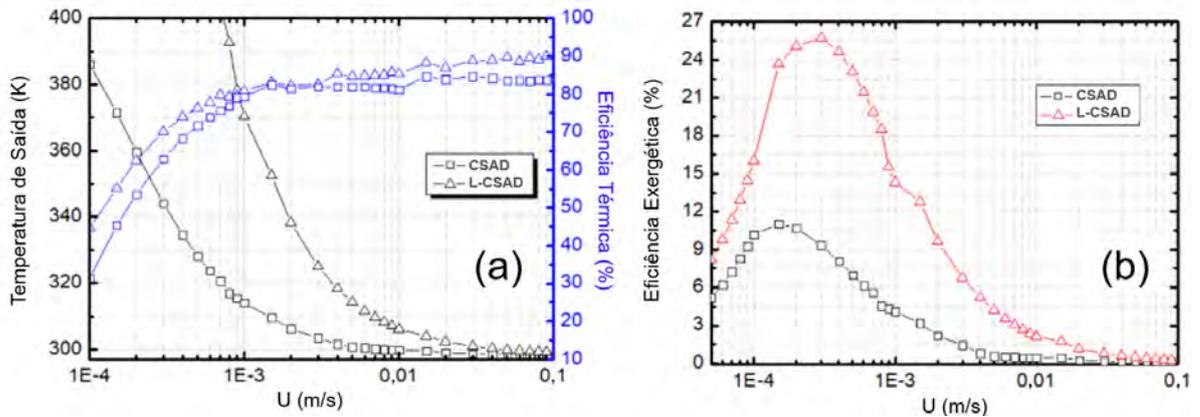


Fonte: O Autor (2023)

As fotos da Figura 70 mostram a sensibilidade do coletor lenticular (à esquerda) e do coletor tradicional (à direita) à direção da luz. Nos casos apresentados na Figura 70(a) e Figura 70(c), a câmera foi posicionada com uma inclinação maior que 10° em relação ao eixo normal aos coletores. Nesse cenário, não é possível visualizar o NF no coletor lenticular, evidenciando que radiação incidente no coletor com essa direção não é capaz de ser absorvida pelo NF nesse dispositivo. Por outro lado, no caso da Figura 70(b), verifica-se que as imagens dos NFs em ambos os coletores são praticamente idênticas.

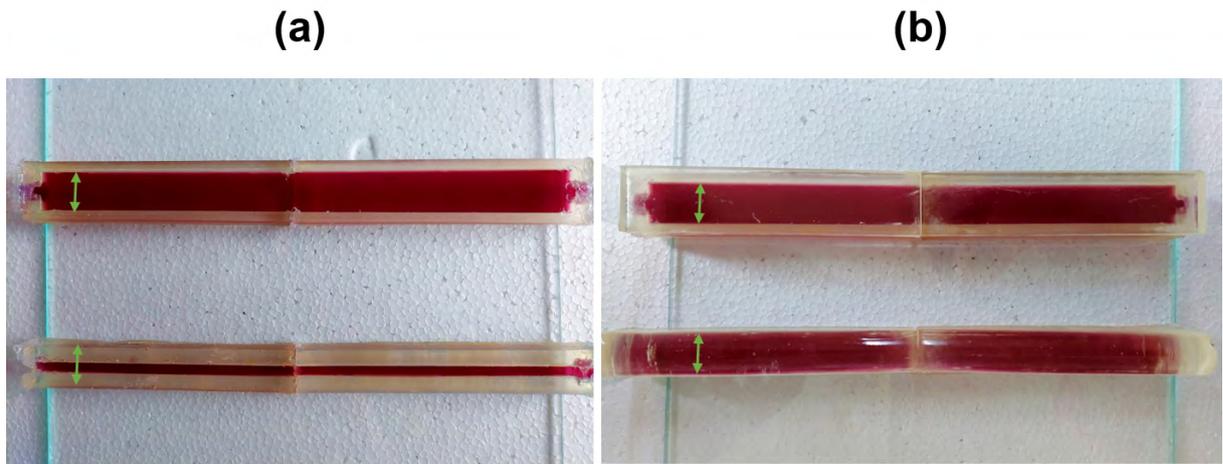
Os coletores foram caracterizados termicamente através de ensaios com fluido estacioná-

Figura 68 – (a) Temperatura de saída e eficiência térmica e (b) eficiência exergética de CSAD e L-DASC utilizando NF de TiN e temperatura de entrada $T_{in} = 298$ K.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 69 – (a) Protótipos de coletores de absorção direta tradicional e lenticular (a) sem as coberturas e (b) com as coberturas.

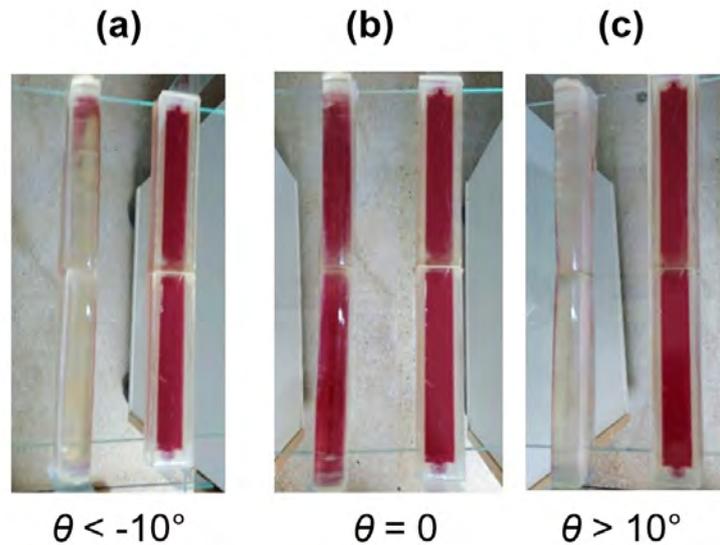


Fonte: O Autor (2023)

rio para avaliação do aumento de temperatura. O fluido de trabalho utilizado foi NF com NPs esféricas de ouro com diâmetro de 50 nm dispersas em água, com concentração $p = 2 \times 10^{-5}$ e os valores de temperatura foram obtidos por termopares inseridos nas extremidades dos coletores (conforme descrição na Seção 3.2.2).

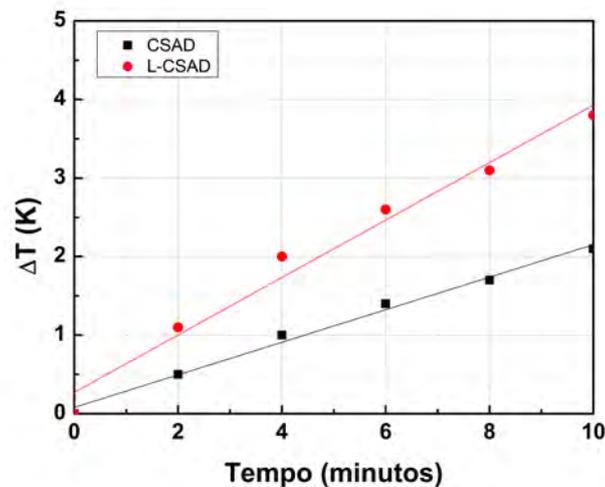
Inicialmente, foi realizado um ensaio indoor, utilizando simulador solar como fonte de luz. Os resultados desse ensaio, mostrados na Figura 71, indicam um aumento de temperatura de 2,1 K para o coletor tradicional e 3,8 K para o coletor lenticular. Apesar da maior temperatura no coletor com concentração, a razão entre as temperaturas não está de acordo com a razão de concentração. Isso ocorre devido ao fato de que a luz fornecida pelo simulador solar não é colimada, o que prejudica análises de dispositivos de concentração solar.

Figura 70 – Análise direcional do CSAD com sistema lenticular.



Fonte: O Autor (2023)

Figura 71 – Caracterização térmica experimental dos coletores de absorção direta tradicional e lenticular em ensaio indoor.

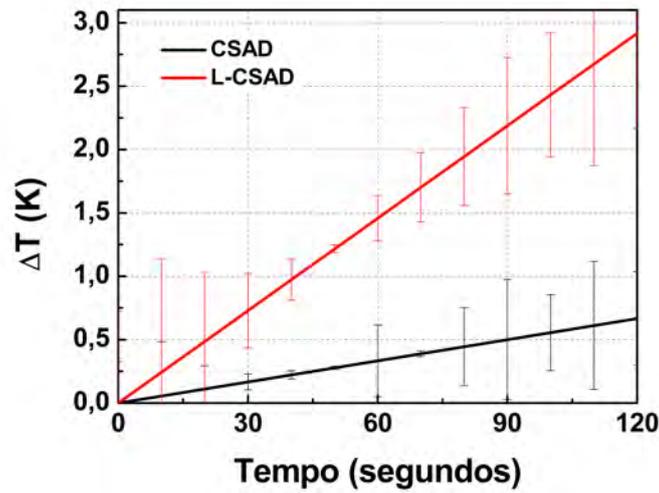


Fonte: O Autor (2023)

Assim, para verificar o comportamento dos dispositivos no cenário de operação real, foi realizado um ensaio *outdoor* no qual os coletores foram expostos à radiação solar natural. Os resultados desse ensaio são mostrados na Figura 72. As barras de erro são geradas pela dispersão dos valores obtidos em diferentes medições, considerando também a incerteza na medição pelos termopares. Nesse experimento, a razão entre as variações de temperatura obtidas nos coletores alcançou valores próximos à razão de concentração.

Os resultados obtidos suportam a hipótese de que os coletores lenticulares são capazes de absorver a mesma quantidade de energia que os coletores tradicionais, porém utilizando menor

Figura 72 – Caracterização térmica dos coletores de absorção direta tradicional e lenticular em ensaio outdoor.



Fonte: O Autor (2023)

quantidade de NF. Além disso, os coletores lenticulares são capazes de alcançar temperaturas mais elevadas, resultando em maior eficiência exergética em comparação aos CSAD tradicionais.

A partir da análise realizada nesta seção, foi depositada a patente “Placa de coletor solar térmico com sistema lenticular” (GÓMEZ-MALAGÓN et al., 2021). Um artigo com os resultados apresentados está em fase de preparação para submissão em periódico especializado.

5 CONCLUSÃO

Coletores de absorção direta são dispositivos que utilizam NFs plasmônicos para gerar energia térmica a partir da radiação solar com alta eficiência de conversão. Entretanto, o uso desse tipo de coletor solar é limitado por fatores relacionados à estabilidade dos NFs, custos de produção das NPs e aumento da potência de bombeamento nos sistemas de aquecimento. Esses fatores limitantes podem ser mitigados com a redução na quantidade e na concentração dos NFs utilizados nos coletores.

Neste trabalho, foi avaliado o emprego de nanoestruturas com alto desempenho de conversão fototérmica em CSAD, buscando reduzir a concentração de NPs necessária para o funcionamento do coletor. Outra estratégia avaliada foi o uso de sistemas lenticulares para concentração de luz nos CSAD, a fim de reduzir a quantidade de fluido utilizada nos dispositivos sem comprometer a performance dos coletores.

Primeiramente, foi avaliado o uso de nanocascas de ouro dopadas com ferro em coletores de absorção direta. A dopagem de ferro reduz o espalhamento de luz pelas nanocascas de ouro e causa um alargamento no espectro de absorção das NPs, resultando num casamento espectral com a radiação solar. Análises numéricas mostram que NFs compostos por nanocascas de ouro dopadas dispersas em água são capazes de absorver toda a radiação solar incidente num coletor, mesmo utilizando baixa concentração de NPs ($p = 2 \times 10^{-5}$), com uma camada de NF de espessura $H = 1,5$ cm. Nanocascas de ouro sem a dopagem absorvem aproximadamente 80% da radiação incidente considerando o mesmo cenário. Assim, é possível obter valores de eficiência energética de até 95% para coletores com as NPs dopadas, mesmo utilizando NFs com fração volumétrica reduzida. Portanto, esse tipo de nanoestrutura apresenta elevado potencial para uso em CSAD.

Em seguida, foi avaliado o uso de NFs com NPs esféricas compostas por nitretos metálicos (TiN, ZrN e HfN) em CSAD. Esses materiais apresentam custos de produções significativamente inferiores aos metais nobres que são utilizados na maioria das aplicações de termoplasmônica. Na faixa do visível e infravermelho próximo, os NFs com NPs nitretos apresentam espectros de absorção mais largos que o do NF com nanoesferas de ouro, ocasionando melhor superposição espectral com a radiação solar. Dessa forma, para converter determinado valor de radiação solar em energia térmica, os NFs de nitretos necessitam de concentrações menores de NPs que os NFs com metais nobres como ouro e prata (considerando NPs com a mesma morfologia). Verificou-se experimentalmente que o NF de TiN exposto à radiação solar alcança um aumento de temperatura 74% superior ao obtido utilizando NF de ouro com a mesma concentração. A análise numérica de CSAD utilizando os NFs com nitretos metálicos revelou que os três materiais analisados proporcionam valores de eficiências energéticas e exergéticas consideravelmente superiores aos obtidos com NFs de ouro. Dessa forma, a combinação de baixo custo e excelentes propriedades de conversão fototérmica faz com que esses materiais

sejam próprios para o uso em CSAD.

Posteriormente, foi avaliado o uso de NFs compostos por nanogaiolas metálicas em CSAD. As nanoestruturas analisadas possuem largo pico de absorção em 635 nm e apresentam boa compatibilidade com o espectro solar. Apesar dessas estruturas possuírem morfologia complexa e serem compostas por metais nobres (ouro e prata), seu uso para absorção solar é atrativo pelo fato de que, utilizando NFs com nanogaiolas, é possível absorver grandes quantidades de radiação solar com concentrações ordens de magnitude inferiores à concentração necessária para coletar a mesma quantidade energia utilizando NPs esféricas. Avaliando experimentalmente a conversão fototérmica de NFs com nanogaiolas metálicas, foi alcançado um aumento de temperatura 28,5% superior ao obtido com NF composto por nanoesferas de ouro, mesmo com uma concentração volumétrica 15 vezes menor para as nanogaiolas. A avaliação numérica de um CSAD utilizando esses materiais mostrou que, considerando o mesmo valor de fração volumétrica, o coletor com NF de nanogaiolas apresenta valor de eficiência energética 80% superior ao coletor com nanoesferas de ouro. Dessa forma, é viável utilizar nanogaiolas metálicas em CSAD para obter dispositivos de alta performance com pequenas quantidades de metais nobres.

O estudo seguinte avaliou o desempenho de NFs plasmônicos híbridos com nanoelipsoides metálicos para absorção solar. Foram analisados os desempenhos de conversão solar de NFs compostos por nanoelipsoides de ouro e prata com diferentes razões de aspecto. A combinação de elipsoides com diferentes morfologias e materiais numa mesma suspensão gerou NFs híbridos. Utilizando algoritmo genético, foi possível otimizar as proporções relativas de cada tipo de NP que geram NFs com melhor desempenho na absorção de energia solar. O NF híbrido com melhor performance combinou nanelipsoides de ouro com $AR = 3$ e $AR = 4$ e nanoelipsoides de prata com $AR = 2$ e $AR = 3$. Esse NF híbrido absorve 5,7% mais radiação que o NF com NPs exclusivamente de ouro e 10,2% a mais que NF com NPs exclusivamente de prata. Avaliando numericamente o desempenho de CSAD utilizando o NF híbrido otimizado, foram obtidos valores de eficiências energética e exergética consideravelmente superiores aos obtidos utilizando NFs não-híbridos com nanoelipsoides de prata. No entanto, quando o desempenho é comparado ao de coletores com NF não híbrido com nanoelipsoides de ouro, a diferença não é significativa, visto que o aumento de performance do CSAD com NF híbrido é de apenas 0,9% em relação à eficiência energética e 1,2% em relação à eficiência exergética. Apesar de a ferramenta de otimização não apresentar impacto expressivo para nanoelipsoides de ouro, ela tem potencial para ser aplicada à obtenção de NFs híbridos com NPs de outros materiais e morfologias.

A comparação entre os valores máximos de eficiência energética obtidos neste trabalho e resultados presentes na literatura são mostrados na Tabela 2. O coletor que utiliza NF com nanocascas de ouro dopado apresenta desempenho superior a todos os anteriormente reportados. O coletor com nanogaiolas metálicas iguala os melhores desempenhos reportados anteriormente

em regime de baixíssima concentração. Entretanto, as nanocascas de ouro dopado, as nanogaiolas metálicas e os nanoelipsoides metálicos têm processos de síntese complexos, o que pode dificultar a produção em grandes quantidades. Por outro lado, os coletores com NFs de nitretos metálicos apresentam ótimos resultados de eficiência energética com baixas concentrações. Adicionalmente, esses NFs apresentam baixo custo e morfologia simples.

Tabela 2 – Comparativo dos valores de eficiência energética para CSAD com diferentes nanofluidos.

Material	Morfologia	Fração Vol.	H (cm)	η_{en}	Referência
Au+Fe/SiO ₂	Nanocasca	1×10^{-5}	1,5	95%	Este trabalho
TiN	Nanoesfera	5×10^{-5}	1,0	89%	Este trabalho
ZrN	Nanoesfera	5×10^{-5}	1,0	79%	Este trabalho
HfN	Nanoesfera	5×10^{-5}	1,0	82%	Este trabalho
Au+Ag	Nanogaiola	1×10^{-6}	1,5	90%	Este trabalho
Au+Ag	Nanoelipsoide	1×10^{-5}	1,0	90%	Este trabalho
SiO ₂ /Ag-CuO	Nanocasca	1×10^{-5}	1,8	57%	(JOSEPH et al., 2019)
Ag	Nanoesfera	3×10^{-4}	1,0	90%	(CHEN et al., 2016b)
Au	Nanoesfera	8×10^{-6}	5,0	21,3%	(CHEN et al., 2016a)
Cu	Nanoesfera	3×10^{-2}	-	20%	(PARVIN; NASRIN; ALIM, 2014)
Ag/SiO ₂	Nanocasca	1×10^{-4}	1,0	90%	(DUAN et al., 2018a)
Au/SiO ₂	Nanocasca	1×10^{-4}	2,0	85%	(DUAN et al., 2018b)
Magnetita	Nanoesfera	4×10^{-5}	2,0	90%	(GORJI; RANJBAR, 2016)
Au	Nanocasca	5×10^{-4}	0,75	70%	(LEE et al., 2012)

Fonte: O Autor (2023)

Por fim, foi proposto e avaliado um novo tipo de coletor: o coletor solar de absorção direta lenticular. O dispositivo consiste num coletor de absorção direta com cobertura no formato de lente, capaz de concentrar a radiação solar incidente e, conseqüentemente, reduzindo a quantidade de NF necessária para operação. A análise óptica do dispositivo mostrou que ele possui tolerância angular de até 20° para a radiação incidente, de forma que pode ser utilizado sem sistemas de rastreamento em regiões equatoriais, necessitando apenas de ajustes sazonais. O coletor lenticular também é tolerante à dispersão, com um desvio máximo de foco de 2 mm na faixa espectral entre 300 nm e 1300 nm. Simulações numéricas do comportamento térmico do dispositivo mostram que ele possui comportamento semelhante a um CSAD tradicional em relação à eficiência energética. Porém, devido à absorção da mesma quantidade de energia por uma massa menor de NF, há um aumento significativo na temperatura alcançada pelo coletor lenticular. Dessa forma, o CSAD lenticular apresenta maior eficiência exergética quando comparado a um CSAD tradicional. A avaliação óptica experimental, realizada com protótipos fabricados em resina epóxi, validou a

análise direcional do coletor obtida por simulações. Adicionalmente, a caracterização térmica experimental com os coletores sob radiação solar natural mostrou que o CSAD lenticular alcança obtém aumento de temperatura superior ao do coletor tradicional e a razão entre os aumentos de temperatura tem valor próximo à razão de concentração utilizada no coletor lenticular.

5.1 TRABALHOS FUTUROS

O uso dos materiais e morfologias de NPs explorados nesse trabalho deve ser avaliado para outras aplicações de energia solar além do uso em CSAD. Destacam-se o uso em destiladores solares, coletores híbridos PV/T e resfriamento radiativo. Também é possível avaliar o uso de outros materiais em coletores de absorção direta, como por exemplo materiais baseados em carbono e pontos quânticos. Nesse sentido, há trabalhos em andamento que avaliam a performance de NFs compostos por NPs de polidopamina (PDA) em aplicações de energia solar.

Um ponto crítico no desenvolvimento dos CSAD é a análise de geração de energia anual, considerando as variações no ângulo de incidência da radiação solar e flutuações nos valores de intensidade. Além disso, é necessário desenvolver metodologias robustas para análise de viabilidade econômica desse tipo de dispositivo e comparação do uso de diferentes materiais.

O uso de algoritmo genético para otimização de NFs híbridos pode ser expandido para outros materiais e morfologias de NPs. Assim, é proposto o desenvolvimento de uma plataforma web na qual seja possível combinar diferentes tipos de NPs e gerar combinações com espectro otimizado para absorção solar.

Além disso, em relação ao coletor lenticular, é conveniente realizar análises adicionais em relação à geometria solar, realizar mais testes e validações e proceder ao desenvolvimento de um produto comercializável.

Finalmente, também é relevante o desenvolvimento de um CSAD tradicional de dimensões físicas compatíveis com o uso residencial ou industrial e realizar caracterização térmica, visando validar o desempenho previsto numericamente.

5.2 PRODUÇÃO ACADÊMICA RELACIONADA À TESE

Durante o desenvolvimento do presente trabalho, os artigos listados a seguir foram submetidos e publicados em revistas científicas. Esses trabalhos estão diretamente relacionados aos temas abordados na tese.

Artigos publicados em periódicos

- VITAL, C. V. P.; FAROOQ, S. ; ARAUJO, R. E. ; RATIVA, D. ; GOMEZ-MALAGON, L. A. Numerical assessment of transition metal nitrides nanofluids for improved performance

of direct absorption solar collectors. *Applied Thermal Engineering*, v. 190, p. 116799, 2021. (*Impact Factor* = 6,465)

- FAROOQ, S. ; VITAL, C. V. P. ; GOMEZ-MALAGON, L. A. ; ARAUJO, R. E. ; RATIVA, D. Thermo-optical performance of iron-doped gold nanoshells-based nanofluid on direct absorption solar collectors. *Solar Energy*, v. 208, p. 1181-1188, 2020. (*Impact Factor* = 7,188)
- FAROOQ, S.; VITAL, C. V. P.; TIKHONOWSKI, G.; POPOV, A.A.; KLIMENTOV, S. M.; GOMEZ-MALAGON, L. A.; ARAUJO, R. E.; KABASHIN, A.; RATIVA, D. Thermo-optical performance of bare laser-synthesized TiN nanofluids for direct absorption solar collector applications. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, vol. 252, p. 112203, 2023. (*Impact Factor* = 7,305)

Artigos aceitos em conferências

- VITAL, C. V. P.; RATIVA, D. ; GOMEZ-MALAGON, L. A. ; ARAUJO, R. E. . Avaliação do Uso de Nanofluido de Nitreto de Titânio em Coletor Solar de Absorção Direta. In: *IX Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2022*, Florianópolis. (Trabalho selecionado para publicação na *Revista Brasileira de Energia Solar*)
- PEDROSA, T. L.; VITAL, C. V. P.; RATIVA, D.; GOMEZ-MALAGON, L. A.; ARAUJO, R. E. Solar Harvesting Application with Gold Nanospheres: the Influence of Particle Size. In: *2022 SBfoton International Optics and Photonics Conference, 2022*, Recife.

Além dos artigos, também foi depositada a seguinte patente relacionada a sistemas lenticulares para coletores solares térmicos:

- GOMEZ-MALAGON, L. A. ; RATIVA, D.; VITAL, C. V. P.; ARAUJO, R. E. PLACA DE COLETOR SOLAR TERMICO COM SISTEMA LENTICULAR. 2021, Brasil. Patente: Modelo de Utilidade. Número do registro: BR20202101462, título: "PLACA DE COLETOR SOLAR TERMICO COM SISTEMA LENTICULAR", Instituição de registro: INPI - Instituto Nacional da Propriedade Industrial. Depósito: 26/07/2021

5.3 OUTROS ARTIGOS

A seguir são listados outros trabalhos produzidos que são relacionados a aplicações com NFs plasmônicos para energia solar térmica, mas não foram abordados diretamente nesta Tese.

Artigos publicados em periódicos

- BOUCANOVA, M. P. ; VITAL, C. V. P. ; RATIVA, D. ; GOMEZ-MALAGON, L. A. Single slope solar distiller performance using metallic nanofluids. *Solar Energy*, v. 245, p. 1-10, 2022. (*Impact Factor* = 7,188)
- DINIZ, F. L. J. ; VITAL, C. V. P. ; GOMEZ-MALAGON, L. A. Parametric analysis of energy and exergy efficiencies of a hybrid PV/T system containing metallic nanofluids. *Renewable Energy*, v. 186, p. 51-65, 2022. (*Impact Factor* = 8,634)

Artigos aceitos em conferências

- RAMOS, M. C.; VITAL, C. V. P.; FONSÊCA, H. A.; ARAUJO, R.E.; RATIVA, D. Analysis of 3-D waveguides in a cylindrical lens solar concentrator. In: *2022 SBfoton International Optics and Photonics Conference*, 2022, Recife.
- GUIMARAES, GLAUCYEVENN ; VITAL, CAIO VINICIUS PINHEIRO ; DOS SANTOS, FRANCISCO ERONI PAZ ; MELO, ANTONIO FRANCISCO A. A. ; MILLAN, DIEGO JOSE RATIVA . Solar harvesting with nanofluids of Ag-Nanocubes. In: *2021 SBfoton International Optics and Photonics Conference*, 2021, Sao Carlos.
- BOUCANOVA, M. P. ; VITAL, C. V. P. ; GOMEZ-MALAGON, L. A. . Modelagem da eficiência térmica de um destilador solar contendo nanopartículas metálicas. In: *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2020, Fortaleza.
- CONCEIÇÃO, E.D.P. ; BOUCANOVA, M. P. ; VITAL, C. V. P. ; GOMEZ-MALAGON, L. A. . Desenvolvimento e caracterização de um coletor solar de ar de baixo custo. In: *VIII Congresso Brasileiro de Energia Solar*, 2020, Fortaleza.

REFERÊNCIAS

- AHAMMED, N.; ASIRVATHAM, L. G.; WONGWISES, S. Thermoelectric cooling of electronic devices with nanofluid in a multiport minichannel heat exchanger. **Experimental Thermal and Fluid Science**, v. 74, p. 81–90, 2016. Citado na página 26.
- AHBABI-SARAY, J.; HEYHAT, M. M. Modeling of a direct absorption parabolic trough collector based on using nanofluid: 4e assessment and water-energy nexus analysis. **Energy**, v. 244, p. 123170, 2022. Citado na página 34.
- AKILU, S. et al. A review of thermophysical properties of water based composite nanofluids. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 66, p. 654–678, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 25 e 32.
- AMENDOLA, V. et al. Coexistence of plasmonic and magnetic properties in au 89 fe 11 nanoalloys. **Nanoscale**, Royal Society of Chemistry, v. 5, n. 12, p. 5611–5619, 2013. Citado na página 55.
- AMENDOLA, V. et al. Superior plasmon absorption in iron-doped gold nanoparticles. **Nanoscale**, Royal Society of Chemistry, v. 7, n. 19, p. 8782–8792, 2015. Citado na página 55.
- AMENDOLA, V. et al. Strong dependence of surface plasmon resonance and surface enhanced raman scattering on the composition of au–fe nanoalloys. **Nanoscale**, Royal Society of Chemistry, v. 6, n. 3, p. 1423–1433, 2014. Citado na página 55.
- AMJAD, M. et al. Volumetric solar heating and steam generation via gold nanofluids. **Applied Energy**, Elsevier, v. 206, p. 393–400, 2017. Citado na página 28.
- ASANO, S.; YAMAMOTO, G. Light scattering by a spheroidal particle. **Applied Optics**, Optica Publishing Group, v. 14, n. 1, p. 29–49, Jan 1975. Citado na página 38.
- BAFFOU, G. **Thermoplasmonics: Heating Metal Nanoparticles Using Light**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2017. Citado 5 vezes nas páginas 22, 26, 27, 33 e 36.
- BATHE, K.-J. Finite element method. **Wiley encyclopedia of computer science and engineering**, Wiley Online Library, p. 1–12, 2007. Citado na página 43.
- BAYDA, S. et al. The history of nanoscience and nanotechnology: From chemical–physical applications to nanomedicine. **Molecules**, v. 25, n. 1, 2020. Citado na página 25.
- BHALLA, V.; KHULLAR, V.; TYAGI, H. Investigation of factors influencing the performance of nanofluid-based direct absorption solar collector using taguchi method. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Springer, v. 135, p. 1493–1505, 2019. Citado 5 vezes nas páginas 32, 40, 45, 47 e 65.
- BHATIA, P.; VERMA, S.; SINHA, M. Tunable plasmonic properties of elongated bimetallic alloys nanoparticles towards deep uv-nir absorbance and sensing. **Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer**, Elsevier, v. 241, p. 106751, 2020. Citado na página 38.
- BLABER, M. G.; ARNOLD, M. D.; FORD, M. J. A review of the optical properties of alloys and intermetallics for plasmonics. **Journal of Physics: Condensed Matter**, IOP Publishing, v. 22, n. 14, p. 143201, 2010. Citado na página 55.

BOHREN, C. F.; HUFFMAN, D. R. **Absorption and scattering of light by small particles**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008. Citado 2 vezes nas páginas 37 e 38.

BOLDOO, T. et al. Review of the photothermal energy conversion performance of nanofluids, their applications, and recent advances. **Energies**, MDPI, v. 13, n. 21, p. 5748, 2020. Citado na página 67.

BORTOLATO, M. et al. Investigation of a single wall carbon nanohorn-based nanofluid in a full-scale direct absorption parabolic trough solar collector. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 150, p. 693–703, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 34.

BOUÇANOVA, M. de P. et al. Single slope solar distiller performance using metallic nanofluids. **Solar Energy**, v. 245, p. 1–10, 2022. Citado na página 28.

BURKE, A. et al. Thermal and photochemical studies of solar energy absorbers dissolved in heat transfer fluids. **Solar Energy Materials**, v. 6, n. 4, p. 481–490, 1982. Citado na página 30.

CABALEIRO, D. et al. Specific heat of metal oxide nanofluids at high concentrations for heat transfer. **International journal of heat and mass transfer**, Elsevier, v. 88, p. 872–879, 2015. Citado na página 45.

CHEN, C. J. **Physics of solar energy**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2011. Citado na página 19.

CHEN, M. et al. Synthesis and solar photo-thermal conversion of au, ag, and au-ag blended plasmonic nanoparticles. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 127, p. 293–300, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 34.

CHEN, M. et al. Complementary enhanced solar thermal conversion performance of core-shell nanoparticles. **Applied energy**, Elsevier, v. 211, p. 735–742, 2018. Citado na página 70.

CHEN, M. et al. Enhancement of photo-thermal conversion using gold nanofluids with different particle sizes. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 112, p. 21–30, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 91.

CHEN, M. et al. Investigating the collector efficiency of silver nanofluids based direct absorption solar collectors. **Applied energy**, Elsevier, v. 181, p. 65–74, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 91.

CHEN, N. et al. Complementary optical absorption and enhanced solar thermal conversion of cuo-ato nanofluids. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 162, p. 83–92, 2017. Citado na página 70.

CHEN, X.; CHEN, M.; ZHOU, P. Solar-thermal conversion performance of heterogeneous nanofluids. **Renewable Energy**, v. 198, p. 1307–1317, 2022. Citado na página 34.

CHEN, X. et al. Ultra-stable carbon quantum dot nanofluids for direct absorption solar collectors. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 240, p. 111720, 2022. Citado na página 51.

CHIEN, F. et al. The role of renewable energy and urbanization towards greenhouse gas emission in top asian countries: Evidence from advance panel estimations. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 186, p. 207–216, 2022. Citado na página 19.

CHOI, S. U.; EASTMAN, J. A. **Enhancing thermal conductivity of fluids with nanoparticles**. [S.l.], 1995. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 25.

CHOUDHARY, S.; SACHDEVA, A.; KUMAR, P. Influence of stable zinc oxide nanofluid on thermal characteristics of flat plate solar collector. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 152, p. 1160–1170, 2020. Citado na página 27.

CHOUDHARY, S.; SACHDEVA, A.; KUMAR, P. Investigation of the stability of mgo nanofluid and its effect on the thermal performance of flat plate solar collector. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 147, p. 1801–1814, 2020. Citado na página 27.

CHOUDHARY, S.; SACHDEVA, A.; KUMAR, P. Time-based analysis of stability and thermal efficiency of flat plate solar collector using iron oxide nanofluid. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 183, p. 115931, 2021. Citado na página 27.

COMMISSION, I. E. et al. Iec 60904-9: 2020—photovoltaic devices—part 9: Classification of solar simulator characteristics. **International Electrotechnical Commission: Geneva, Switzerland**, p. 10, 2020. Citado na página 51.

DAUD, M. U. et al. Finite element analysis of silver nanorods, spheres, ellipsoids and core-shell structures for hyperthermia treatment of cancer. **Materials**, MDPI, v. 15, n. 5, p. 1786, 2022. Citado na página 43.

DELFANI, S.; KARAMI, M.; AKHAVAN-BEHABADI, M. Performance characteristics of a residential-type direct absorption solar collector using mwcnt nanofluid. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 87, p. 754–764, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 33.

DINIZ, F. L.; VITAL, C. V.; GÓMEZ-MALAGÓN, L. A. Parametric analysis of energy and exergy efficiencies of a hybrid pv/t system containing metallic nanofluids. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 186, p. 51–65, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 47.

DU, M.; TANG, G. Plasmonic nanofluids based on gold nanorods/nanoellipsoids/nanosheets for solar energy harvesting. **Solar Energy**, Elsevier, v. 137, p. 393–400, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 73.

DUAN, H. et al. Photothermal properties of plasmonic nanoshell-blended nanofluid for direct solar thermal absorption. **Optics express**, Optical Society of America, v. 26, n. 23, p. 29956–29967, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 23, 33 e 91.

DUAN, H. et al. Effect of plasmonic nanoshell-based nanofluid on efficiency of direct solar thermal collector. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 133, p. 188–193, 2018. Citado 7 vezes nas páginas 23, 27, 33, 41, 55, 70 e 91.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A.; BLAIR, N. **Solar engineering of thermal processes, photovoltaics and wind**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 29, 41 e 45.

EASTMAN, J. A. et al. Enhanced thermal conductivity through the development of nanofluids. **MRS Online Proceedings Library (OPL)**, Cambridge University Press, v. 457, 1996. Citado 3 vezes nas páginas 22, 25 e 26.

ENOCH, S.; BONOD, N. **Plasmonics: from basics to advanced topics**. [S.l.]: Springer, 2012. v. 167. Citado na página 35.

EPE, E. d. P. E. **Balço Energético Nacional 2022: Ano base 2021 – Relatório Síntese**. Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <<https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-675/topico-638/BEN2022.pdf>>. Acesso em: 28 set 2022. Citado na página 19.

FAN, X.; ZHENG, W.; SINGH, D. J. Light scattering and surface plasmons on small spherical particles. **Light: Science & Applications**, Nature Publishing Group, v. 3, n. 6, p. e179–e179, 2014. Citado na página 36.

FARAHAT, S.; SARHADDI, F.; AJAM, H. Exergetic optimization of flat plate solar collectors. **Renewable energy**, Elsevier, v. 34, n. 4, p. 1169–1174, 2009. Citado na página 66.

FAROOQ, S. et al. Spherical plasmonic structures for solar absorption. In: **2018 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)**. [S.l.: s.n.], 2018. p. 1–4. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 28.

FAROOQ, S. et al. Thermo-optical performance of iron-doped gold nanoshells-based nanofluid on direct absorption solar collectors. **Solar Energy**, Elsevier, v. 208, p. 1181–1188, 2020. Citado 7 vezes nas páginas 28, 56, 57, 58, 59, 60 e 70.

FAROOQ, S. et al. Thermo-optical performance of bare laser-synthesized tin nanofluids for direct absorption solar collector applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 252, p. 112203, 2023. Citado 2 vezes nas páginas 63 e 67.

FIGAJ, R.; ŻOŁĄDEK, M. Experimental and numerical analysis of hybrid solar heating and cooling system for a residential user. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 172, p. 955–967, 2021. Citado na página 19.

FILHO, E. P. B. et al. Experimental investigation of a silver nanoparticle-based direct absorption solar thermal system. **Energy conversion and Management**, Elsevier, v. 84, p. 261–267, 2014. Citado na página 27.

FURTADO, L. M.; GÓMEZ-MALAGÓN, L. Simulation of the linear and nonlinear optical properties of colloids containing metallic core-dielectric shell nanoellipsoids. **Plasmonics**, v. 9, n. 6, 2014. Citado na página 36.

GE, M.; FRIEDRICH, J.; VIGNA, L. **4 Charts Explain Greenhouse Gas Emissions by Countries and Sectors**. 2021. Website. Disponível em: <<https://www.wri.org/insights/4-charts-explain-greenhouse-gas-emissions-countries-and-sectors>>. Acesso em: 05 oct 2021. Citado na página 19.

GHARIBSHAHI, E. et al. Theory, simulation and experiment of optical properties of cobalt ferrite (cofe₂o₄) nanoparticles. **Journal of Materials Science & Technology**, Elsevier, v. 57, p. 180–187, 2020. Citado na página 43.

GÓMEZ, L. et al. Solvent effects on the linear and nonlinear optical response of silver nanoparticles. **Applied Physics B**, Springer, v. 92, n. 1, p. 61–66, 2008. Citado na página 27.

INPI - INSTITUTO NACIONAL DA PROPRIEDADE INDUSTRIAL. Luis Arturo Gómez-Malagón, Diego Rativa, Caio Vinicius Pinheiro Vital e Renato Evangelista de Araujo. **Placa de coletor solar térmico com sistema lenticular**. 2021. BR20202101462, 26/07/2021. Citado 2 vezes nas páginas 22 e 88.

- GORJI, T. B.; RANJBAR, A. Geometry optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector using response surface methodology. **Solar Energy**, Elsevier, v. 122, p. 314–325, 2015. Citado na página 47.
- GORJI, T. B.; RANJBAR, A. A numerical and experimental investigation on the performance of a low-flux direct absorption solar collector (dasc) using graphite, magnetite and silver nanofluids. **Solar Energy**, Elsevier, v. 135, p. 493–505, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 91.
- GORJI, T. B.; RANJBAR, A. Thermal and exergy optimization of a nanofluid-based direct absorption solar collector. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 106, p. 274–287, 2017. Citado na página 47.
- GOSWAMI, D. Y. **Principles of solar engineering**. [S.l.]: CRC Press, 2022. Citado na página 45.
- GREEN, D. W.; SOUTHARD, M. Z. **Perry's chemical engineers' handbook**. [S.l.]: McGraw-Hill Education, 2019. Citado na página 45.
- GUIMARÃES, G. et al. Solar harvesting with nanofluids of ag-nanocubes. In: **2021 SBFoton International Optics and Photonics Conference (SBFoton IOPC)**. [S.l.: s.n.], 2021. p. 1–4. Citado na página 28.
- GULER, U. et al. Performance analysis of nitride alternative plasmonic materials for localized surface plasmon applications. **Applied Physics B**, Springer, v. 107, n. 2, p. 285–291, 2012. Citado na página 60.
- GULER, U.; SHALAEV, V. M.; BOLTASSEVA, A. Nanoparticle plasmonics: going practical with transition metal nitrides. **Materials Today**, Elsevier, v. 18, n. 4, p. 227–237, 2015. Citado na página 60.
- GUPTA, H. K.; AGRAWAL, G. D.; MATHUR, J. An experimental investigation of a low temperature al₂o₃-h₂o nanofluid based direct absorption solar collector. **Solar Energy**, Elsevier, v. 118, p. 390–396, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 32.
- HALE, G. M.; QUERRY, M. R. Optical constants of water in the 200-nm to 200- μ m wavelength region. **Applied optics**, Optical Society of America, v. 12, n. 3, p. 555–563, 1973. Citado na página 35.
- HAM, J.; SHIN, Y.; CHO, H. Comparison of thermal performance between a surface and a volumetric absorption solar collector using water and fe₃o₄ nanofluid. **Energy**, v. 239, p. 122282, 2022. Citado na página 34.
- HE, Q. et al. Experimental investigation on photothermal properties of nanofluids for direct absorption solar thermal energy systems. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 73, p. 150–157, 2013. Citado na página 27.
- HEWAKURUPPU, Y. L. et al. Limits of selectivity of direct volumetric solar absorption. **Solar Energy**, Elsevier, v. 114, p. 206–216, 2015. Citado 2 vezes nas páginas 27 e 29.
- HOHENESTER, U.; TRÜGLER, A. Mnpbem—a matlab toolbox for the simulation of plasmonic nanoparticles. **Computer Physics Communications**, Elsevier, v. 183, n. 2, p. 370–381, 2012. Citado na página 38.

HORDY, N. et al. High temperature and long-term stability of carbon nanotube nanofluids for direct absorption solar thermal collectors. **Solar energy**, Elsevier Ltd, v. 105, p. 82–90, 2014. Citado na página 33.

HOSSAIN, F.; KARIM, M. R.; BHUIYAN, A. A. A review on recent advancements of the usage of nano fluid in hybrid photovoltaic/thermal (pv/t) solar systems. **Renewable Energy**, v. 188, p. 114–131, 2022. Citado na página 26.

HOSSEINI, S. M. S.; DEHAJ, M. S. Assessment of tio₂ water-based nanofluids with two distinct morphologies in a u type evacuated tube solar collector. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 182, p. 116086, 2021. Citado na página 27.

HU, M. et al. Applications of radiative sky cooling in solar energy systems: Progress, challenges, and prospects. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, v. 160, p. 112304, 2022. Citado na página 26.

HUSCHKA, R. et al. Light-induced release of dna from gold nanoparticles: nanoshells and nanorods. **Journal of the American Chemical Society**, ACS Publications, v. 133, n. 31, p. 12247–12255, 2011. Citado na página 55.

IMAGING, T. Night vision and infrared camera systems| flir systems. **Copyright© 5i [cit. 2021-04-19]. Dostupné z: <https://www.flir.com/globalassets/importedassets/document/flir-ex-series-user-manual.pdf>**, 2019. Citado na página 51.

JEON, J.; PARK, S.; LEE, B. J. Analysis on the performance of a flat-plate volumetric solar collector using blended plasmonic nanofluid. **Solar Energy**, Elsevier, v. 132, p. 247–256, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 41.

JIN, J.-M. **The finite element method in electromagnetics**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015. Citado na página 43.

JOHNSON, P. B.; CHRISTY, R.-W. Optical constants of the noble metals. **Physical review B**, APS, v. 6, n. 12, p. 4370, 1972. Citado na página 35.

JOSEPH, A. et al. Optimisation of thermo-optical properties of sio₂/ag–cuo nanofluid for direct absorption solar collectors. **Journal of Molecular Liquids**, Elsevier, v. 296, p. 111986, 2019. Citado na página 91.

JUAN, M. L.; RIGHINI, M.; QUIDANT, R. Plasmon nano-optical tweezers. **Nature photonics**, Nature Publishing Group, v. 5, n. 6, p. 349–356, 2011. Citado na página 35.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. [S.l.]: Academic press, 2013. Citado na página 41.

KALOGIROU, S. A. et al. Exergy analysis of solar thermal collectors and processes. **Progress in Energy and Combustion Science**, Elsevier, v. 56, p. 106 – 137, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 30 e 42.

KAMARULZAMAN, A.; HASANUZZAMAN, M.; RAHIM, N. Global advancement of solar drying technologies and its future prospects: A review. **Solar Energy**, Elsevier, v. 221, p. 559–582, 2021. Citado na página 19.

KARABALLI, R. A.; MONFARED, Y. E.; DASOG, M. Overview of synthetic methods to prepare plasmonic transition-metal nitride nanoparticles. **Chemistry—A European Journal**, Wiley Online Library, v. 26, n. 39, p. 8499–8505, 2020. Citado na página 60.

KARAMI, M. et al. A new application of carbon nanotubes nanofluid as working fluid of low-temperature direct absorption solar collector. **Solar energy materials and solar cells**, Elsevier B.V, v. 121, p. 114–118, 2014. Citado na página 33.

KARAMI, M.; BOZORGI, M.; DELFANI, S. Effect of design and operating parameters on thermal performance of low-temperature direct absorption solar collectors: a review. **Journal of Thermal Analysis and Calorimetry**, Springer, v. 146, n. 3, p. 993–1013, 2021. Citado na página 47.

KHOURY, C. G.; NORTON, S. J.; VO-DINH, T. Plasmonics of 3-d nanoshell dimers using multipole expansion and finite element method. **Acs Nano**, ACS Publications, v. 3, n. 9, p. 2776–2788, 2009. Citado na página 43.

KIM, C. et al. In vivo molecular photoacoustic tomography of melanomas targeted by bioconjugated gold nanocages. **ACS nano**, ACS Publications, v. 4, n. 8, p. 4559–4564, 2010. Citado na página 67.

KIM, Y.; HAN, G.; SEO, T. An evaluation on thermal performance of cpc solar collector. **International Communications in Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 35, n. 4, p. 446–457, 2008. Citado na página 45.

KRISHNA, Y. et al. State-of-the-art heat transfer fluids for parabolic trough collector. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 152, p. 119541, 2020. Citado na página 28.

LALISSE, A. et al. Plasmonic efficiencies of nanoparticles made of metal nitrides (tin, zrn) compared with gold. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 6, p. 38647, 2016. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 60.

LEE, B. J. et al. Radiative heat transfer analysis in plasmonic nanofluids for direct solar thermal absorption. **Journal of solar energy engineering**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 134, n. 2, 2012. Citado na página 91.

LEE, Y. et al. Magneto-optical and optical properties of fe-rich au-fe alloy films near the fcc-bcc structural transformation region. **Physical Review B**, APS, v. 67, n. 10, p. 104424, 2003. Citado na página 55.

LI, Q. et al. Experimental investigation of a nanofluid absorber employed in a low-profile, concentrated solar thermal collector. In: EGGLETON, B. J.; PALOMBA, S. (Ed.). **Micro+Nano Materials, Devices, and Systems**. [S.l.]: SPIE, 2015. v. 9668, p. 96683P. Citado na página 34.

LIU, G. et al. Progress in thermoplasmonics for solar energy applications. **Physics Reports**, v. 981, p. 1–50, 2022. Citado 2 vezes nas páginas 26 e 34.

LIU, H. L. et al. Synthesis of monosized magnetic-optical auge alloy nanoparticles. **Journal of Applied Physics**, American Institute of Physics, v. 103, n. 7, p. 07D529, 2008. Citado na página 55.

- LIU, J. et al. A combined numerical and experimental study on graphene/ionic liquid nanofluid based direct absorption solar collector. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Elsevier, v. 136, p. 177–186, 2015. Citado na página 33.
- LONI, R. et al. Research and review study of solar dish concentrators with different nanofluids and different shapes of cavity receiver: Experimental tests. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 145, p. 783–804, 2020. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 34.
- LORENZO, E. Chromatic aberration effect on solar energy systems using fresnel lenses. **Applied Optics**, Optica Publishing Group, v. 20, n. 21, p. 3729–3732, 1981. Citado na página 83.
- LORENZO, E.; LUQUE, A. Fresnel lens analysis for solar energy applications. **Applied Optics**, Optica Publishing Group, v. 20, n. 17, p. 2941–2945, 1981. Citado na página 83.
- LOVEGROVE, K.; STEIN, W. **Concentrating solar power technology: principles, developments and applications**. [S.l.]: Elsevier, 2012. Citado na página 45.
- MA, Z. et al. Novel designs of hybrid thermal energy storage system and operation strategies for concentrated solar power plant. **Energy**, Elsevier, v. 216, p. 119281, 2021. Citado na página 19.
- MALLAH, A. R. et al. Blended morphologies of plasmonic nanofluids for direct absorption applications. **Applied Energy**, v. 229, p. 505–521, 2018. Citado na página 33.
- MALLAH, A. R. et al. Plasmonic nanofluids for high photothermal conversion efficiency in direct absorption solar collectors: Fundamentals and applications. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, v. 201, p. 110084, 2019. Citado na página 34.
- MAZUMDER, S. **Numerical methods for partial differential equations: finite difference and finite volume methods**. [S.l.]: Academic Press, 2015. Citado na página 45.
- MIE, G. Beiträge zur optik trüber medien, speziell kolloidaler metallösungen. **Annalen der physik**, Wiley Online Library, v. 330, n. 3, p. 377–445, 1908. Citado na página 37.
- MINARDI, J. E.; CHUANG, H. N. Performance of a “black” liquid flat-plate solar collector. **Solar Energy**, Elsevier, v. 17, n. 3, p. 179–183, 1975. Citado 2 vezes nas páginas 21 e 29.
- MIRJALILI, S. Genetic algorithm. In: **Evolutionary algorithms and neural networks**. [S.l.]: Springer, 2019. p. 43–55. Citado na página 47.
- MORA, C. et al. Broad threat to humanity from cumulative climate hazards intensified by greenhouse gas emissions. **Nature Climate Change**, Nature Publishing Group, v. 8, n. 12, p. 1062–1071, 2018. Citado na página 19.
- MYROSHNYCHENKO, V. et al. Modelling the optical response of gold nanoparticles. **Chemical Society Reviews**, Royal Society of Chemistry, v. 37, n. 9, p. 1792–1805, 2008. Citado na página 38.
- NAZEMI, M.; EL-SAYED, M. A. Electrochemical synthesis of ammonia from n_2 and h_2o under ambient conditions using pore-size-controlled hollow gold nanocatalysts with tunable plasmonic properties. **The journal of physical chemistry letters**, ACS Publications, v. 9, n. 17, p. 5160–5166, 2018. Citado 3 vezes nas páginas 52, 67 e 68.

- NOGHREHABADI, A.; HAJIDAVALLOO, E.; MORAVEJ, M. Experimental investigation of efficiency of square flat-plate solar collector using $\text{SiO}_2/\text{water}$ nanofluid. **Case Studies in Thermal Engineering**, Elsevier, v. 8, p. 378–386, 2016. Citado na página 27.
- NUÑEZ, M. P. et al. Exergy analysis and optimization of a solar-assisted heat pump. **Energy**, Elsevier, v. 23, n. 4, p. 337–344, 1998. Citado na página 42.
- OTANICAR, T. P. et al. Nanofluid-based direct absorption solar collector. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, American Institute of Physics, v. 2, n. 3, p. 033102, 2010. Citado 3 vezes nas páginas 26, 30 e 32.
- ÖZİŞİK, M. N. et al. **Finite difference methods in heat transfer**. [S.l.]: CRC press, 2017. Citado na página 45.
- PALIK, E. D. **Handbook of optical constants of solids**. [S.l.]: Academic press, 1998. v. 3. Citado 2 vezes nas páginas 35 e 55.
- PARVIN, S.; NASRIN, R.; ALIM, M. Heat transfer and entropy generation through nanofluid filled direct absorption solar collector. **International Journal of Heat and Mass Transfer**, Elsevier, v. 71, p. 386–395, 2014. Citado na página 91.
- PAYBACK, S. **Energia Termossolar para a Indústria: Brasil**. [S.l.], 2018. Citado 2 vezes nas páginas 19 e 20.
- PENG, W.; SADAGHIANI, O. K. Thermal performance enhancement of direct absorption solar collector using nanoparticle in sunray trap. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 187, p. 116578, 2021. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 34.
- PETELA, R. Exergy of Heat Radiation. **Journal of Heat Transfer**, v. 86, n. 2, p. 187–192, 05 1964. Citado na página 42.
- POPOV, A. A. et al. Laser-synthesized tin nanoparticles as promising plasmonic alternative for biomedical applications. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–11, 2019. Citado na página 52.
- PROCEL. **Pesquisa de Posse e Hábitos de Uso de Equipamentos Elétricos na Classe Residencial: PPH 2019**. [S.l.], 2019. Disponível em: <<https://q.eletronbras.com/pt/AreasdeAtuacao/BRASIL.pdf>>. Acesso em: 28 set 2022. Citado na página 20.
- QIN, C. et al. Optimization of a direct absorption solar collector with blended plasmonic nanofluids. **Solar Energy**, Elsevier, v. 150, p. 512–520, 2017. Citado 3 vezes nas páginas 23, 34 e 47.
- QIU, J. et al. Gold nanocages for effective photothermal conversion and related applications. **Chemical Science**, Royal Society of Chemistry, v. 11, n. 48, p. 12955–12973, 2020. Citado na página 67.
- QU, J. et al. Photo-thermal conversion characteristics of $\text{mWCNT-H}_2\text{O}$ nanofluids for direct solar thermal energy absorption applications. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 124, p. 486–493, 2017. Citado 2 vezes nas páginas 23 e 33.
- RABL, A. **Active solar collectors and their applications**. [S.l.]: Oxford University Press on Demand, 1985. Citado na página 45.

RATIVA, D.; GÓMEZ-MALAGÓN, L. A. Solar radiation absorption of nanofluids containing metallic nanoellipsoids. **Solar Energy**, Elsevier, v. 118, p. 419–425, 2015. Citado 4 vezes nas páginas 28, 70, 73 e 74.

RATIVA, D.; GÓMEZ-MALAGÓN, L. A. Colloidal plasmonic structures for harvesting solar radiation. **Renewable energy**, Elsevier, v. 118, p. 947–954, 2018. Citado 2 vezes nas páginas 28 e 35.

REN21. **Renewables 2021 Global Status Report**. Paris, 2021. Citado na página 19.

RUGGIERO, M. A. G.; LOPES, V. L. d. R. **Cálculo numérico: aspectos teóricos e computacionais**. [S.l.]: Makron Books do Brasil, 1997. Citado na página 45.

SAINZ-MAÑAS, M. et al. Direct absorption nanofluid-based solar collectors for low and medium temperatures. a review. **Energy**, v. 260, p. 124916, 2022. Citado na página 34.

SEO, J. et al. Tailoring the spectral absorption coefficient of a blended plasmonic nanofluid using a customized genetic algorithm. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group, v. 10, n. 1, p. 1–10, 2020. Citado 3 vezes nas páginas 23, 28 e 47.

SHARAF, O. Z. et al. Energy and exergy analysis and optimization of low-flux direct absorption solar collectors (dascs): Balancing power-and temperature-gain. **Renewable Energy**, Elsevier, v. 133, p. 861–872, 2019. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 42.

SHIM, K. et al. Rationally designed bimetallic au@ pt nanoparticles for glucose oxidation. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–7, 2019. Citado na página 55.

SINT, N. K. C. et al. Theoretical analysis to determine the efficiency of a cuo-water nanofluid based-flat plate solar collector for domestic solar water heating system in myanmar. **Solar Energy**, Elsevier, v. 155, p. 608–619, 2017. Citado na página 27.

SKRABALAK, S. E. et al. Gold nanocages: synthesis, properties, and applications. **Accounts of chemical research**, ACS Publications, v. 41, n. 12, p. 1587–1595, 2008. Citado na página 67.

SMAJIC, J. et al. Comparison of numerical methods for the analysis of plasmonic structures. **Journal of Computational and Theoretical Nanoscience**, American Scientific Publishers, v. 6, n. 3, p. 763–774, 2009. Citado na página 38.

SREEKUMAR, S. et al. Broadband absorbing mono, blended and hybrid nanofluids for direct absorption solar collector: a comprehensive review. **Nano Futures**, IOP Publishing, v. 6, n. 2, p. 022002, 2022. Citado na página 34.

STANDARD, A. **ASTM G173-03: Standard Tables for Reference Solar Spectral Irradiances: Direct Normal and Hemispherical on 37 0 Tilted Surface**. [S.l.], 2008. Citado 2 vezes nas páginas 39 e 51.

SUN, L. et al. A review of multifunctional applications of nanofluids in solar energy. **Powder Technology**, v. 411, p. 117932, 2022. Citado na página 26.

TAYLOR, R. A. et al. Nanofluid optical property characterization: towards efficient direct absorption solar collectors. **Nanoscale research letters**, Springer, v. 6, n. 1, p. 1–11, 2011. Citado na página 32.

THAKUR, A. K. et al. A novel reduced graphene oxide based absorber for augmenting the water yield and thermal performance of solar desalination unit. **Materials Letters**, Elsevier, v. 286, p. 128867, 2021. Citado na página 19.

TSUI, K.-L. An overview of taguchi method and newly developed statistical methods for robust design. **IIE Transactions**, Taylor & Francis, v. 24, n. 5, p. 44–57, 1992. Citado na página 47.

TUERSUN, P.; HAN, X. Optical absorption analysis and optimization of gold nanoshells. **Applied optics**, Optica Publishing Group, v. 52, n. 6, p. 1325–1329, 2013. Citado na página 35.

TURKYILMAZOGLU, M. Performance of direct absorption solar collector with nanofluid mixture. **Energy Conversion and Management**, Elsevier, v. 114, p. 1–10, 2016. Citado na página 32.

TYAGI, H.; PHELAN, P.; PRASHER, R. Predicted efficiency of a low-temperature nanofluid-based direct absorption solar collector. **Journal of solar energy engineering**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 131, n. 4, 2009. Citado 5 vezes nas páginas 21, 30, 32, 39 e 45.

VIEIRA, A. M. et al. Improving the performance of direct solar collectors and stills by controlling the morphology and size of plasmonic core–shell nanoheaters. **The Journal of Physical Chemistry C**, v. 125, n. 36, p. 19653–19665, 2021. Citado 3 vezes nas páginas 28, 34 e 51.

VISKANTA, R. Direct absorption solar radiation collection systems. In: _____. **Solar Energy Utilization**. Dordrecht: Springer, 1987. p. 334–360. Citado na página 30.

VITAL, C. V. et al. Numerical assessment of transition metal nitrides nanofluids for improved performance of direct absorption solar collectors. **Applied Thermal Engineering**, Elsevier, v. 190, p. 116799, 2021. Citado 9 vezes nas páginas 40, 45, 61, 62, 64, 65, 66, 67 e 70.

VITAL, C. V. P.; BARBOSA, I. S.; GÓMEZ-MALAGÓN, L. A. Eficiência de um coletor termossolar de placas planas usando suspensões de tio₂ e al₂o₃. In: **Anais do VI Congresso Brasileiro de Energia Solar, 2016**. Belo Horizonte: Associação Brasileira de Energia Solar, 2016. Citado na página 27.

VITAL, C. V. P. et al. Avaliação do uso de nanofluido de nitreto de titânio em coletor solar de absorção direta. In: **IX Congresso Brasileiro de Energia Solar-CBENS**. Florianópolis: Associação Brasileira de Energia Solar, 2022. p. 1–7. Citado 2 vezes nas páginas 29 e 39.

WANG, N. et al. Thermal properties and solar collection characteristics of oil-based nanofluids with low graphene concentration. **Energy Procedia**, v. 105, p. 194–199, 2017. Citado na página 34.

WANG, X. et al. Investigation of photothermal heating enabled by plasmonic nanofluids for direct solar steam generation. **Solar Energy**, Elsevier, v. 157, p. 35–46, 2017. Citado na página 28.

WANG, Y. et al. Comparison study of gold nanoheptapods, nanorods, and nanocages for photothermal cancer treatment. **ACS nano**, ACS Publications, v. 7, n. 3, p. 2068–2077, 2013. Citado na página 67.

WIKIPEDIA. **Volumen**. 2022. Website. Disponível em: <<https://de.m.wikipedia.org/wiki/Volumen>>. Acesso em: 04 dez 2022. Citado na página 48.

XIONG, Q. 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**, v. 310, p. 127528, 2021. Citado na página 26.

XUAN, Y.; DUAN, H.; LI, Q. Enhancement of solar energy absorption using a plasmonic nanofluid based on tio₂/ag composite nanoparticles. **RCS Advances**, Royal Society of Chemistry, v. 4, p. 16206–16213, 2014. Citado 2 vezes nas páginas 33 e 55.

YANG, X. et al. Photoacoustic tomography of a rat cerebral cortex in vivo with au nanocages as an optical contrast agent. **Nano letters**, ACS Publications, v. 7, n. 12, p. 3798–3802, 2007. Citado na página 67.

YUSHANOV, S.; CROMPTON, J. S.; KOPPENHOEFER, K. C. Mie scattering of electromagnetic waves. In: **Proceedings of the COMSOL Conference**. [S.l.: s.n.], 2013. v. 116. Citado na página 44.

ZHANG, H. et al. Photothermal conversion characteristics of gold nanoparticle dispersions. **Solar Energy**, Elsevier, v. 100, p. 141–147, 2014. Citado na página 27.

ZHAO, J. et al. Methods for describing the electromagnetic properties of silver and gold nanoparticles. **Accounts of chemical research**, ACS Publications, v. 41, n. 12, p. 1710–1720, 2008. Citado na página 44.