



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

ELTON PERCEU SILVA MAIA

**SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE RECEPTOR PARA ENERGIA SOLAR
CONCENTRADA**

FORTALEZA

2024

ELTON PERCEU SILVA MAIA

SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE RECEPTOR PARA ENERGIA SOLAR
CONCENTRADA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos Equipamentos e Sistemas Para Energias Renováveis.

Orientador: Prof. Dr. André Valente Bueno.

FORTALEZA

2024

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

M185s Maia, Elton Perceu Silva.
Simulação e desenvolvimento de receptor para energia solar concentrada / Elton Perceu Silva Maia. –
2024.
63 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia, Programa de Pós-
Graduação em Engenharia Mecânica, Fortaleza, 2024.
Orientação: Prof. Dr. André Valente Bueno.

1. Receptor Solar. 2. CSP. 3. Simulação Computacional. 4. Desenvolvimento. I. Título.

CDD 620.1

ELTON PERCEU SILVA MAIA

SIMULAÇÃO E DESENVOLVIMENTO DE RECEPTOR PARA ENERGIA SOLAR
CONCENTRADA

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado Acadêmico em Engenharia Mecânica do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Mecânica do Centro de Tecnologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de mestre em Engenharia Mecânica. Área de Concentração: Processos Equipamentos e Sistemas Para Energias Renováveis.

Aprovada em: 30/08/2024.

BANCA EXAMINADORA

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

Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro
Universidade da Integração Internacional da
Lusofonia Afro-Brasileira (UNILAB)

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

Aos meus pais, Everton e Eliane. À minha esposa e filhos, Amanda, Laura e Luiz.

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal Ceará, pela oportunidade de realizar este Mestrado.

Ao Prof. Dr. André Valente Bueno, pela excelente orientação.

Aos professores participantes da banca examinadora Prof. Dr. Francisco Olimpio Moura Carneiro e Prof. Dr. Paulo Alexandre Costa Rocha pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A Prof.^a Dra. Fernanda Leite Lobo pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

Ao meu amigo Lucas Neto da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas, sugestões e apoio no desenvolvimento da pesquisa.

Aos demais professores do Programa de Mestrado, pelas aulas e conhecimentos compartilhados.

Aos colegas da turma de mestrado, pela ajuda, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Aos bolsistas de graduação, pelos trabalhos prestados.

À minha família pelo apoio em todos os momentos.

"Concentre todos seus pensamentos na tarefa que está realizando. Os raios de sol não queimam até que sejam colocados em foco."
(Alexander Graham Bell, 1901, p. 34.)

RESUMO

Uma preocupação crescente atualmente é a constante elevação da temperatura do planeta devido ao aumento da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera. Ações por parte dos governos e instituições não governamentais vêm sendo realizadas, como a criação das metas do Acordo de Paris, que tem por objetivo limitar esse aumento de temperatura mundial a $1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ e reduzir a zero as emissões dos gases CO_2 até metade do século. Apesar dos esforços empreendidos, a implantação das tecnologias de transição energética está muito longe dos níveis necessários para alcançar as metas definidas. Muitos países estão adotando a *Concentrated Solar Power* (Energia Solar Concentrada) (CSP) como alternativa as fontes não renováveis. Através da pesquisa de novas tecnologias CSP, pode-se fazer com que a mesma seja cada vez mais viável entre a gama de alternativas de energia limpa. Portanto, este trabalho contribui desenvolvendo um receptor solar que agrega as melhores características já amplamente pesquisadas e avança buscando a melhor eficiência. O intuito é simular computacionalmente o receptor, através do software ANSYS CFX, com valores de *Direct Normal Irradiance* (Radiação Direta Normal) (DNI) médias da região Nordeste do Brasil, além de especificar a construção do receptor solar, que faz parte de um conjunto formado por um prato parabólico e uma estrutura de suporte e movimentação. O receptor solar simulado conseguiu valores de energia absorvida de $2,4\text{ kW}$ para uma vazão mássica de $0,002\text{ kg/s}$ e DNI de 800 W/m^2 . Para valores de DNI acima de 600 W/m^2 é possível alcançar temperaturas de reforma a vapor para produção de hidrogênio verde.

Palavras-chave: Receptor Solar; CSP; Simulação Computacional; Desenvolvimento.

ABSTRACT

A growing concern nowadays is the constant rise in the planet's temperature due to the increase in greenhouse gas emissions in the atmosphere. Actions by governments and non-governmental institutions have been carried out, such as the creation of the Paris Agreement goals, which aim to limit this global temperature increase to $1.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ and reduce CO_2 emissions to zero by mid-century. Despite the efforts made, the implementation of energy transition technologies is far from the levels needed to achieve the defined goals. Many countries are adopting concentrated solar power CSP as an alternative to non-renewable sources. Through research into new CSP technologies, it is possible to make it increasingly viable among the range of clean energy alternatives. Therefore, this work contributes by developing a solar receiver that aggregates the best characteristics already widely researched and advances in seeking the best efficiency. The aim is to computationally simulate the receiver using the ANSYS CFX software, with average Direct Normal Irradiance DNI values from the Northeast region of Brazil, in addition to specifying the construction of the solar receiver, which is part of a set formed by a parabolic dish and a support and movement structure. The simulated solar receiver achieved thermal capacity values of 2.4 kW for a mass flow rate of 0.002 kg/s and DNI of 800 W/m^2 . For DNI values above 600 W/m^2 , it is possible to reach steam reforming temperatures for green hydrogen production.

Keywords: Solar Receiver; CSP; Computer Simulation; Development.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Grafico do Fornecimento total de energia por fonte	16
Figura 2 – Funcionamento do sistema de energia solar concentrada	19
Figura 3 – Diagrama esquemático dos quatros modelos de CSP	20
Figura 4 – Concentrador de calha parabólica (California, Estados Unidos da América (EUA))	21
Figura 5 – Concentrador linear Fresnel (Sevilha, Espanha)	21
Figura 6 – Concentrador de torre central (Sevilha, Espanha)	22
Figura 7 – Concentrador de Prato Parabólico (Suíça)	23
Figura 8 – Modelo de Receptor Solar	25
Figura 9 – Tipos de receptor quanto a configuração geométrica. Receptor solar do tipo: (a)Externo, (b)Cavidade	25
Figura 10 – (a) Esquema 3D da cavidade RPC com um dos tijolos RPC trapezoidais destacados em azul. Fotografia de um tijolo RPC trapezoidal de sete tipos de materiais diferentes: (b) SiSiC 10PPI (linhas brancas tracejadas delineando a forma trapezoidal), (c) SiSiC 20 PPI, (d) SiSiC 30 PPI, (e) alumina 10 PPI , (f) alumina 20 PPI, (g) alumina 30 PPI, (h) ceria 10 PPI. (PPI é a densidade de poros, <i>Pores Per Inch</i> (Poros Por Polegada) (PPI))	26
Figura 11 – Etapas do processo convencional para preparação de cerâmica RPC	29
Figura 12 – Faixa de operação de receptores tubular, volumétrico e novos avanços	30
Figura 13 – Malha computacional	33
Figura 14 – Etapas para a obtenção da solução numérica de um problema de fluidos	34
Figura 15 – Formas de apresentação de resultados de simulação numérica. (a) Formato de lista e (b) Visualização gráfica	34
Figura 16 – Equipamento CSP	35
Figura 17 – Braço do concentrador	36
Figura 18 – Conjunto motoredutor e mancais	36
Figura 19 – Movimentos do concentrador	37
Figura 20 – Partes do receptor solar	38
Figura 21 – Tubo e chapas do receptor	39
Figura 22 – (a)Placa <i>Reticulated Porous Ceramic</i> (Cerâmica Porosa Reticulada) (RPC) trapezoidal, (b)Medidas básicas da cavidade RPC	40

Figura 23 – Geometria do receptor no Catia	41
Figura 24 – Malha computacional do receptor solar	42
Figura 25 – Gráfico de independência de malha	43
Figura 26 – (a) Modelo esquemático do receptor no CFX, (b) Entrada e saída de fluxo de massa no CFX	44
Figura 27 – Radiação nas paredes do receptor	44
Figura 28 – Arranjo geral do sistema do concentrador/receptor com a indicação dos locais de coleta das variáveis	47
Figura 29 – Carcaça inox do receptor soldada e usinada	49
Figura 30 – Cavity RPC fabricada	50
Figura 31 – Gráfico de Energia Absorvida em função da Vazão mássica	51
Figura 32 – Gráfico de Temperatura de saída do receptor em função da vazão mássica . .	51
Figura 33 – Gráfico de Eficiência do receptor em função vazão mássica	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Descrição e especificações dos quatro principais CSP	22
Tabela 2 – Fotografias e parâmetros morfológicos das estruturas de céria porosa ordenada e RPC	27
Tabela 3 – Matérias-primas utilizadas na preparação de suspensão cerâmica	28
Tabela 4 – Temperatura operacional e faixas de fluxo de receptores de torre solar . . .	29
Tabela 5 – Parâmetros de entrada da simulação computacional	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAD	<i>Computer Aided Design</i> (Desenho Assistido por Computador)
CSP	<i>Concentrated Solar Power</i> (Energia Solar Concentrada)
DFC	Dinâmica dos Fluidos Computacional
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i> (Radiação Direta Normal)
EUA	Estados Unidos da América
M1	Movimento em torno do eixo Z
M2	Movimento em torno de um eixo no plano XY
MVF	Método dos Volumes Finitos
OCDE	Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico
PPI	<i>Pores Per Inch</i> (Poros Por Polegada)
PTC	<i>Parabolic Trough Collector</i> (Coletor de Calha Parabólica)
PU	Poliuretano
RPC	<i>Reticulated Porous Ceramic</i> (Cerâmica Porosa Reticulada)
SYNGAS	<i>Synthesis-Gas</i> (Gás de Síntese)
TIG	<i>Tungsten Inert Gas</i>
WGRS	<i>Water-Gas Shift Reaction</i> (Reação de Deslocamento Gás-Água)

LISTA DE SÍMBOLOS

H_2O	Água
Al_2O_3	Alumina
Al	Alumínio
A_c	Área do concentrador
$c_p(T)$	Calor específico do ar dependente da temperatura
Q	Energia Absorvida
$SiSiC$	Carboneto de silício infundido com silício
cm	Centímetro
CeO_2	Céria
Cu	Cobre
CO_2	Dióxido de carbono
$\eta_{ótica}$	Eficiência ótica do concentrador
$\eta_{receptor}$	Eficiência térmica do receptor
P_{solar}	Energia solar incidente
h	Entalpia
Δh°	Entalpia de formação
C_2H_5OH	Etanol
$C_3H_8O_3$	Glicerol
g	Grama
$^\circ C$	Grau Celsius
H_2	Hidrogênio
K	Kelvin
MPa	Megapascal
MW	Megawatt
CH_4	Metano
CH_3OH	Metanol

m	Metro
m^3	Metro cúbico
m^2	Metro quadrado
mm	Milímetro
min	Minuto
CO	Monóxido de carbono
N	Newton
Ni	Níquel
”	Polegada
kJ	Quilojoule
kW	Quilowatt
s	Segundo
$T_{ar,entrada}$	Temperatura do ar de entrada
$T_{ar,sáida}$	Temperatura do ar de saída
\dot{m}_{ar}	Vazão mássica
V	Volt
W	Watt

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	18
2.1	Definição de Energia solar concentrada	18
2.2	Tipos de tecnologias de energia solar concentrada	19
2.3	Energia solar concentrada para produção de hidrogênio	23
2.4	Receptor	24
2.4.1	<i>Configuração geométrica</i>	25
2.4.2	<i>Material do receptor</i>	26
2.4.3	<i>A morfologia dos receptores cerâmicos</i>	27
2.4.4	<i>A fabricação da cavidade RPC</i>	28
2.4.5	<i>Fluido de trabalho</i>	28
2.4.6	<i>Pressão e temperatura de operação</i>	30
2.4.7	<i>Indicador de desempenho</i>	31
2.5	Dinâmica dos Fluidos Computacional	32
2.5.1	<i>Etapas para solução numérica</i>	32
3	METODOLOGIA	35
3.1	A construção do receptor	37
3.2	Simulação computacional do receptor	40
3.2.1	<i>Softwares de Simulação</i>	40
3.2.2	<i>Malha computacional e condições de contorno</i>	41
3.2.3	<i>Parâmetros de entrada e variáveis coletadas</i>	44
3.2.4	<i>Equações Governantes</i>	45
3.2.5	<i>Equação da Continuidade</i>	45
3.2.6	<i>Equação da Quantidade de Movimento</i>	46
3.2.7	<i>Equação da Energia Total</i>	46
3.2.8	<i>O modelo k-epsilon</i>	46
3.3	Procedimentos recomendados para futura caracterização experimental	47
4	RESULTADOS	49
4.1	Resultado da construção do receptor solar	49
4.2	Resultados das simulações computacionais	50

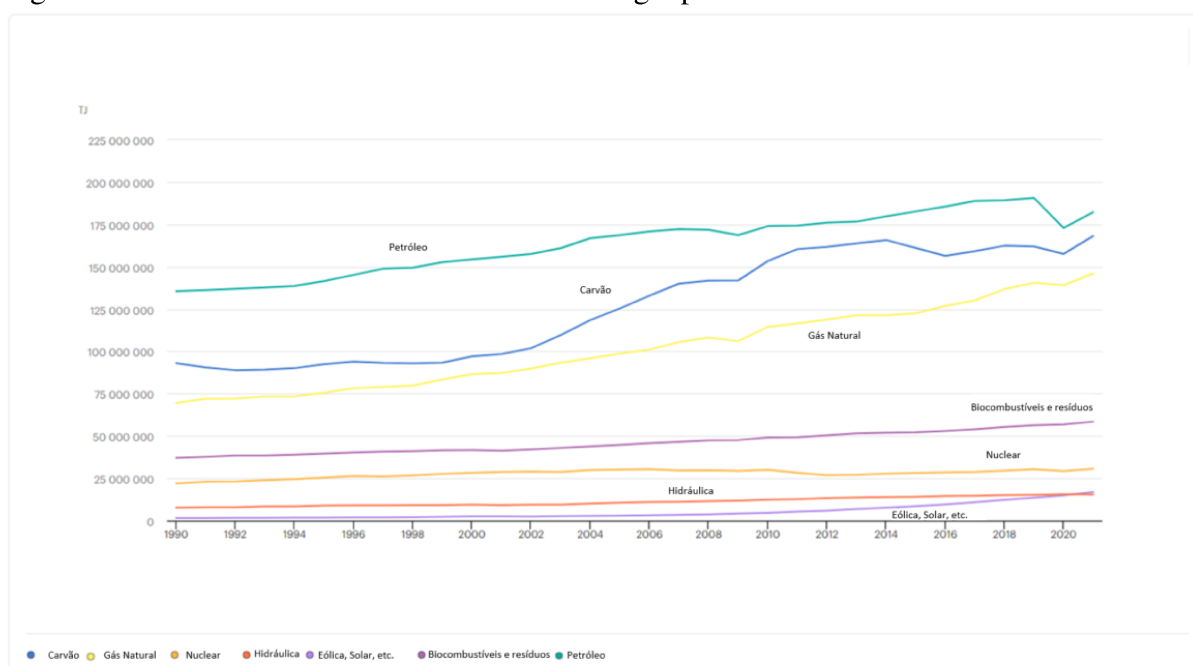
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	54
	REFERÊNCIAS	56
	ANEXO A –PROPRIEDADES DO AR COMO GÁS IDEAL	61

1 INTRODUÇÃO

Com a constante elevação da temperatura do planeta devido ao aumento da emissão de gases do efeito estufa na atmosfera, ações por parte dos governos e instituições não governamentais vêm sendo realizadas, como a criação das metas do Acordo de Paris, que tem por objetivo limitar esse aumento de temperatura mundial a 1,5 °C e reduzir a zero as emissões dos gases CO₂ até metade do século, visando reverter esse quadro. Apesar dos esforços empreendidos, a implantação das tecnologias de transição energética está muito longe dos níveis necessários para alcançar as metas do Acordo de Paris, sendo necessário uma diminuição de 6%, até 2050, o consumo mundial de energia, obtido através do aumento de eficiência energética, bem como o aumento de 16% para 77% o percentual de energias renováveis na matriz energética mundial (IRENA, 2023).

A matriz energética do Brasil está entre as mais renováveis do planeta com um percentual de 47,4%, enquanto os países da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) possuem apenas 11,5%. Das energias renováveis, a hidráulica possui a maior parcela de 12,5% e as energias eólica e solar representam 2,3 %e 1,2%, respectivamente (EPE, 2023). Como é apresentado na Figura 1, as três maiores fontes de energia do mundo em crescente aumento são o Petróleo, Carvão e Gás Natural, o que mostra o tamanho do desafio de alcançar as metas do Acordo de Paris.

Figura 1 – Grafico do Fornecimento total de energia por fonte



Fonte: IEA (2024, com adaptações).

Muitos países estão adotando a energia solar concentrada como alternativa as fontes não renováveis como o EUA, Índia, Austrália, China, Argélia, Itália e Espanha, que em 2013 tinha 2400 MW ligados à rede. Em termos de comparação, um Megawatt de energia solar concentrada deixa de emitir por ano 688 toneladas de CO_2 quando comparado a uma planta movida a gás natural e 1.360 toneladas de CO_2 em relação a uma planta a carvão/vapor (ROMERO; GONZÁLEZ-AGUILAR, 2014). Estima-se que o tempo de retorno de energia pode ser aproximadamente um ano apenas em alguns modelos de concentrador solar (HEATH *et al.*, 2011).

Esta Dissertação tem como objetivo principal simular e desenvolver um receptor solar que recebe irradiação através de um concentrador solar de prato parabólico. Os objetivos específicos foram:

1. O projeto de receptor para CSP que agregue as melhores características já amplamente pesquisada e consolidadas;
 2. A construção de um receptor com capacidade de Absorção de Energia de 2,4 kW e Temperatura de Saída média de 800 °C ;
 3. Simulação computacional do receptor através do ANSYS CFX para refinamento do projeto, com o alcance das variáveis de saída estimadas e comparação com os dados da literatura.
- Há previsão de utilização posterior do CSP, como fonte de calor, para um sistema de reforma a vapor para a produção de hidrogênio verde, para tal, é necessário uma temperatura mínima de 650 °C .

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste capítulo, são apresentados os conceitos que envolvem o tema de Energia Solar Concentrada, principais informações relativas ao receptor solar e aplicações para este tipo de tecnologia.

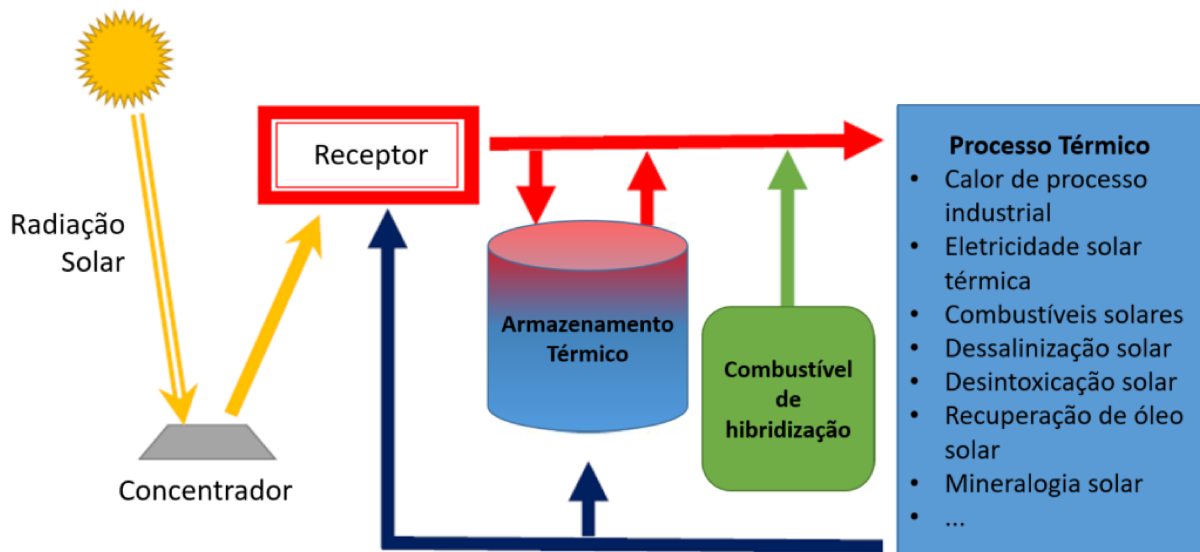
2.1 Definição de Energia solar concentrada

A maior fonte de energia neutra em carbono é a luz solar, a mesma fornece ao planeta Terra em 1 hora mais energia do que a consumida ao longo de um ano. Porém, a eletricidade de origem solar usada é apenas uma fração de 1% do consumo mundial. Para geração de energia de origem solar, há duas classes principais de dispositivos, a energia solar fotovoltaica, que utiliza células solares para gerar energia através do efeito fotoelétrico, e a energia solar concentrada (BARLEV *et al.*, 2011).

De maneira geral, o funcionamento das tecnologias de Energia Solar Concentrada se dá na coleta e concentração da radiação do sol e transformação em energia térmica de alta temperatura (Figura 2). Sendo essa energia térmica utilizada para uma diversidade de aplicações térmicas que necessitam de alta temperatura, como calor de processo, aquecimento e resfriamento, processamento de materiais, processos químicos ou produção de eletricidade. A energia térmica pode também ser armazenada e utilizada posteriormente, maximizando o retorno econômico. Além disso, a mesma pode ser hibridizada com outros combustíveis, sendo utilizadas em processos industriais ou produção de eletricidade ininterruptamente (BLANCO; MILLER, 2017).

Outro uso é na produção de Combustíveis através de ciclos redox termoquímicos (DÄHLER *et al.*, 2018), (MORETTI *et al.*, 2023), uma saída promissora para os setores de transporte marítimo e aviação em longas distância que são extremamente dependentes de combustíveis líquidos, tornando este tipo de transporte mais sustentável (LIDOR *et al.*, 2023). Das atuais emissões antropogênicas que estão causando alterações climáticas, cerca de 5% são devidas a aviação mundial (ZOLLER *et al.*, 2022), esse dado reforça a importância da pesquisa e aplicação dessas novas tecnologias.

Figura 2 – Funcionamento do sistema de energia solar concentrada



Fonte: Blanco e Miller (2017, com adaptações).

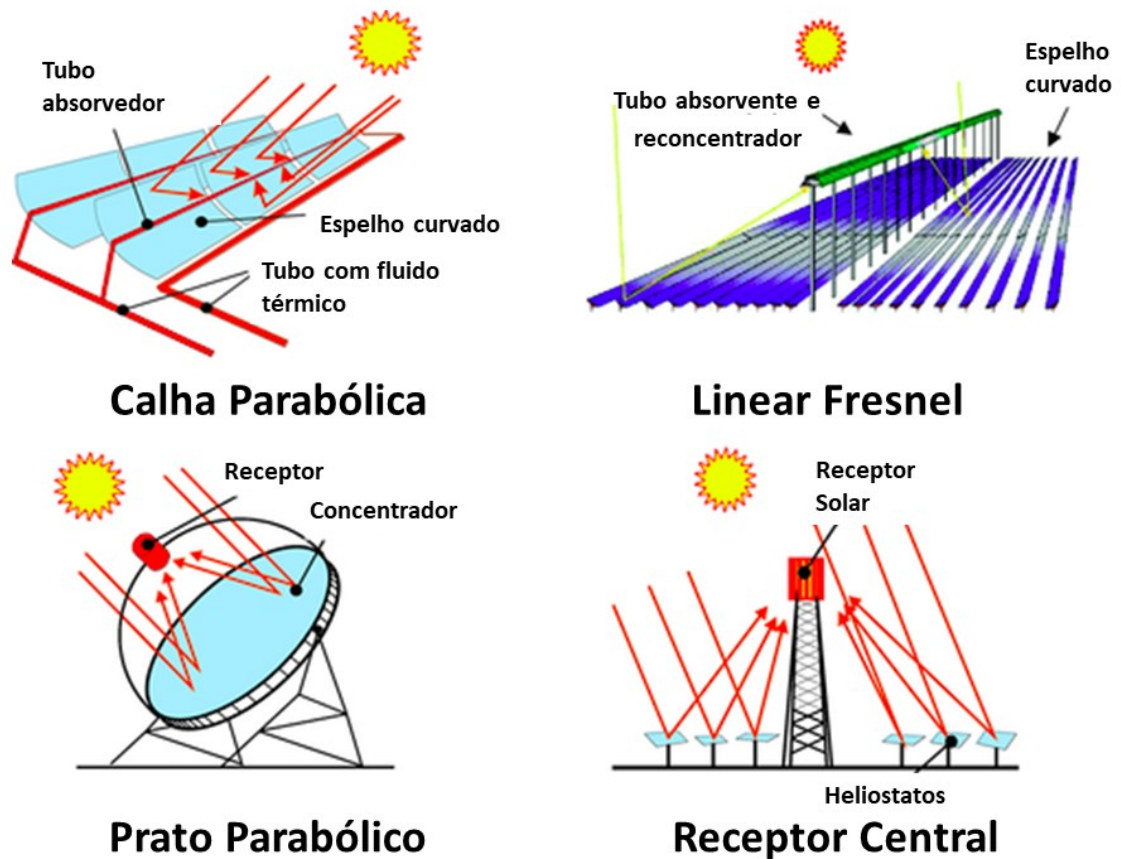
2.2 Tipos de tecnologias de energia solar concentrada

Atualmente, quatro tipos de tecnologias de energia solar concentrada são explorados, tanto comerciais quanto em projetos de pesquisas, como: *Parabolic Trough Collector* (Coletor de Calha Parabólica) (PTC), Refletor Linear Fresnel, Prato Parabólico e Torres de energia ou sistemas receptores centrais (ROMERO; GONZÁLEZ-AGUILAR, 2014). Na Figura 3 mostra um diagrama esquemático dos quatro modelos de CSP abordados, sendo a tecnologia PTC a mais mundialmente estabelecida (ISLAM *et al.*, 2018).

Tendo na década de 1980 os primeiros projetos comerciais implantados, o coletor de calha parabólica (Figura 4) possui um concentrador em formato de calha parabólica com foco linear, que promove a reflexão da radiação solar diretamente em um receptor ou tubo absorvedor que fica posicionado na linha focal da parábola. A radiação solar que incide no tubo é transformada em energia térmica que pode ser utilizada tanto em processos industriais quanto em ciclos Rankine para produção de eletricidade. Atualmente, esta tecnologia consegue fornecer energia térmica útil até 398 °C (MOYA, 2012).

O refletor linear Fresnel (Figura 5) possui grandes fileiras de espelhos que focalizam a luz solar de forma sobreposta em um receptor linear elevado paralelo ao eixo de rastreamento rotacional do refletor. Os refletores são espelhos de vidro com grande distância focal (quase planos) (BARLEV *et al.*, 2011). Como visto, o concentrador solar linear de Fresnel é muito semelhante ao coletor de calha parabólica, porém a natureza plana dos espelhos e a maior facilidade de operação e manutenção, o torna uma tecnologia mais barata que o PTC (MILLS,

Figura 3 – Diagrama esquemático dos quatro modelos de CSP



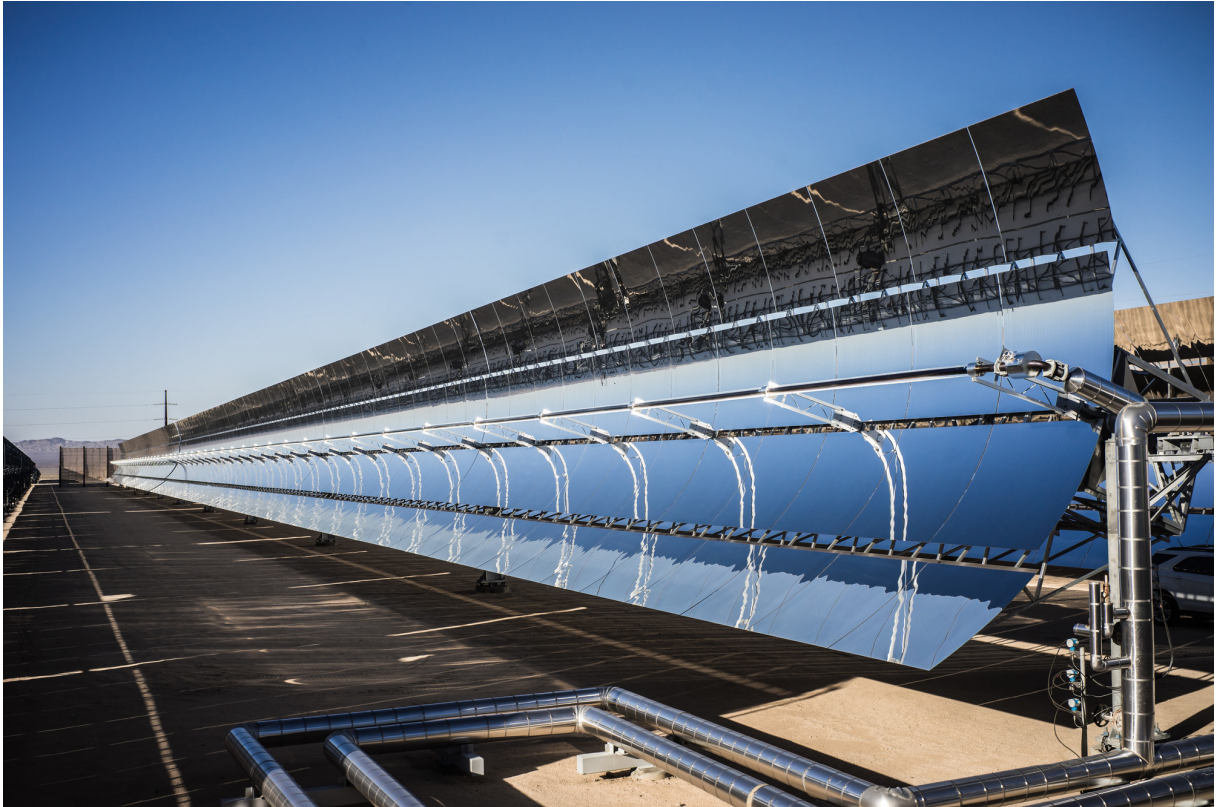
Fonte: Romero e González-Aguilar (2014, com adaptações).

2012).

O Sistema de receptor (torre) central (Figura 6) é a tecnologia mais recente a surgir comercialmente. O mesmo tem como configuração um grande conjunto de espelhos planos distribuídos ao redor de um receptor central instalado no topo de uma torre de 75 a 150 metros de altura. Cada espelho (helióstato) possui uma área de superfície que pode variar de 50 a 150 m^2 , possuindo também um mecanismo de rastreamento solar de dois eixos. Para absorção de calor, é utilizado um fluido que passa pelo receptor central, onde ganha calor para produção e armazenamento de energia (BARLEV *et al.*, 2011).

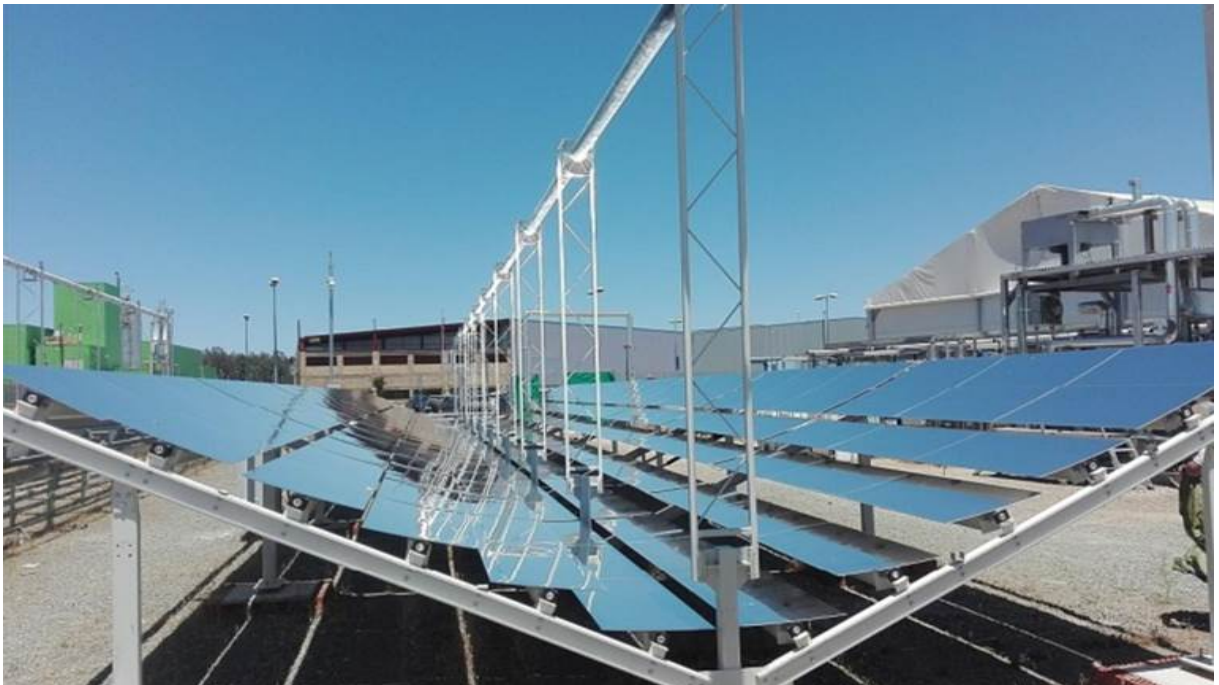
Assim como o sistema de torre central, o concentrador de prato parabólico (Figura 7) possui um foco pontual, possibilitando o mesmo atingir taxas de concentração solares muito altas, atingindo até 1000 sois. Essa tecnologia apresenta um grande prato refletivo com formato parabólico que rastreia o sol em dois eixos de forma a manter a convergência da luz no ponto focal. O calor é coletado através de um receptor instalado no foco da parábola (BARLEV *et al.*, 2011). Este tipo de tecnologia possui as mais altas taxas de concentração, eficiência óptica e eficiência de conversão geral quando comparada as demais tecnologias de concentração solar.

Figura 4 – Concentrador de calha parabólica (California, EUA)



Fonte: Fredriksson *et al.* (2021).

Figura 5 – Concentrador linear Fresnel (Sevilha, Espanha)

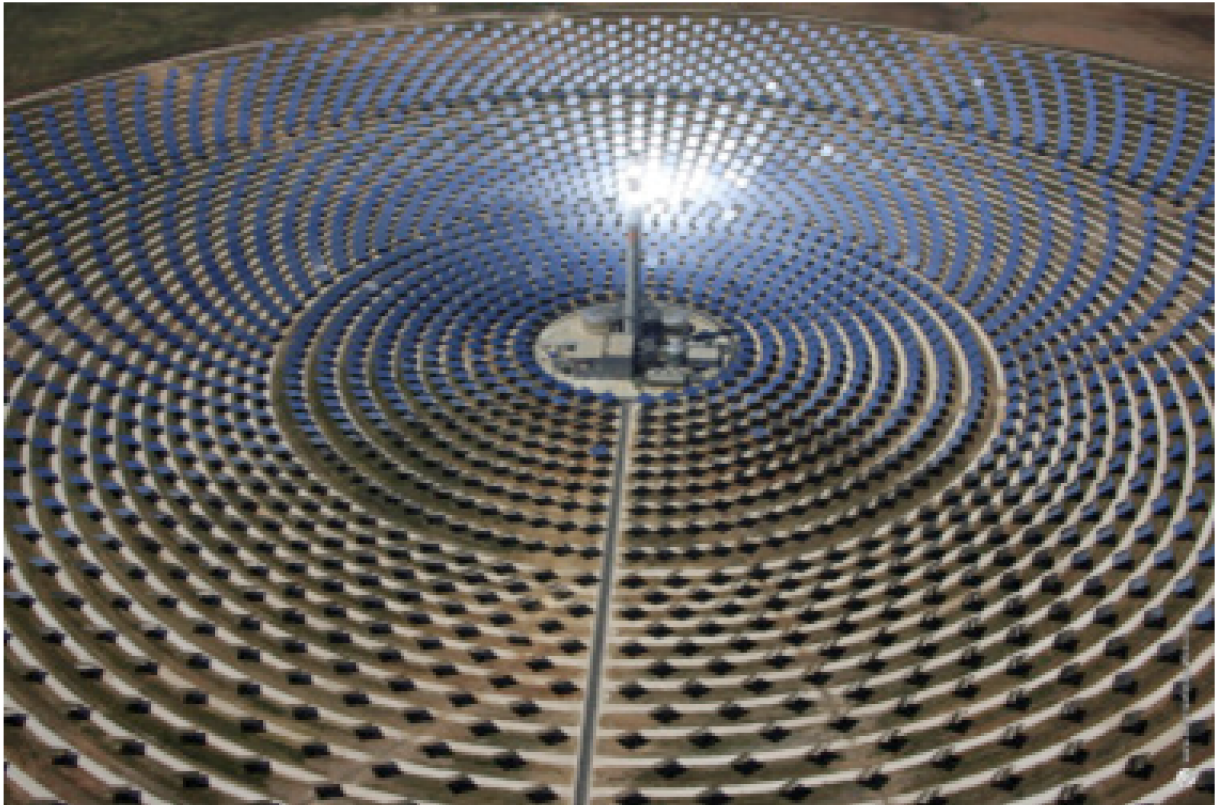


Fonte: Sallaberry e Larrayoz (2024).

O receptor pode enviar a energia absorvida para um motor/gerador (Stirling) ou para fluido de transferência de calor que é encaminhado para uma planta terrestre (SCHIEL; KECK, 2012).

Na Tabela 1, mostra descrição e um resumo das principais especificações das quatro

Figura 6 – Concentrador de torre central (Sevilha, Espanha)



Fonte: Blanco e Miller (2017).

tecnologias CSP, como: eficiência termodinâmica, faixa de temperatura de operação, custo relativo, etc.

Tabela 1 – Descrição e especificações dos quatro principais CSP

Tipo de Concentrador	Descrição	Eficiência termodinâmica relativa	Faixa de Temperatura de operação (°C)	Custo Relativo	Taxa de concentração (sol)	Maturidade Tecnológica	Rastreamento Solar
PTC	Chapa parabólica de material refletivo (alumínio, acrílico) Receptor linear (tubo metálico com fluido de transferência de calor)	Baixa	50 - 400	Baixo	15 - 45	Muito madura	Um eixo
Linear Fresnel	Série de espelhos lineares de Fresnel focados em uma torre ou em tubo montado alto com receptor	Baixa	50 - 300	Muito baixo	10 - 40	Madura	Um eixo
Torre solar	Grande campo de helióstatos com torre alta no centro - Receptor: caldeira no topo - Pode ser usado para armazenamento térmico contínuo	Alta	300 - 2000	Alto	150 - 1500	Mais recente	Dois eixos
Prato Parabólico	Grande prato parabólico reflexivo com receptor no ponto focal	Alta	150 - 1500	Muito Alto	100 - 1000	Recente	Dois eixos

Fonte: Barlev *et al.* (2011, com adaptações).

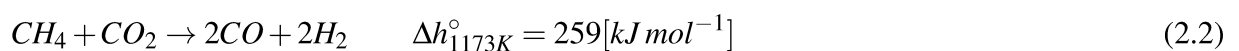
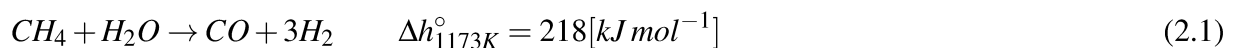
Figura 7 – Concentrador de Prato Parabólico (Suíça)



Fonte: Dähler *et al.* (2018).

2.3 Energia solar concentrada para produção de hidrogênio

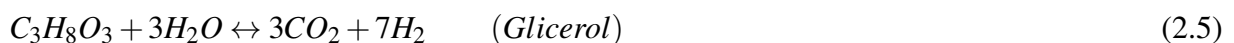
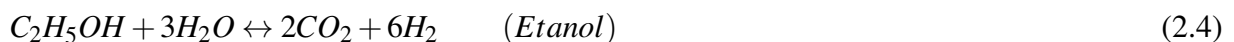
O hidrogênio é um vetor de energia que vem ganhando bastante destaque ultimamente. Atualmente, o processo de produção de hidrogênio mais utilizado é através da reforma a vapor do gás natural (ALFRADIQUE *et al.*,) que é um combustível de origem fóssil. O processo de reforma do gás natural segue as seguintes equações:



Conhecidas como úmida (Equação 2.1) e seca (Equação 2.2), sendo a reforma úmida utilizada nas atuais plantas industriais a uma temperatura entre 700 e 900 °C (BULFIN *et al.*, 2021).

Porém, para alcançar seus objetivos de uma matriz energética mais limpa, os países estão em uma busca ativa por alternativas por energias limpas e sustentáveis. A energia que vem ganhando amplo reconhecimento é o hidrogênio verde, que recebe esse nome quando é derivado de fontes de energia renováveis, como é o caso da energia solar concentrada em conjunto com biocombustíveis. Em combinação com o oxigênio, a combustão do hidrogênio acaba produzindo água e liberando calor sem emitir CO_2 . O mesmo, em comparação com a eletricidade renovável ligada da rede, é transportável com mais flexibilidade por grandes distâncias e armazenável por longos períodos de tempo com mínimas perdas, vem sendo definido como o combustível do futuro (UNIDO *et al.*, 2023).

Outras formas de obter hidrogênio são através do processo de reforma a vapor utilizando metanol (WANG *et al.*, 2017), (LI *et al.*, 2015), (GAO *et al.*, 2023), Etanol (DENG *et al.*, 2023),(CARVALHO *et al.*, 2016), Glicerol (WANG *et al.*, 2013),(DIAS *et al.*, 2021),(SAD *et al.*, 2015), entre outros. A energia solar concentrada fornece o calor necessário para reação de reforma e obtenção do hidrogênio. Seguem abaixo as equações que representam o processo de reforma a vapor:

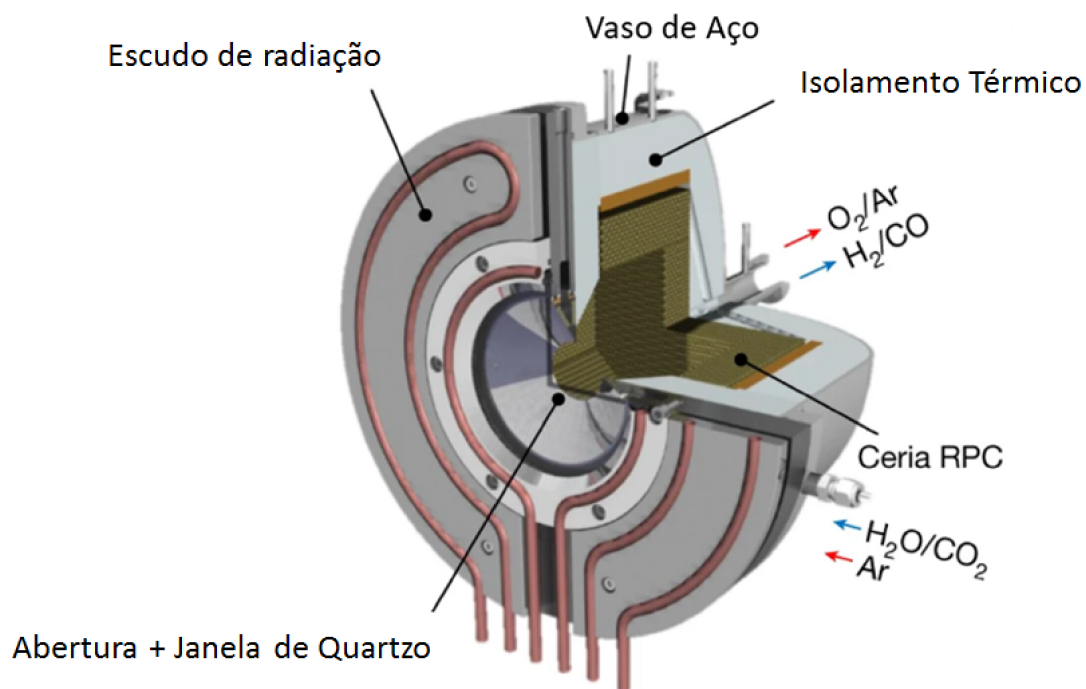


2.4 Receptor

Como visto anteriormente, o receptor do CSP é o equipamento que fica localizado no ponto focal do concentrador solar, possuindo duas funções: absorver o máximo de irradiação solar que é refletida pelo concentrador e transferir esta energia absorvida na forma de calor para o fluido de trabalho (SCHIEL; KECK, 2012). Na Figura 8, é apresentado um modelo de Receptor Solar.

Nesta seção são apresentados vários aspectos do receptor solar, como: configuração geométrica, material, morfologia, fabricação, fluido de trabalho, pressão e temperatura de operação e indicador de desempenho.

Figura 8 – Modelo de Receptor Solar

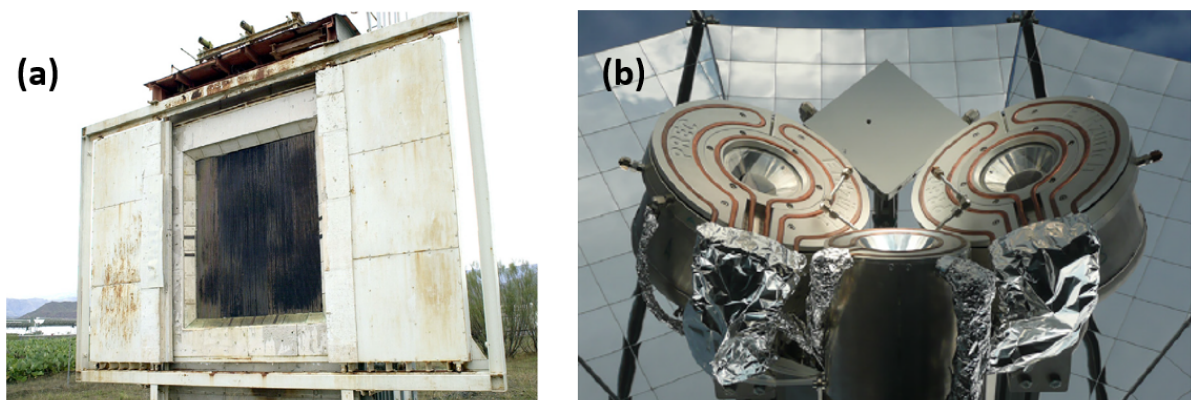


Fonte: Lidor *et al.* (2023, com adaptações).

2.4.1 Configuração geométrica

Referente ao aspecto geométrico dos receptores, existem basicamente dois tipos: receptores de cavidade e externos. Na Figura 9, são mostrados um receptor solar do tipo externo (a) e do tipo cavidade (b).

Figura 9 – Tipos de receptor quanto a configuração geométrica. Receptor solar do tipo: (a) Externo, (b) Cavidade



Fonte: (a) Romero e González-Aguilar (2017) e (b) Dähler *et al.* (2018)

No modelo de cavidade, a radiação solar vinda da superfície refletora passa através de uma abertura em um dispositivo em forma de caixa antes de colidir com a superfície de

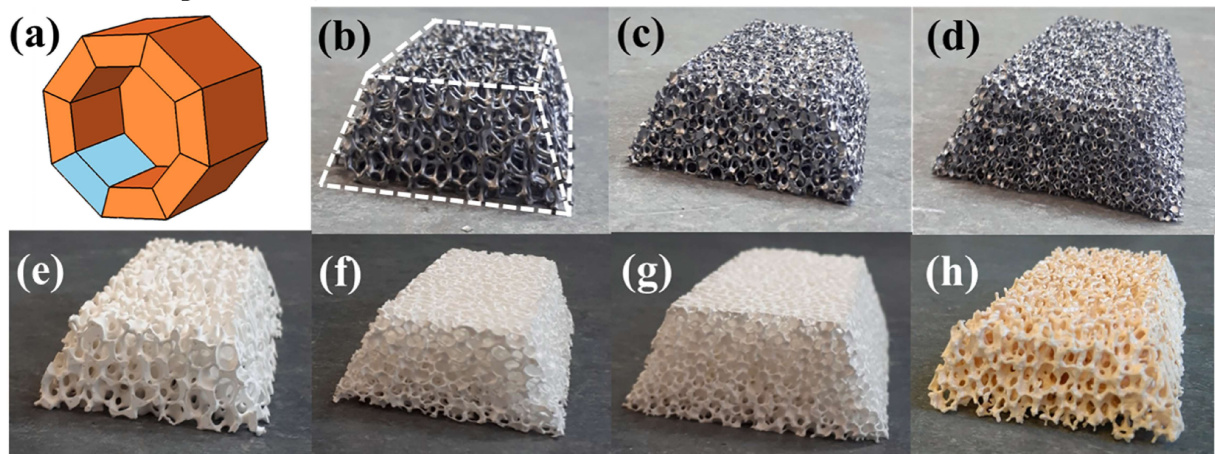
troca térmica. Já os receptores do tipo externo são geralmente projetados em formato tubular ou cilíndrico, sendo o último mais usado em para campos helióstatos circundantes. (ROMERO; GONZÁLEZ-AGUILAR, 2017).

2.4.2 Material do receptor

Quanto ao material, os receptores volumétricos se dividem em metálicos e cerâmicos. Sendo os receptores metálicos considerados boas opções quando as aplicações exigem até 900 °C. Já para aplicações que exigem temperaturas acima de 1000 °C são indicados receptores cerâmicos (PATIL *et al.*, 2021).

Dentre os materiais cerâmicos, alguns exemplos estudados são o carboneto de silício infundido com silício (*SiSiC*), alumina (Al_2O_3) e céria (CeO_2), os materiais citados são mostrados na Figura 10 na forma de tijolos de RPC trapezoidais. A absorvidade e condutividade térmica são relativamente altas no SiSiC, tendo a alumina essas duas propriedades significativamente menor quando comparadas ao SiSiC. No caso da céria, a absorvidade superficial é alta, mas condutividade térmica é menor em comparação a da alumina (PATIL *et al.*, 2021).

Figura 10 – (a) Esquema 3D da cavidade RPC com um dos tijolos RPC trapezoidais destacados em azul. Fotografia de um tijolo RPC trapezoidal de sete tipos de materiais diferentes: (b) SiSiC 10PPI (linhas brancas tracejadas delineando a forma trapezoidal), (c) SiSiC 20 PPI, (d) SiSiC 30 PPI, (e) alumina 10 PPI, (f) alumina 20 PPI, (g) alumina 30 PPI, (h) ceria 10 PPI. (PPI é a densidade de poros, PPI)

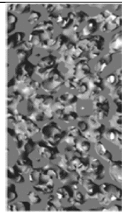
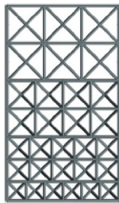
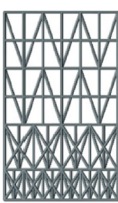
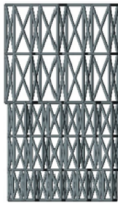








Fonte: Patil *et al.* (2021)

2.4.3 A morfologia dos receptores cerâmicos

Alguns formatos dos receptores cerâmicos já testados anteriormente são estruturas RPC (WANG *et al.*, 2020), estruturas ordenadas fabricadas aditivamente (HOES *et al.*, 2019) e favos de mel monolíticos (LI; ZHANG, 2020). Na Tabela 2, são mostradas imagens e parâmetros morfológicos das estruturas de céria porosa, bem como vistas laterais feitas por *Computer Aided Design* (Desenho Assistido por Computador) (CAD).

Tabela 2 – Fotografias e parâmetros morfológicos das estruturas de céria porosa ordenada e RPC

Nome	RPC	Cubo	Pirâmide	Favo de mel	Ranhura em V
Vista lateral do CAD (radiação incidente vista de cima)					
Fotografia após sinterização					
Massa [g]	25,8-31,4	25,2-29,2	26,5-35,2	32,2-52,8	29,2-41,9
Dimensões [mm]	45 x 27 x 27	46 x 27 x 27	44 x 27 x 27	46 x 29 x 26	44 x 27 x 27
Densidade aparente [gcm^{-3}]	0,87	0,83	0,91	0,99	1,00
Área específica da superfície [mm^2mm^{-3}] (excluindo poros em microescala)	1,2	0,7	0,5	1,0	0,7

Fonte: Hoes *et al.* (2019, com adaptações).

Uma característica importante das estruturas RPC é a porosidade e o tamanho médio de poros, que afetam a transferência de calor por radiação e convecção. Na literatura, é de consenso de quanto maior a porosidade, maior a eficiência do receptor (PATIL *et al.*, 2021).

A RPC demonstra ser o tipo de maior eficiência (PARTHASARATHY; CLERCQ, 2015). A estrutura RPC apresenta uma melhor transferência de calor convectiva sólido-fluido e eficiente absorção volumétrica (PATIL *et al.*, 2021), sendo a mesma uma das opções mais promissoras quando se fala em aplicações industriais (ZHANG *et al.*, 2022). Um concentrador com RPC foi testado para conversão de energia solar em combustível e foi alcançada uma eficiência quatro vezes maior do que o concentrador solar com o valor de eficiência mais próximo (FURLER *et al.*, 2012).

2.4.4 A fabricação da cavidade RPC

Para fabricação dos tijolos RPC cerâmicos (Figura 10), um método amplamente utilizado é o de replicação de esponja polimérica (Figura 11), que prover uma rede tridimensional de escoras e poros interligados. O método consiste em revestir uma esponja de Poliuretano (PU), realizando o mergulho da mesma em uma suspensão cerâmica diluída, ou seja, uma impregnação da esponja. Esta suspensão cerâmica é composta por diversas substâncias que são misturadas até a homogeneização em um misturador de alto cisalhamento por 1 hora, como mostrado na Tabela 3. Após a impregnação, a esponja é comprimida por rolos de forma a garantir o preenchimento das células vazias com a suspensão e, também, remover o excesso da suspensão cerâmica. Em seguida, é realizado revestimento com uma fina camada de suspensão de baixa viscosidade e, posteriormente, a esponja passa por um processo de secagem a 110 °C por 15 minutos. Na etapa final, ocorre a queima da esponja e sinterização do material cerâmico (SALVINI *et al.*, 2019).

Tabela 3 – Matérias-primas utilizadas na preparação de suspensão cerâmica

Matérias-primas	Suspensão cerâmica (% em peso)
Alumina calcinada (CL370C)	73,1
Alumina reativa (CT3000SG)	6,0
Sílica coloidal (Bindzil 1440)	10,0
Dispersante (Castament [®] FS20)	0,2
Rhodopol [®] 23	0,3
Álcool polivinílico (sol. 0,2%)	0,2
Água destilada	10,0
Silicone	0,2

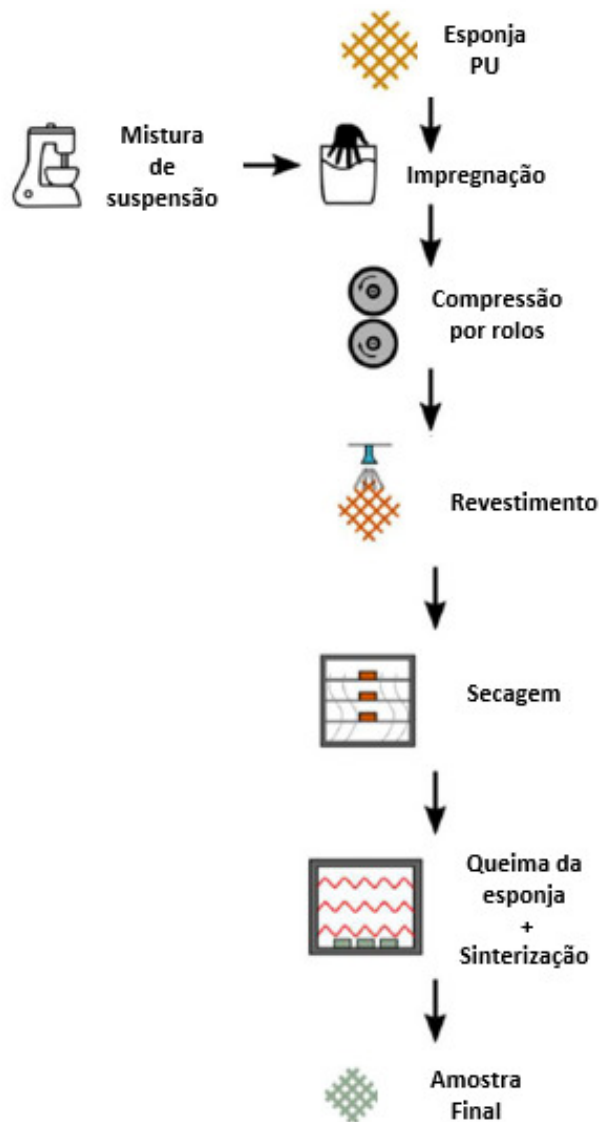
Fonte: Salvini *et al.* (2019, com adaptações).

2.4.5 Fluido de trabalho

Os fluidos utilizados para transferência de calor em geral são água/vapor, sódio líquido, sal fundido e ar (ROMERO; GONZÁLEZ-AGUILAR, 2017). As faixas de temperatura e fluxo de radiação podem ser vistos na Tabela 4.

O ar pode possuir um grande potencial, mas por sua baixa taxa de transferência de calor, não é indicado para receptores tubulares (ROMERO; GONZÁLEZ-AGUILAR, 2017). Caso o sistema não tenha restrição a atmosfera oxidante, o ar como fluido de transferência de calor se torna uma boa opção. As vantagens da utilização do ar é que o mesmo é seguro, estável, abundante, barato e amigável ao meio ambiente (PATIL *et al.*, 2021).

Figura 11 – Etapas do processo convencional para preparação de cerâmica RPC



Fonte: Salvini *et al.* (2019, com adaptações).

Tabela 4 – Temperatura operacional e faixas de fluxo de receptores de torre solar

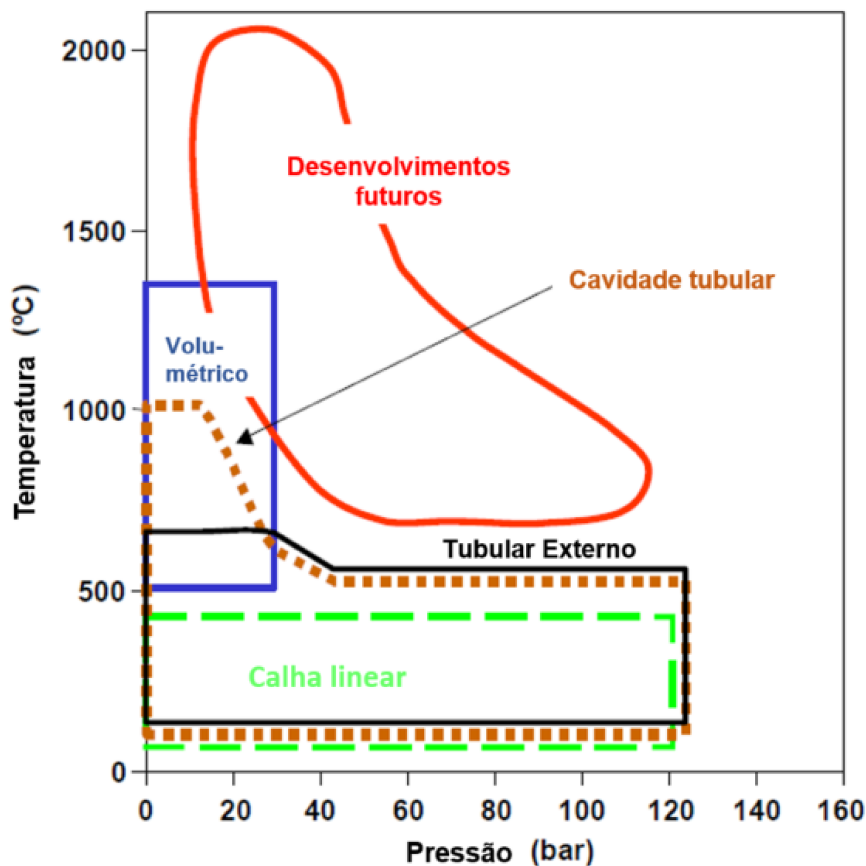
Fluido	Água/vapor	Sódio líquido	Sal fundido (nitratos)	Ar volumétrico
Fluxo (MW/m^2)				
Média	0,1 - 0,3	0,4 - 0,5	0,4 - 0,5	0,5 - 0,6
Pico	0,4 - 0,6	1,4 - 2,5	0,7 - 0,8	0,8 - 0,1
Temperatura de saída do fluido ($^{\circ}C$)	490 - 525	540	540 - 565	700 - 1000

Fonte: Romero e González-Aguilar (2017, com adaptações).

2.4.6 Pressão e temperatura de operação

Em relação à pressão operacional do ar, eles podem ser pressurizados ou atmosféricos. O primeiro se caracteriza pode ser utilizado em um ciclo Brayton (SEDIGHI *et al.*, 2019). Obviamente o absorvedor deve ser fechado e a radiação incide através de uma janela, que deve atenuar minimamente os raios solares, bem como deve resistir bem as altas temperaturas (KAMI *et al.*, 1998), (RöGER *et al.*, 2006), (AMBROSETTI; GOOD, 2019). O segundo utiliza o ar atmosférico que flui através das estruturas porosas ganhando calor por convecção (PATIL *et al.*, 2021). Em termos de temperatura, os receptores operam na faixa de 500 °C a 1200 °C, podendo alcançar uma densidade de fluxo de 300 até acima de 1000 kW/m^2 . Uma visão mais abrangente pode ser vista na Figura 12, onde se percebe que os modelos tubulares permitem alcançar altas temperaturas ou altas pressões, mas não ambas. Já os absorvedores volumétricos alcançam temperaturas mais altas, porém com pressões limitadas (ROMERO; GONZÁLEZ-AGUILAR, 2017).

Figura 12 – Faixa de operação de receptores tubular, volumétrico e novos avanços



Fonte: Romero e González-Aguilar (2017, com adaptações).

2.4.7 Indicador de desempenho

Para avaliação do desempenho térmico de um receptor solar o indicador mais importante é o de eficiência térmica, $\eta_{receptor}$. O mesmo apresenta uma medida da quantidade de energia da radiação solar incidente se converte em calor sensível do fluido, no caso o ar ambiente, ou seja, a eficiência é calculada pela razão entre o ganho de entalpia do fluido que passou pelo receptor e a energia solar incidente (PATIL *et al.*, 2021):

$$\eta_{receptor} = \frac{\dot{m}_{ar} \int_{T_{ar,entrada}}^{T_{ar,saída}} c_p(T) dT}{P_{solar}} = \frac{\dot{m}_{ar} [h(T_{ar,saída}) - h(T_{ar,entrada})]}{P_{solar}} \quad (2.6)$$

Onde,

\dot{m}_{ar} - vazão mássica de ar (kg/s)

$T_{ar,saída}$ - temperatura do ar de saída (K)

$T_{ar,entrada}$ - temperatura do ar de entrada (K)

$c_p(T)$ - calor específico do ar dependente da temperatura ($J/kg \cdot K$)

$h(T_{ar,entrada})$ - entalpia do ar de entrada (kJ/kg)

$h(T_{ar,saída})$ - entalpia do ar de saída (kJ/kg)

P_{solar} - energia solar incidente (W)

A energia solar incidente P_{solar} é calculada pela seguinte equação:

$$P_{solar} = A_c \cdot DNI \cdot \eta_{ótica} \quad (2.7)$$

Onde,

A_c - área do concentrador (m^2)

DNI - Irradiância Direta Normal (W/m^2)

$\eta_{ótica}$ - eficiência ótica do concentrador

A energia absorvida Q é calculada pela seguinte equação:

$$Q = \dot{m}_{ar} [h(T_{ar,saída}) - h(T_{ar,entrada})] \quad (2.8)$$

Os valores das entalpias podem ser definidas através dos valores das temperaturas do fluido de trabalho utilizando uma tabela de propriedades do ar como gás ideal (Anexo A).

2.5 Dinâmica dos Fluidos Computacional

Através de simulação baseada em computador, a Dinâmica dos Fluidos Computacional (DFC) analisa sistemas envolvendo fluxos de fluidos, transferência de calor e fenômenos associados, como é o caso de reações químicas. A mesma é uma técnica bastante poderosa que é amplamente utilizada em diversas aplicações desde aerodinâmica de aeronaves e veículos até engenharia biomédica, onde se estuda o fluxo de sangue através de artérias e veias (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007). A DFC tem como objetivo básico a redução do número de experimentos e a exploração de fenômenos que, de forma prática, não poderiam ser estudados em laboratório (FORTUNA, 2000).

Um item relevante na escolha pela utilização da tecnologia DFC é o custo de aquisição do hardware e software. Apesar de os custos para aquisição dos mesmos para utilização de DFC não serem pequenos, geralmente esses custos costumam ser menores quando comparados a uma instalação experimental de alta qualidade (VERSTEEG; MALALASEKERA, 2007).

Outras vantagens da simulações de DFC em relação ao projetos experimentais são:

- a) Redução significativa dos custos e prazos de entrega de novos projetos;
- b) Capacidade de estudar sistemas o onde experimentos controlados tem dificuldade ou impossibilidade de execução;
- c) Estudo de sistema sob condições perigosas;
- d) Detalhamento de resultados praticamente ilimitado.

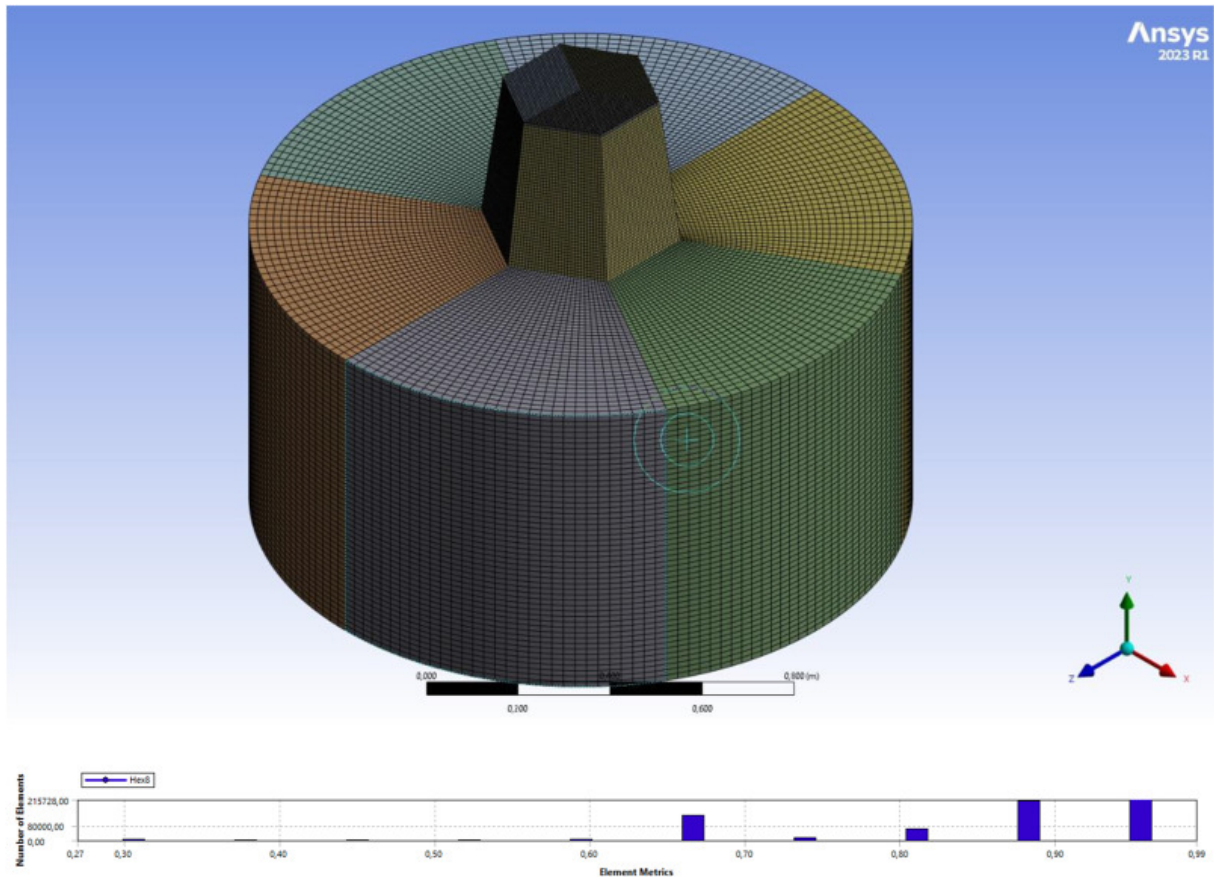
2.5.1 Etapas para solução numérica

Inicialmente, deve-se modelar a física do problema, onde na modelagem determina-se quais grandezas físicas atuam sobre o sistema físico e como elas o afetam. Um modelo é elaborado a partir da aplicação de princípios físicos, descritos por leis de conservação adequadas ao fenômeno com é o caso da conservação de massa, momento e energia. Equações que relacionam as grandezas relevantes entre si expressão os modelos resultantes, podendo os mesmos ser utilizados para explicar e prever o comportamento do sistema sobre diferentes situações (FORTUNA, 2000).

Dado a impossibilidade de obter soluções numéricas sobre uma região contínua devido aos infinitos pontos da mesma, inicialmente o domínio é discretizado, ou seja, dividido em pontos. Apenas nesses pontos é que as soluções serão obtidas. Este conjunto dos pontos é

chamado de malha (Figura 13). É intuitivo perceber que quanto maior for o número de pontos discretos, ou seja, quanto mais fina for a malha, mais fidedigno ao modelo será o resultado numérico alcançado. Consequentemente, maior será também o custo computacional. Em se tratando da DFC, busca-se normalmente uma solução numérica que seja independente da malha, em outras palavras, uma solução que não se modifica, dentro de algum critério de tolerância quando ocorre o refinamento da malha (FORTUNA, 2000).

Figura 13 – Malha computacional



Fonte: Cheilytko e Schwarzbözl (2024)

Na sequência, os termos que surgem nas equações são escritos em função dos valores das incógnitas em pontos discretos adjacentes. Logo, o resultado é um conjunto de equações algébricas. Nesta etapa do processo, são introduzidas as condições de contorno do problema, que juntamente às condições iniciais, os parâmetros do escoamento e as propriedades físicas do fluido especificam o problema a ser tratado (FORTUNA, 2000).

As equações algébricas então são resolvidas, apresentando a solução do problema, que deve ser analisada para verificar se está correta. Com a comparação dos resultados da simulação com os dados dos experimentos, pode-se ajustar o modelo matemático até que o

mesmo reflita a física do problema (FORTUNA, 2000). Na Figura 14 é apresentado um resumo das etapas citadas anteriormente. O modelo matemático adotado deve possuir uma capacidade de dar respostas em um tempo computacional não-proibitivo, bem como os resultados obtidos sejam bem representativos do fenômeno físico em questão (MALISKA, 1995).

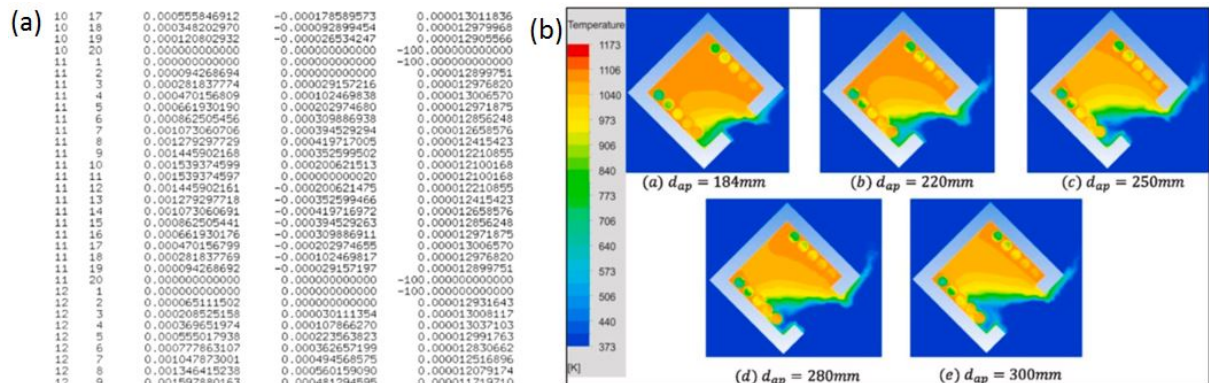
Figura 14 – Etapas para a obtenção da solução numérica de um problema de fluidos



Fonte: Fortuna (2000)

A geração de centenas de megabytes de dados pelas simulações numéricas de escoamento de fluidos ocasionam uma necessidade de interpretação. Esses resultados na forma de lista, como apresentado na Figura 15(a), torna incompreensível para as pessoas. A melhor maneira de conseguir informações desses dados é utilizando técnicas de visualização científica: apresentando de forma gráfica, como na Figura 15(b), as várias propriedades dos escoamento, como: pressão, campos de velocidade, temperatura, entre outras. Tendo assim, o objetivo de facilitar a compreensão dos processos que ocorrem no escoamento (FORTUNA, 2000).

Figura 15 – Formas de apresentação de resultados de simulação numérica. (a) Formato de lista e (b) Visualização gráfica

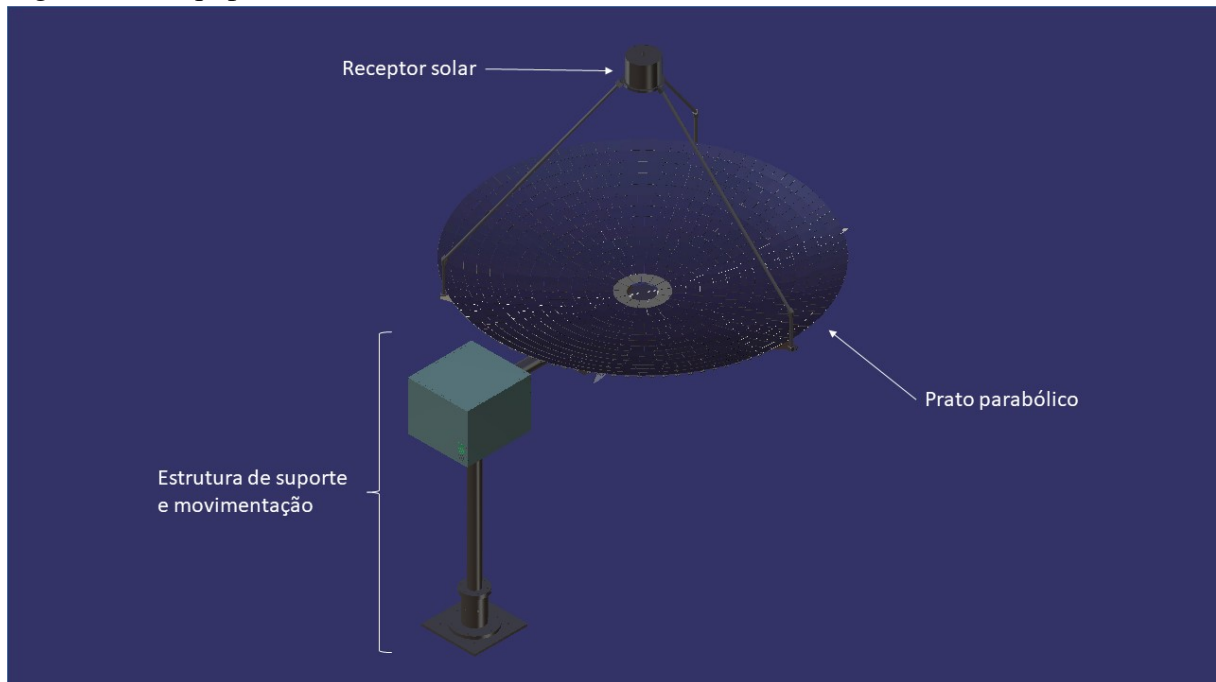


Fonte: Fortuna (2000) e Abed *et al.* (2024)

3 METODOLOGIA

O equipamento CSP pode ser dividido em 03 partes principais: o prato parabólico, a estrutura de suporte e movimentação e o receptor solar (Figura 16). De uma forma geral, a seguir é descrita a construção e o funcionamento desses componentes, com ênfase no receptor solar.

Figura 16 – Equipamento CSP



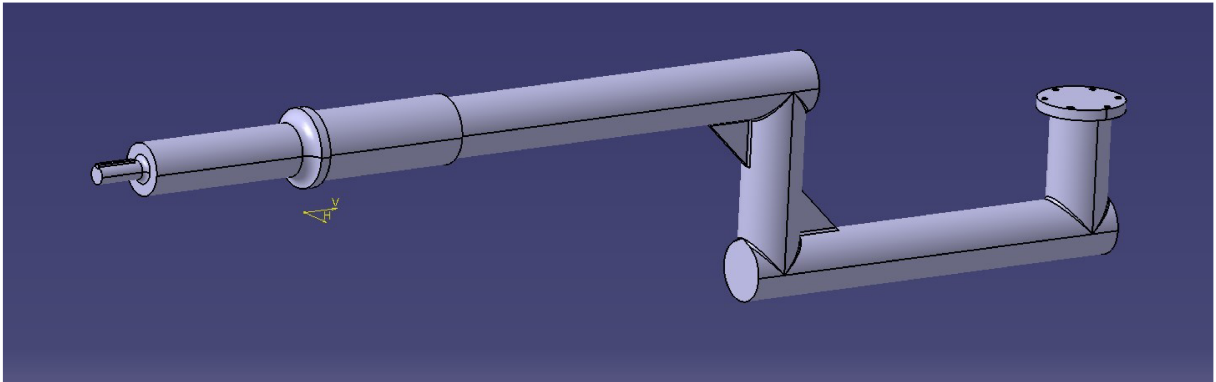
Fonte: elaborada pelo autor.

Foi utilizado neste trabalho, um prato em formato parabólico de 3 metros de diâmetro. O mesmo foi projetado para ser fabricado em fibra de vidro, sobre um molde de Poliuretano, e suportado por uma estrutura de alumínio.

Possui superfície refletiva de lâmina de alumínio com alta refletância. A escolha da lâmina ao invés de espelhos, foi pela maior adaptabilidade a superfície paraboloide e resistência a intempéries. Os espelhos convencionais são produzidos com uma camada de prata que oxidada rapidamente quando exposto a ambientes externos. Outro ponto a ser considerado, é que as reservas de prata estão cada vez mais escassas, devido a este fator, estudos estão sendo realizados para substituir este metal por alumínio e outros materiais mais abundantes e com baixo custo em concentradores solar (GROSJEAN *et al.*, 2021).

A estrutura que suporta o conjunto prato parabólico e receptor é constituída por um braço (Figura 17) formado por uma estrutura de tubos de aço de 4" soldados e reforçados por nervuras.

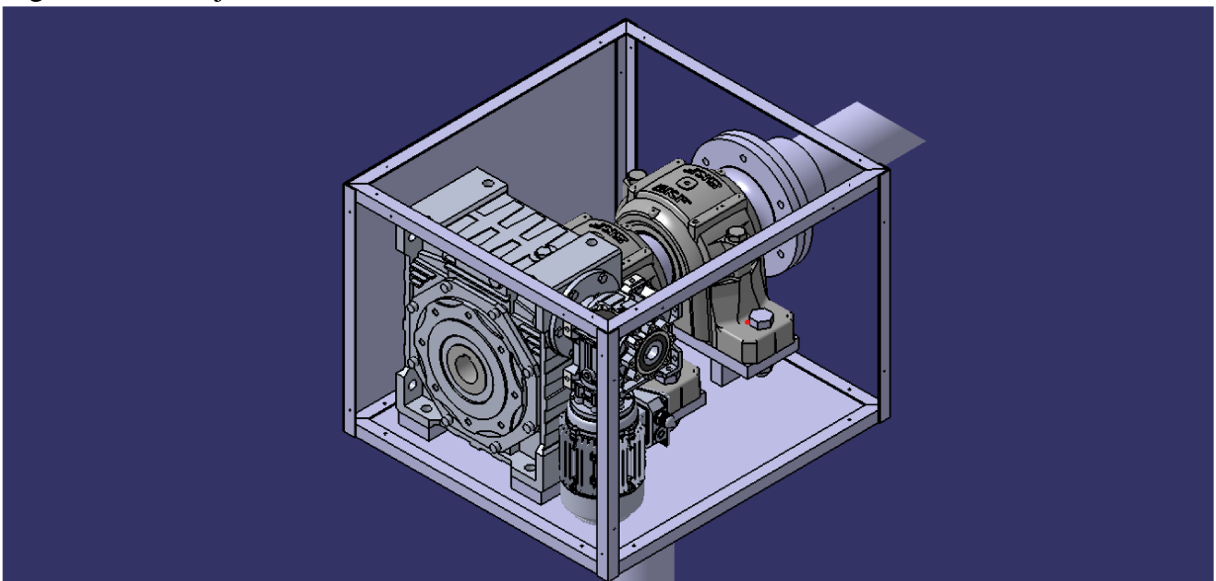
Figura 17 – Braço do concentrador



Fonte: elaborada pelo autor.

Em uma extremidade do braço é conectado o concentrado solar e na outra é soldado um eixo que se conecta a um conjunto motoredutor (Figura 18) com potência de 0,5 cv e redução de 1 : 4000. Este eixo é apoiado por dois mancais. Devido a junção de tensão axial e radial no eixo, foram selecionados rolamentos autocompensadores.

Figura 18 – Conjunto motoredutor e mancais



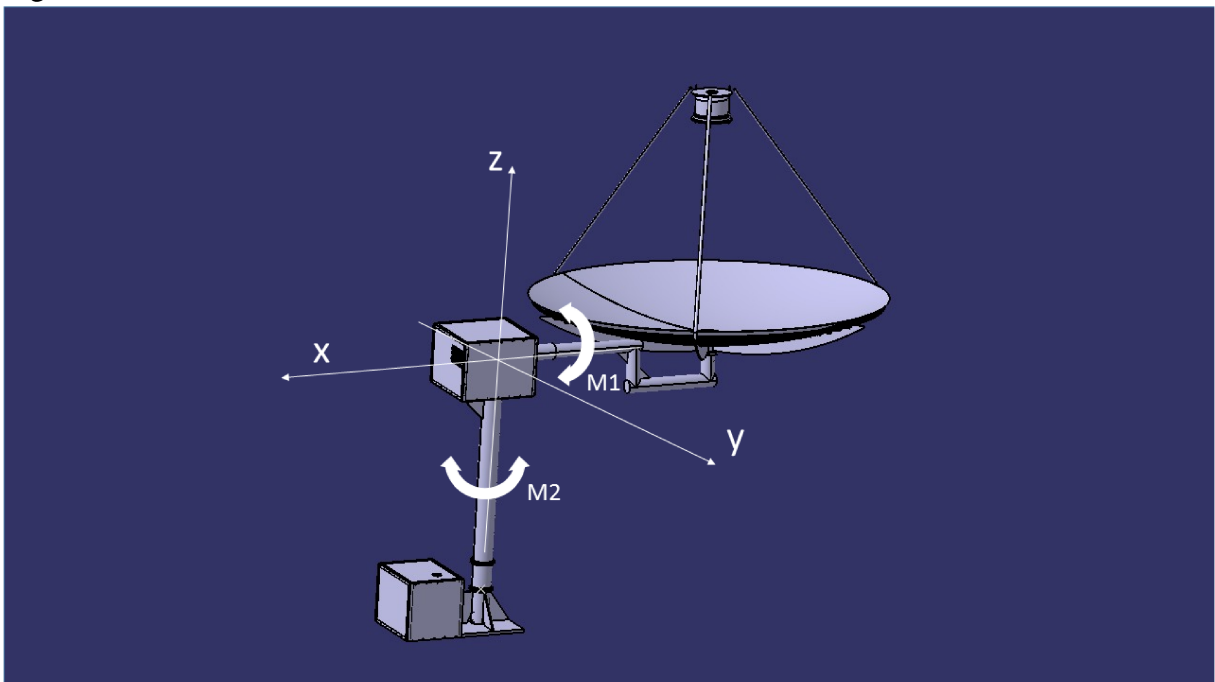
Fonte: elaborada pelo autor.

Todo o conjunto é suportado por uma base estrutural, que possui um comprimento que permite liberdade de movimentação da parte superior do concentrador. A mesma possui basicamente tubos de 4" de aço 1045, divididos em duas partes de modo que um gire sobre o outro, possibilitando o giro do concentrador em torno de um eixo vertical.

O concentrador deve se mover de forma que os raios solares estejam sempre perpendiculares ao plano que intercepta todo o perímetro do prato parabólico. Esses movimentos são promovidos pelos dois conjuntos de motoredutores, um Movimento em torno do eixo Z

(M1) e outro Movimento em torno de um eixo no plano XY (M2) (Figura 19). A informação de qual posição o concentrador deve estar é dada por um sistema de rastreamento solar, ainda não projetado. De forma geral, quando o sol for se movimentando ao longo do dia, o sistema de rastreamento identifica essa movimentação e instantaneamente corrige a posição do prato parabólico através dos dois sistemas de movimentação. Assim, o sistema tende a sempre ficar posicionado onde ocorre a maior irradiação solar.

Figura 19 – Movimentos do concentrador



Fonte: elaborada pelo autor.

3.1 A construção do receptor

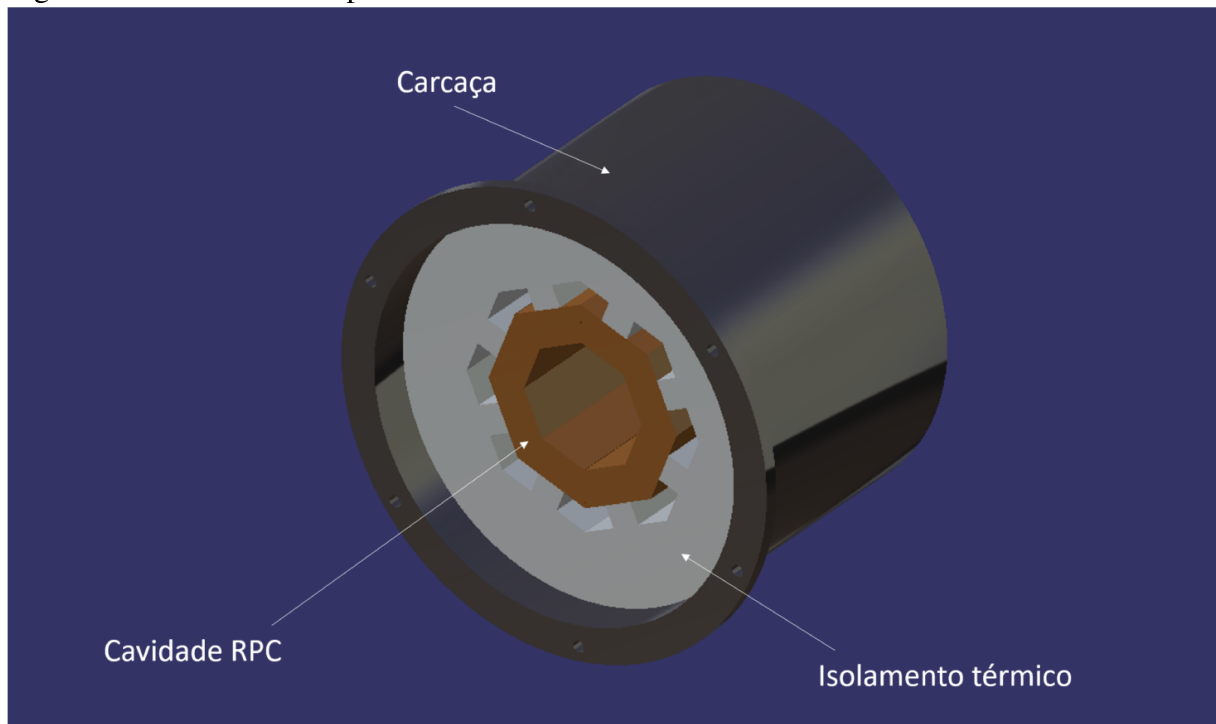
O receptor solar foi dimensionado com as seguintes características:

- a) A configuração geométrica do tipo cavidade;
- b) O material da cavidade cerâmica de alumina (Al_2O_3);
- c) A morfologia RPC;
- d) Ar ambiente como fluido de trabalho;
- e) Fluido com pressão atmosférica.

O receptor possui três partes principais, são elas: uma carcaça, um isolamento térmico e uma cavidade RPC, conforme indicado na Figura 20.

O dimensionamento do receptor solar tomou como referência as dimensões apresen-

Figura 20 – Partes do receptor solar



Fonte: elaborada pelo autor.

tadas no trabalho do Patil *et al.* (2021) e adaptadas para os materiais comercialmente disponíveis e também pensando na simplificação da construção do mesmo. A carcaça possui um corpo de 264,67 mm de diâmetro interno, 4,19 mm de espessura de parede, 203 mm de comprimento e material inox 304L, fabricado através da aquisição e usinagem de um tubo 10" Schedule 10. Na parte frontal existe um par flanges de 313,06 mm de diâmetro, 10 mm espessura, 08 furos de 07 mm e material inox 304L, fabricado pelo corte de chapa a laser. Na parte posterior, tampa com 273,05 mm de diâmetro, 10 mm de espessura e material inox 304L, confeccionada por corte de chapa a laser. Conectado a tampa posterior existe um tubo de 27.86 mm de diâmetro interno, 2.77 mm espessura e material inox 304L (Figura 21).

O flange externo possui uma abertura central para entrada dos raios solares vindos do concentrador. Essa abertura é de 60 mm de diâmetro na face externa e vai reduzindo a um ângulo de 45° até 40 mm de diâmetro na face interna do flange, esta abertura foi realizada pelo processo de usinagem em torno convencional. Já o flange interno, possui diâmetro interno de 264,67 mm. A tampa traseira tem um orifício de 33,4 mm de diâmetro para saída do ar aquecido do concentrador, este orifício foi realizado também pelo processo de usinagem. Ambos, flange interno e tampa, são soldados ao corpo e o tubo soldado a tampa. Quando montados, os flanges são fixados através de 08 conjuntos de parafuso/porca inox 304L. Todas essas uniões são realizadas através do processo de soldagem *Tungsten Inert Gas* (TIG).

Figura 21 – Tubo e chapas do receptor



Fonte: elaborada pelo autor.

O isolamento térmico fica entre a carcaça e a cavidade RPC, o mesmo possui a função de reduzir a perda de calor dentro do concentrador. Este material possui as seguintes características:

- a) Placa de fibra cerâmica constituída de fibras refratárias para isolação térmica em alta temperatura;
- b) Dimensões da placa comercial padrão $25\text{ mm} \times 610\text{ mm} \times 1220\text{ mm}$;
- c) Densidade 300 kg/m^3 ;
- d) Temperatura de trabalho até $1260\text{ }^\circ\text{C}$;
- e) Condutividade Térmica a $800\text{ }^\circ\text{C}$ ($0,17\text{ W/m }^\circ\text{C}$).

O isolamento possui duas tampas, frontal e traseira, com orifícios para entrada dos raios solares e saída do ar quente, respectivamente. O corpo do isolamento é montado enfileirando 09 placas de 25 mm de espessura e diâmetro externo igual ao diâmetro interno do corpo inox da carcaça. As placas devem ser fabricadas pelo processo de corte e fresamento,

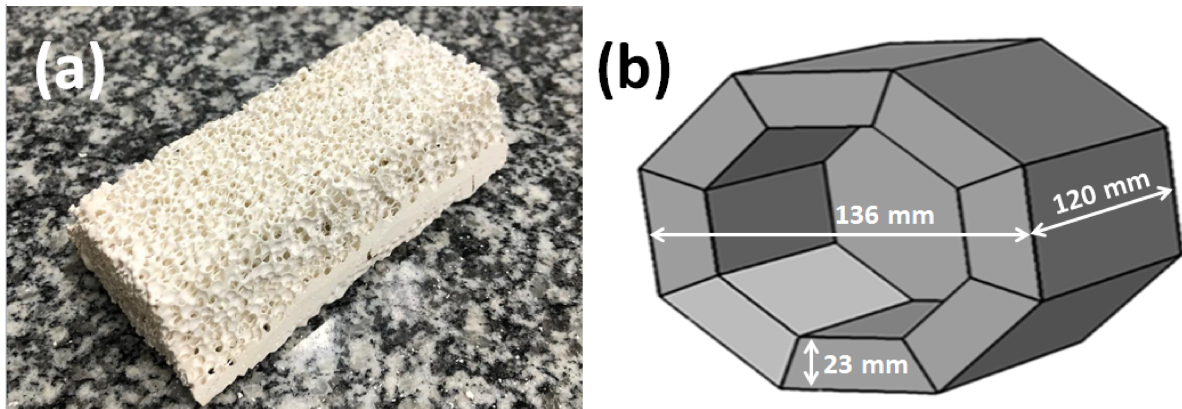
sendo as mesmas unidas com adesivo para placa de fibra cerâmica.

O núcleo do receptor ou cavidade RPC, onde os raios solares são concentrados e promove o aquecimento do ar, possui as seguintes especificações:

- a) Material cerâmico de alumina (Al_2O_3) e morfologia RPC;
- b) Densidade de poros de 30 PPI;
- c) Oito placas trapezoidais e uma base octogonal (Medidas básicas na Figura 22);
- d) A cavidade RPC foi fabricada pelo método de replicação (subseção 2.4.4);
- e) As placas e a base octogonal são coladas com massa moldável com base fibra cerâmica.

A cavidade RPC foi fornecida através da parceria com a professora Mona Lisa Moura da Universidade Estadual do Ceará.

Figura 22 – (a)Placa RPC trapezoidal, (b)Medidas básicas da cavidade RPC



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2 Simulação computacional do receptor

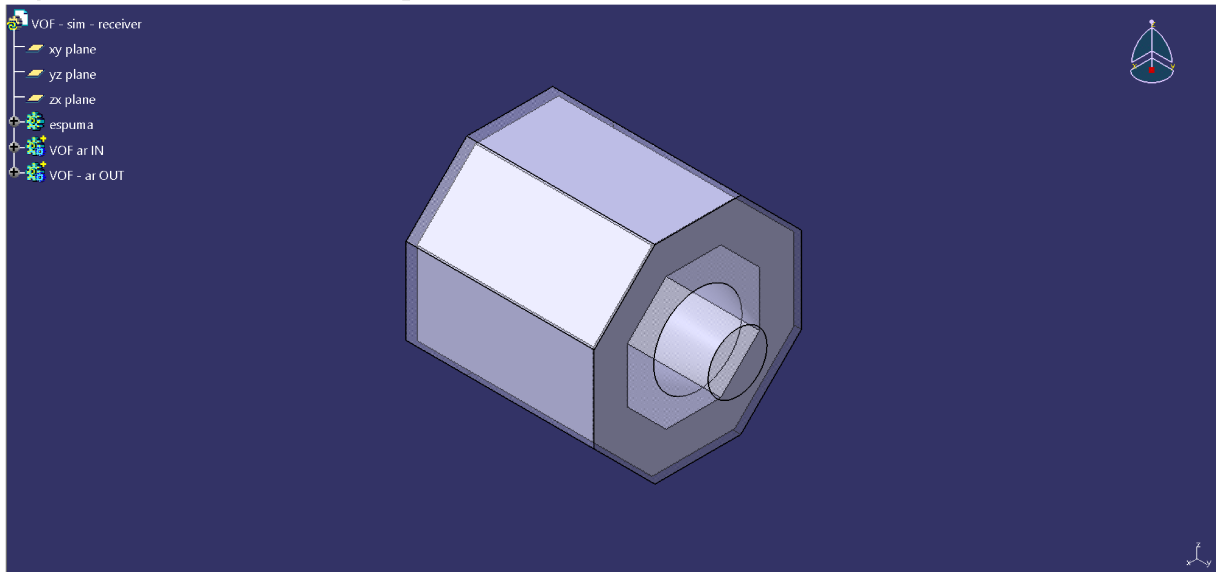
Nesta seção são apresentados os softwares utilizados na simulação computacional, a malha gerada, condições de contorno adotadas, quais os parâmetros de entrada e, por fim, as variáveis coletadas.

3.2.1 Softwares de Simulação

Para o desenho da geometria do receptor solar (Figura 23) foi utilizado o software CATIA V5. O sólido resultante é uma cavidade octogonal com dimensões básicas apresentadas na Figura 22. Além da parte sólida, o desenho mostra os espaços vazios de circulação do ar, interna e externamente a cavidade RPC. Esta geometria foi então exportada para o software de

DFC.

Figura 23 – Geometria do receptor no Catia



Fonte: elaborada pelo autor.

A análise de DFC foi realizada pelo ANSYS CFX 2022 R2, um software que representa o estado da arte para resolução de problemas de transmissão de calor e dinâmica dos fluidos através do Método dos Volumes Finitos (MVF) (WEHMANN *et al.*, 2018). Diversos trabalhos vem sendo desenvolvidos para avaliação dos parâmetros dos receptores CSP fazendo uso de simulação computacional através do CFX (CHEILYTKO; SCHWARZBÖZL, 2024), (BUTTI *et al.*, 2021), (UZAIR *et al.*, 2018), o que mostra que esta análise computacional revela-se um método bastante eficiente, principalmente na redução de custos e tempo no desenvolvimento de novos produtos (WEHMANN *et al.*, 2018).

Para criação da malha computacional, foi utilizado o software ANSYS Meshing, que através da geometria gerada no CATIA, o mesmo gera uma malha tridimensional dividindo uma complexa geometria em elementos que podem ser utilizados para discretizar um domínio.

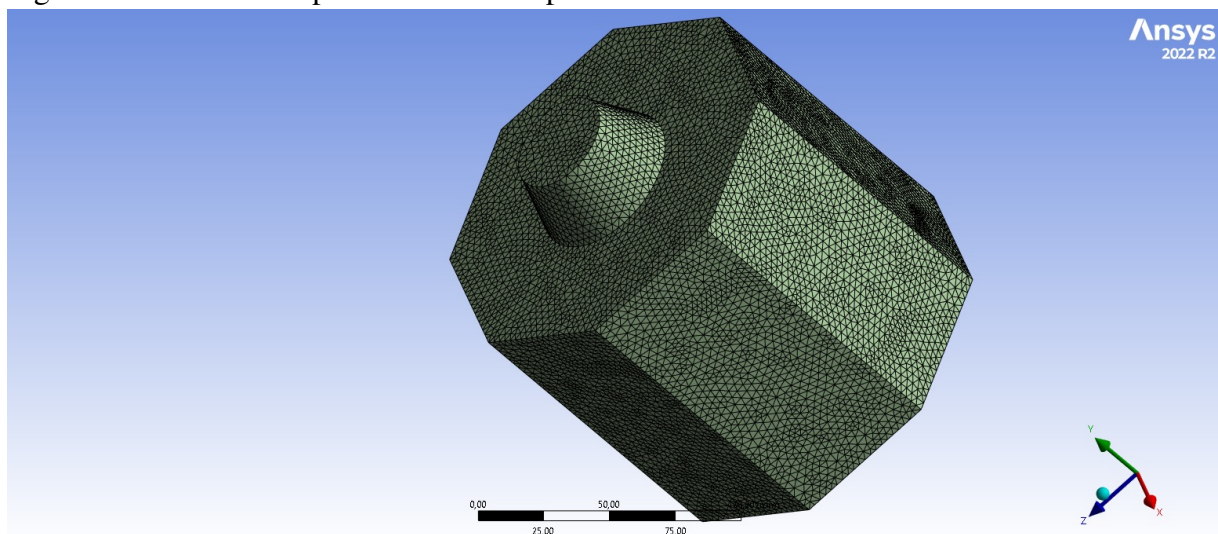
3.2.2 Malha computacional e condições de contorno

A malha computacional possui as seguintes características:

- a) Foi utilizado o software ANSYS Meshing para criação da malha computacional;
- b) Forma dos elementos: tetraédrica (Figura 24), pois se adapta melhor as geometrias complexas, tem um menor custo computacional e permite que elementos de corpos diferentes compartilhem a mesma face;

- c) A independência de malha foi realizada tomando tamanhos médios de 10mm até 1mm, com passo de 1 mm. Com base em um estudo de independência de malha, o tamanho médio de aresta de 3 mm apresentou ser o ponto onde o modelo alcança independência, como pode ser visto na Figura 25, onde o eixo vertical representa a temperatura de saída média do receptor normalizada pela temperatura máxima e o eixo horizontal representa o inverso do comprimento médio de aresta dos elementos. O triângulo vermelho, representa o valor utilizado para as simulações computacionais;
- d) Existe um volume de ar externo as laterais da cavidade RPC de 2,5 mm, conforme modelo do receptor na Figura 26. Logo, o tamanho dos elementos ao longo dessa volume foi ajustado para 1 mm para garantir a discretização.
- e) A malha computacional possui 233898 elementos e 58685 nós.

Figura 24 – Malha computacional do receptor solar

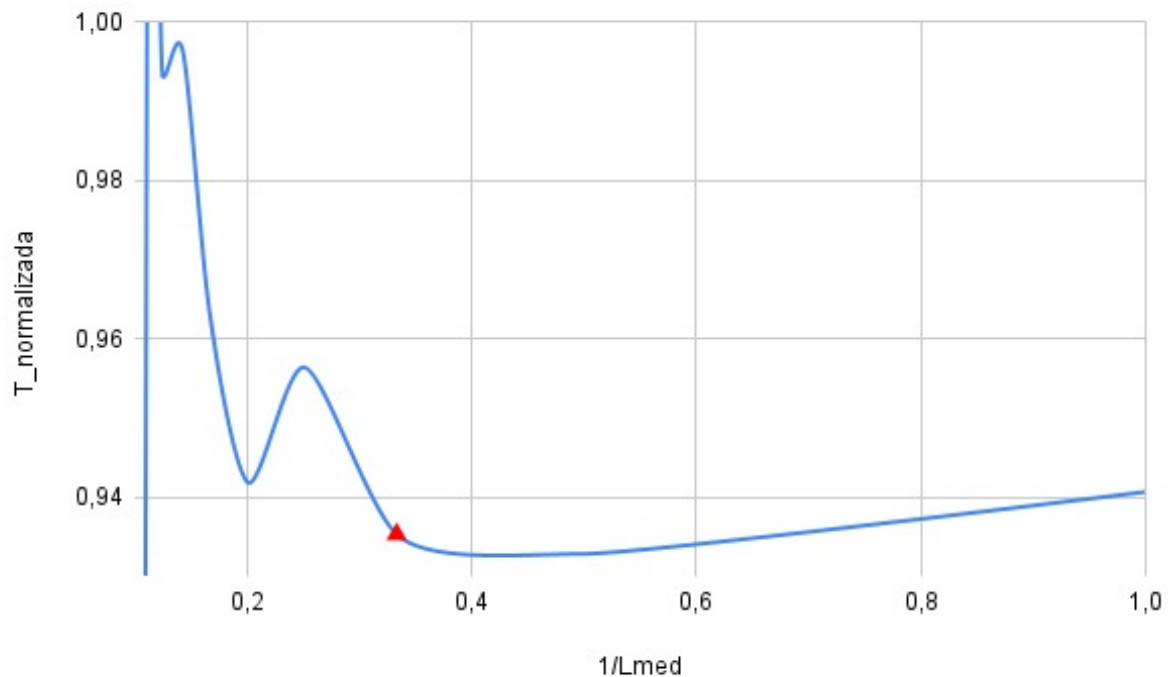


Fonte: elaborada pelo autor.

Algumas premissas e condições de contorno adotadas para a execução da simulação no CFX são:

- a) A parede externa do modelo foi considerada adiabática;
- b) Foi simplificado o modelo de radiação solar para um modelo de fluxo de calor, que é absorvido nas paredes da cavidade RPC, considerando apenas o calor advindo da radiação.
- c) A eficiência ótica do concentrador solar de prato parabólico é constante no valor de 90 %;

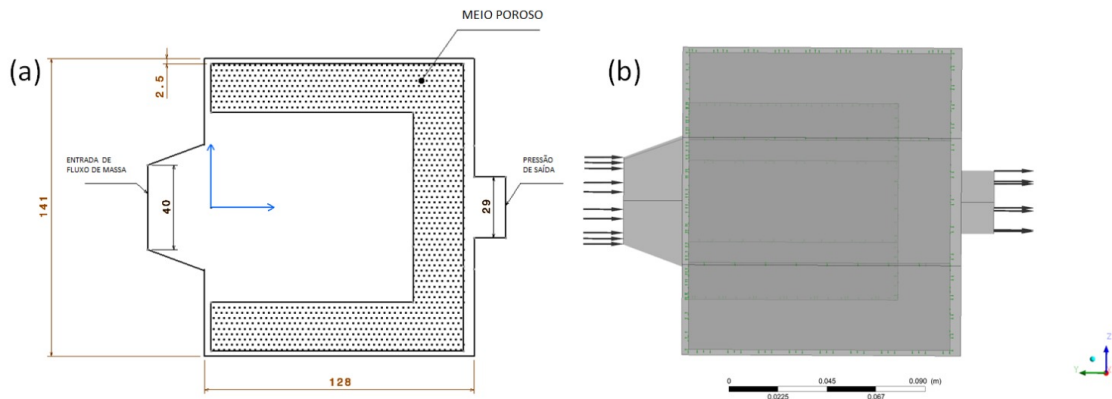
Figura 25 – Gráfico de independência de malha



Fonte: elaborada pelo autor.

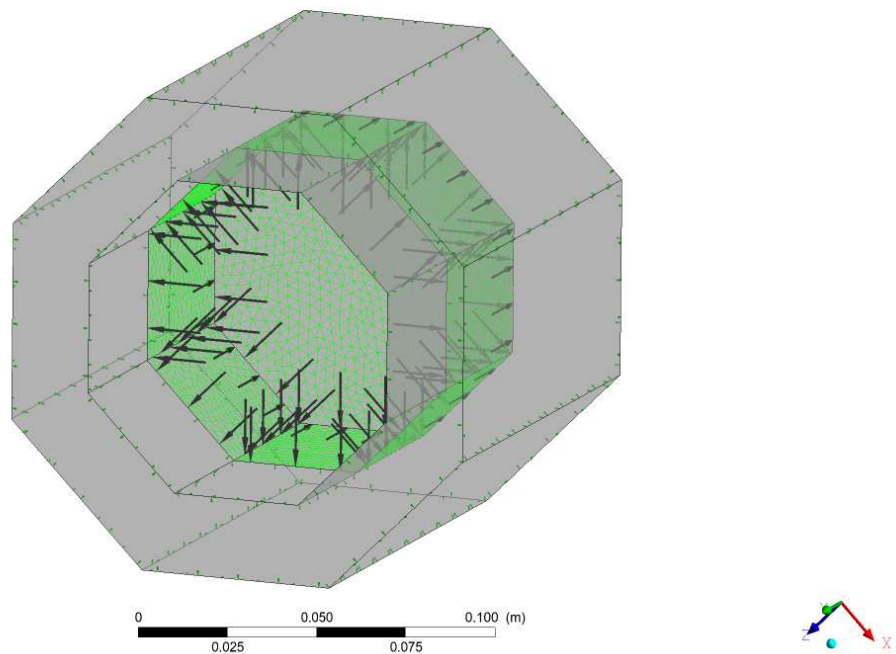
- d) Foi considerada apenas a radiação solar direta (DNI), excluindo assim a radiação difusa. Foram adotados os limites mínimo e máximo de DNI de 200 a 1000 W/m^2 , respectivamente, referentes a região nordeste do Brasil (PORFIRIO; CEBALLOS, 2017) ;
- e) Temperatura de entrada do receptor constante de 300 K;
- f) Vazão mássica mínima na entrada do receptor de $0,002 \text{ kg/s}$;
- g) O meio fluido como ar como gás ideal compressível;
- h) O corpo sólido, cavidade RPC, como meio poroso homogêneo e isotrópico (Figura 26);
- i) Fluxo de massa constante. Na Figura 26, mostra a entrada e saída do fluxo de massa no CFX;
- j) Considerado que 50 % da radiação solar incide na área do total do octógono da base do RPC e 50 % da radiação solar incide na área lateral interna das placas da cavidade RPC (Figura 27).

Figura 26 – (a) Modelo esquemático do receptor no CFX, (b) Entrada e saída de fluxo de massa no CFX



Fonte: elaborada pelo autor.

Figura 27 – Radiação nas paredes do receptor



Fonte: elaborada pelo autor.

3.2.3 Parâmetros de entrada e variáveis coletadas

Como parâmetros de entrada para a simulação computacional foram adotadas diversas variáveis conforme apresentadas na Tabela 5.

As variáveis coletadas do resultado da simulação são:

- a) Vazão mássica, \dot{m}_{ar} ;
- b) Temperatura de saída, $T_{ar,saída}$;
- c) Entalpia de entrada, $h(T_{ar,entrada})$;

Tabela 5 – Parâmetros de entrada da simulação computacional

Parâmetros do Ar		Parâmetros do RPC	
Localização	B473	Localização	B637
Tipo de Domínio	Domínio Fluido	Tipo de Domínio	Domínio Poroso
Material	Ar como Gás Ideal	Material Sólido	Alumina
Morfologia	Fluido Contínuo	Morfologia Sólido	Sódio Contínuo
Pressão de Referência	1 atm	Pressão de Referência	1 atm
Modelo de Flutuabilidade	Não flutuante	Modelo de Flutuabilidade	Não flutuante
Domínio de movimento	Estacionário	Domínio de movimento	Estacionário
Deformação da malha	Nenhuma	Deformação da malha	Nenhuma
Transferência de calor	Energia Térmica	Material Fluido	Ar como Gás Ideal
Turbulência	k-Epsilon	Morfologia Fluido	Fluido Contínuo
Turbulência (Função de parede)	Escalável	Transferência de calor	Energia Térmica
Combustão	Nenhuma	Combustão	Nenhuma
Radiação Térmica	Nenhuma	Radiação Térmica	Nenhuma
Interface fluido porosa (Massa e Momento, Turbulência e Transferência de calor)	Fluxo conservativo	Turbulência	k-Epsilon
Parede (Massa e momento)	Não deslizante	Turbulência (Função de parede)	Escalável
Parede (Rugosidade)	Parede lisa	Interface fluido porosa (Massa e momento, Turbulência e Transferência de calor)	Fluxo conservativo
Parede (Transferência de Calor)	Adiabática	Porosidade (Área Porosa)	Isotrópica
Entrada (Regime de Fluxo)	Subsônico	Porosidade (Volume)	0,84
Entrada (Massa e Momento)	Vazão mássica de 0,02 kg/s	Porosidade (Modelo de Perda)	Perda direcional e tipo de perda de velocidade superficial
Entrada (Direção do Fluxo)	Normal à fronteira	Porosidade (Perda Direcional)	Componentes cartesianos x=0, y=-1 e x=0
Entrada (Turbulência)	Média (Intensidade = 5%)	Porosidade (Perda de Fluxo)	Coefficiente quadrático de \$400 \sim \text{kgm}^{-4}\$
Entrada (Transferência de calor)	Temperatura estática de 300 K	Porosidade (Perda Transversal)	Multiplicador de coeficiente de fluxo de 100
Saída (Regime de Fluxo)	Subsônico	Porosidade (Densidade de Área de Fluido Sólido)	Densidade da área interfacial de \$0,8 \sim \text{m}^{-1}\$
Saída (Massa e Momento)	Pressão estática média Pressão relativa de 0 Pa Mistura de perfil de pressão de 0,5	Porosidade (Transferência de Calor Fluido Sólido)	Coefficiente de Transferência de Calor de \$220 \sim \text{Wm}^{-2}\text{K}^{-1}\$
Saída (Pressão Média)	Média em toda a saída	Radiação Lateral/Frontal	Fluxo de calor variável em função do DNI
		Radiação Lateral/Frontal (Regime de fluxo)	Subsônico
		Radiação Lateral/Frontal (Massa e Momento)	Velocidade Normal de 0 m/s
		Radiação Lateral/Frontal (Turbulência)	Média com intensidade de 5%
		Radiação Lateral/Frontal (Transferência de Calor)	Temperatura estática de 300 K

Fonte: elaborada pelo autor.

d) Entalpia de saída, $h(T_{ar,saída})$;

O CFX não entrega diretamente o valor de Energia Absorvida (Q). Logo, o valor desta variável é calculada através da vazão mássica e diferença das entalpias, conforme Equação 2.8. A Eficiência do receptor ($\eta_{receptor}$) é calculada através da Equação 2.6.

3.2.4 Equações Governantes

A série de equações resolvidas pelo software ANSYS CFX, são equações não estacionárias de Navier-Stokes em sua forma de conservação (ANSYS, 2021). Serão apresentadas nesta seção, as equações instantâneas de conservação de massa, momento, energia, entre outras.

3.2.5 Equação da Continuidade

A equação geral da continuidade é de fundamental importância na dinâmica de fluidos e expressa a conservação de massa. Para um fluido compressível é dada por:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \quad (3.1)$$

Onde,

ρ - é a densidade do fluido

U - é o vetor velocidade do fluido

$\frac{\partial \rho}{\partial t}$ - é a taxa de variação da densidade com o tempo

$\nabla \cdot (\rho \mathbf{U})$ - é o divergente do produto da densidade pela velocidade

3.2.6 Equação da Quantidade de Movimento

A equação do momento, considerando um fluido compressível, é expressa por:

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{U})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \otimes \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + S_M \quad (3.2)$$

Onde o tensor de tensões, $\boldsymbol{\tau}$, está relacionado com a taxa de deformação por

$$\boldsymbol{\tau} = \mu (\nabla \mathbf{u} + (\nabla \mathbf{U})^T) - \frac{2}{3} \delta (\nabla \cdot \mathbf{U}) \quad (3.3)$$

3.2.7 Equação da Energia Total

A equação da Energia total é expressa por:

$$\frac{\partial(\rho h_{tot})}{\partial t} - \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} h_{tot}) = \nabla \cdot (\lambda \nabla \tau) + \nabla \cdot (\mathbf{U} \cdot \mathbf{T}) + \mathbf{U} \cdot \mathbf{S}_M + \mathbf{S}_E \quad (3.4)$$

onde h_{tot} é a entalpia total, relacionada à entalpia estática $h(\mathbf{T}, p)$ por:

$$h_{tot} = h + \frac{1}{2} \mathbf{U}^2 \quad (3.5)$$

3.2.8 O modelo k-epsilon

O modelo $k - \varepsilon$ para modelos turbulentos, introduz duas novas variáveis ao sistema de equações citados (ANSYS, 2021). A equação de continuidade se torna então:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_j) = 0 \quad (3.6)$$

e a equação da quantidade de movimento fica da seguinte forma

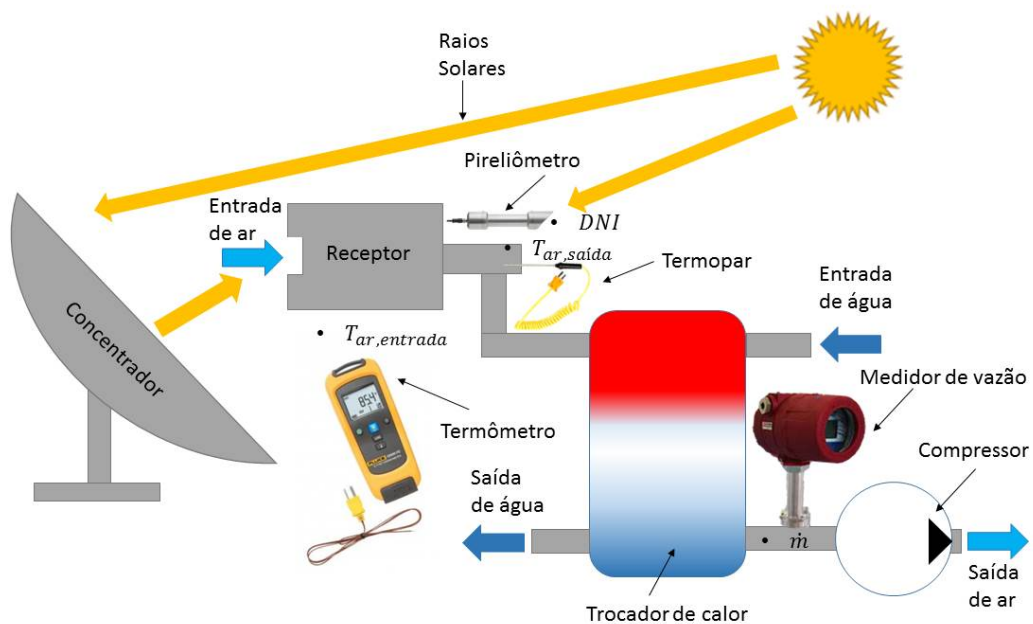
$$\frac{\partial \rho U_i}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_j} (\rho U_i U_j) = -\frac{\partial p'}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + S_M \quad (3.7)$$

Adotou-se uma energia cinética turbulenta de 10% e razão de dissipação nula como condição de contorno na entrada do escoamento.

3.3 Procedimentos recomendados para futura caracterização experimental

Nesta seção, são discriminadas as variáveis de interesse, a forma de coleta das mesmas, os instrumentos de medição entre outros aspectos importantes relativos as medições de campo. Na Figura 28, é mostrado o arranjo geral do sistema do concentrador/receptor com a indicação dos locais de coleta das variáveis de interesse.

Figura 28 – Arranjo geral do sistema do concentrador/receptor com a indicação dos locais de coleta das variáveis



Fonte: elaborada pelo autor.

A temperatura do ar de entrada ($T_{ar,entrada}$) é coletada através de termômetro em local próximo ao concentrador solar.

A temperatura do ar de saída ($T_{ar,saida}$) é coletada através de termopar tipo k (faixa de utilização de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+1260\text{ }^{\circ}\text{C}$) instalado na tubulação de saída do receptor.

A vazão mássica (\dot{m}_{ar}) é adquirida através de medidor de vazão tipo termal localizado entre o trocador de calor e o compressor. O mesmo possui as seguintes características básicas:

- a) Medição de vazões mássica e volumétrica;
- b) Fluido de trabalho são gases em geral (exceto acetileno);
- c) Faixa de Medição de 0, 1 a 100 Nm/s ;
- d) Material do corpo de aço inox;
- e) Temperatura de operação de -30 a $+200$ °C (Máxima 350 °C);
- f) Pressão de operação de 1,6 MPa (Opcional até 4,0 MPa);
- g) Precisão de $\pm 1,0$ a 2,5%;
- h) Alimentação elétrica de 24 VDC ou 220 VAC ;
- i) Classe de proteção IP65.

As entalpias de entrada ($h(T_{ar,entrada})$) e saída ($h(T_{ar,sáida})$) do fluido são adquiridas no Anexo A de acordo com a temperatura em que se encontra o fluido de trabalho (ar) na entrada e saída do receptor.

O valor da energia solar incidente (P_{solar}) é obtida através da Equação 2.7, sendo o valor do irradiação de incidência normal (DNI) coletado através do instrumento pireliômetro (DUFFIE; BECKMAN, 2013) localizado atrás do receptor solar.

Pra a obtenção da Energia Absorvida no receptor (Q) é utilizada a Equação 2.8, que utilizam os valores de entalpia de entrada ($h(T_{ar,entrada})$) e saída ($h(T_{ar,sáida})$) do fluido, bem como o valor da vazão mássica.

Na saída do sistema existe um compressor responsável pela sucção do ar ambiente para o interior do receptor solar onde o mesmo ganha calor para posterior utilização. O compressor possui as seguintes informações básicas:

- a) Compressor tipo radial;
- b) Motor trifásico, 4 tensões, IP55;
- c) Temperatura máxima de operação de 80 °C;
- d) Vazão máxima de 1,8 m^3/min ;
- e) Pressão máxima de 1600 mmH_2O ;
- f) Vácuo máximo de 1400 mmH_2O .

Uma observação importante no arranjo geral é a necessidade da instalação de um trocador de calor casco e tubo a água para redução da temperatura do ar antes de chegar ao medidor de vazão e compressor, pois as temperaturas máximas de operação dos mesmos são de 350 °C e 80 °C, respectivamente.

4 RESULTADOS

Neste capítulo são apresentados os resultados da construção do receptor solar e da simulação termo fluida realizada pelo software ANSYS CFX.

4.1 Resultado da construção do receptor solar

O receptor solar foi construído com estrutura em aço inox em formato cilíndrico com flanges, também em inox, de forma a ter mais resistência a corrosão (Figura 29). A tampa parafusada, permite que o mesmo seja desmontado para ter acesso as partes internas para reparo ou limpeza do receptor.

Figura 29 – Carcaça inox do receptor soldada e usinada



Fonte: elaborada pelo autor.

A cavidade RPC (Figura 30) foi fabricada em alumina (Al_2O_3) pelo método convencional de replicação de esponja polimérica, sendo formada por oito placas trapezoidais e uma base octogonal.

Figura 30 – Cavityde RPC fabricada



Fonte: elaborada pelo autor.

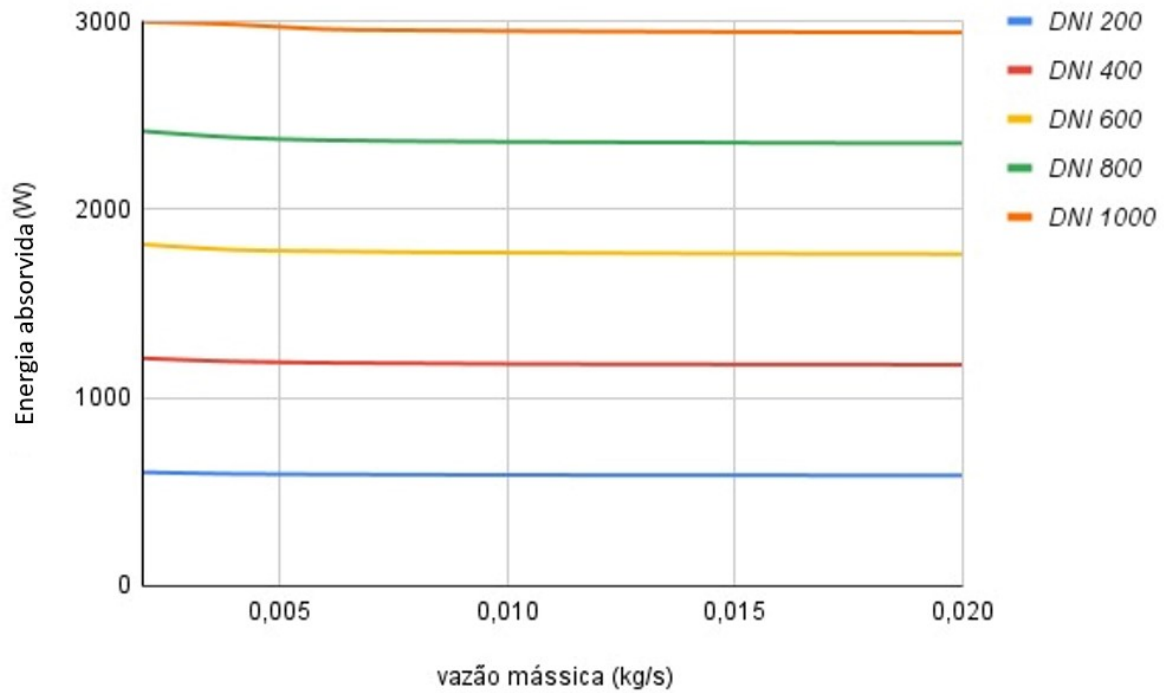
O isolamento térmico de material fibra cerâmica do receptor solar, foi dimensionado e a matéria prima adquirida. Porém, a fabricação da mesma não foi concluída antes da finalização desta Dissertação.

4.2 Resultados das simulações computacionais

Como resultados das simulações computacionais, são apresentados os Gráficos de Energia Absorvida em função da Vazão mássica (Figura 31), Temperatura de saída do receptor em função da vazão mássica (Figura 32) e Eficiência do receptor em função vazão mássica (Figura 33). São apresentadas curvas de 200, 400, 600 e 800 DNI.

A Energia Absorvida (Q) ou calor gerado nas simulações conduzidas no CFX se mostraram diretamente dependentes da intensidade de radiação solar (DNI), como pode ser observado no Gráfico da Figura 31, apresentando uma variação de Q de 604 W (DNI 200) a

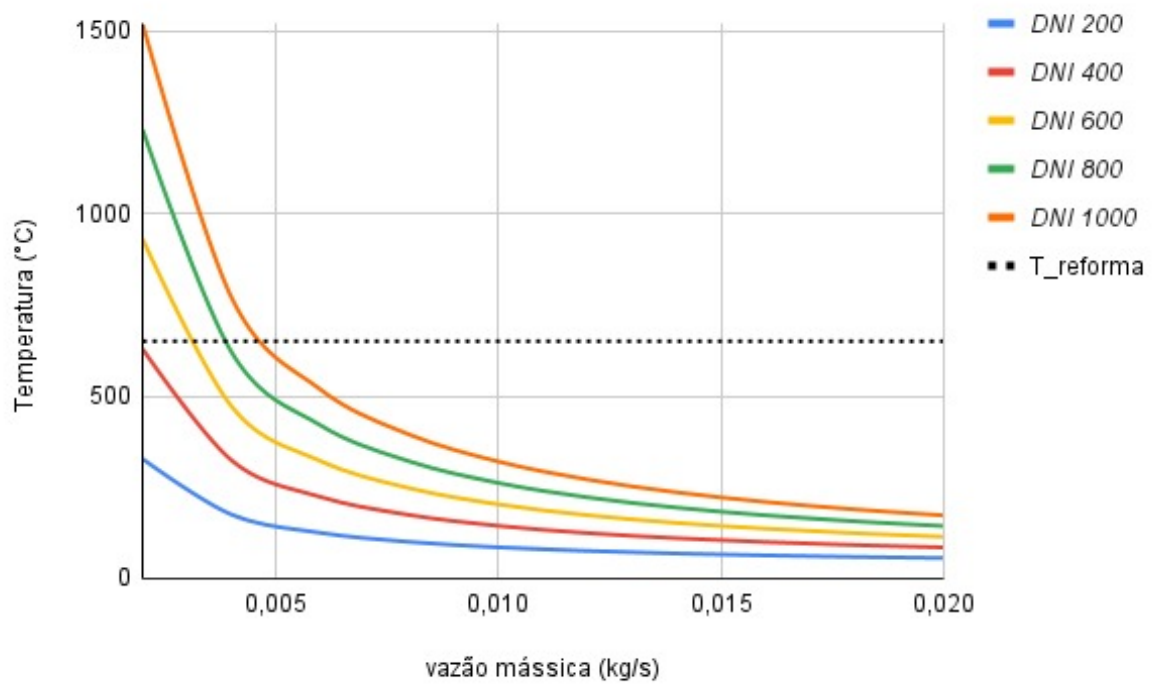
Figura 31 – Gráfico de Energia Absorvida em função da Vazão mássica



Fonte: elaborada pelo autor.

2.997 W (DNI 1000), ambos na vazão mássica mínima de 0,002 kg/s.

Figura 32 – Gráfico de Temperatura de saída do receptor em função da vazão mássica

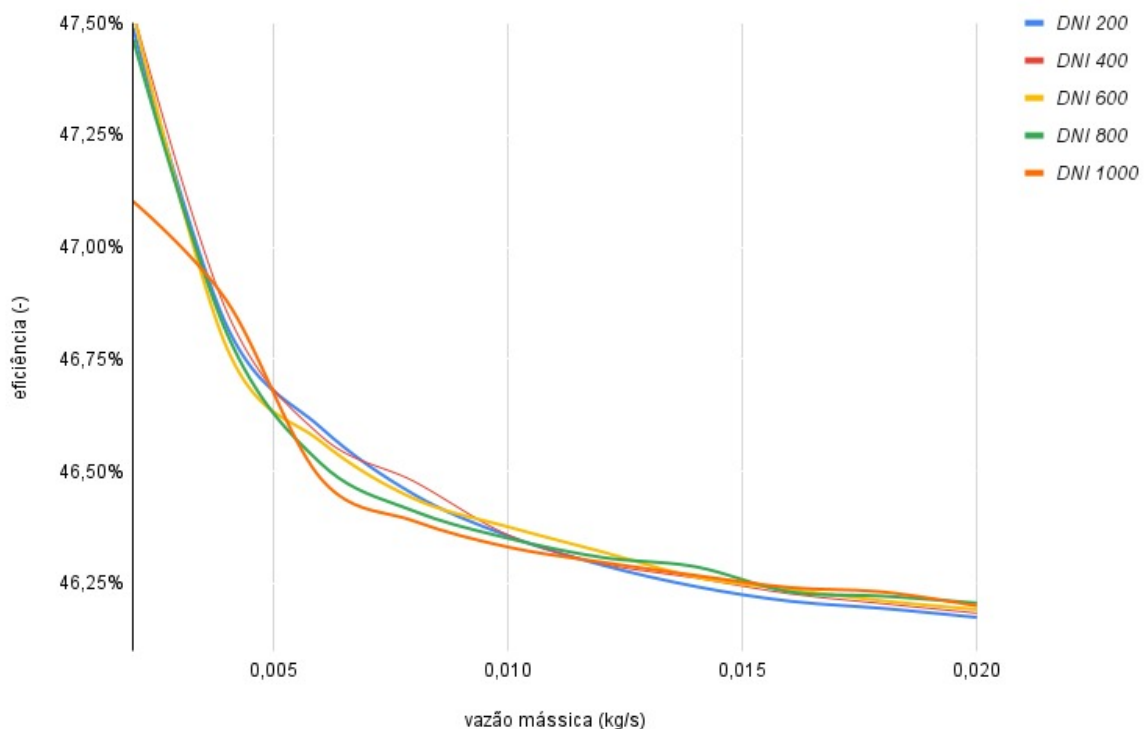


Fonte: elaborada pelo autor.

Outra informação que podemos extrair dos resultados apresentados neste Gráfico da Figura 31, é que a variação da vazão mássica (\dot{m}_{ar}) causa pouca influência na Energia Absorvida no receptor. Selecionando como exemplo a curva de DNI 800, Q assume o valor máximo de 2.415 W, para vazão mínima de $\dot{m}_{ar} = 0,002 \text{ kg/s}$, e o valor máximo de 2.352 W, para a vazão máxima de $\dot{m}_{ar} = 0,02 \text{ kg/s}$. Mesmo com uma variação de \dot{m}_{ar} da ordem de dez vezes, Q apresenta uma variação de 2,6%. Devido a baixa variação de Q em função de \dot{m}_{ar} , pode-se considerar Q como constante para um valor fixo de DNI.

Para os resultados apresentados no gráfico da Figura 32, pode-se observar a temperatura de saída do receptor ($T_{ar,sáida}$) é inversamente proporcional a vazão mássica, ou seja, a medida que ocorre um acréscimo de \dot{m}_{ar} , a uma conseqüente diminuição da $T_{ar,sáida}$. Esta relação se mantém para todos os valores de DNI utilizados. O comportamento das curvas de $T_{ar,sáida}$ em função da \dot{m}_{ar} estão aderentes as curvas dos resultados experimentais apresentados no artigo do Patil *et al.* (2021).

Figura 33 – Gráfico de Eficiência do receptor em função vazão mássica



Fonte: elaborada pelo autor.

Na reforma a vapor do glicerol, a temperatura do processo é um dado relevante, onde ocorre uma relação de temperatura e seletividade de hidrogênio de 92,9%, alcançada na temperatura de 650 °C, em catalisadores de Ni-Cu-Al (WANG *et al.*, 2013). O gráfico da

Figura 32, apresenta uma linha tracejada marcando a temperatura de 650 °C. Como exposto, esta temperatura garante que o processo de reforma a vapor do glicerol seja bastante eficiente. Para os casos testados, é possível o alcance desta temperatura nos valores 600, 800 e 1000 DNI.

Como é demonstrado no gráfico da Figura 33, A eficiência térmica do receptor ($\eta_{receptor}$) é inversamente proporcional a vazão mássica. A curvas de eficiência para cada DNI apresentam valores muito próximos. Para baixas \dot{m}_{ar} os valores de $\eta_{receptor}$ se assemelham aos resultados experimentais apresentados no artigo do Patil *et al.* (2021). Porém, quando há o aumento de \dot{m}_{ar} ocorre uma estabilização dessa variável, que segundo os dados da literatura, deveria diminuir para valores menores do que os extraídos da simulação computacional. A hipótese levantada para a explicação desse fenômeno é a adoção de modelo de corpo negro para o meio poroso.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Os resultados da simulação computacional no ANSYS CFX caracterizou um comportamento térmico do sistema com relação à vazão mássica e à intensidade de radiação solar (DNI). A análise dos gráficos indica as seguintes conclusões principais:

A Energia Absorvida no receptor, representando o calor gerado, mostra uma dependência direta com a intensidade de radiação solar. Observou-se que o calor gerado aumenta significativamente com o aumento do DNI, variando de 604 W a 2.997 W à medida que o DNI aumenta de 200 para 1000. No entanto, a variação da vazão mássica tem um efeito insignificante sobre a Energia Absorvida no receptor.

A temperatura de saída do receptor diminui com o aumento da vazão mássica. Este comportamento é consistente com as observações experimentais descritas na literatura, demonstrando que, para todos os valores de DNI testados, a temperatura de saída do receptor é inversamente proporcional à vazão mássica. Este resultado é crucial para processos que dependem de uma temperatura específica, como a reforma a vapor do glicerol, onde a temperatura ideal de 650 °C é alcançada nos níveis de DNI de 600, 800 e 1000.

A eficiência térmica do receptor mostra uma tendência inversamente proporcional à vazão mássica. Para baixas vazões, a eficiência se assemelha aos resultados experimentais encontrados na literatura, mas estabiliza com o aumento da vazão.

Os resultados obtidos fornecem uma visão abrangente do desempenho do receptor solar em relação às variáveis estudadas. A dependência da Energia Absorvida no receptor com o DNI e a relação inversa entre a temperatura de saída e a vazão mássica são aspectos importantes para a otimização dos sistemas CSP. Além disso, a análise da eficiência destaca a necessidade de considerar fatores adicionais na modelagem para garantir a precisão das previsões em condições variadas.

Foi considerado o alcance do objetivo do trabalho, sendo simulado e desenvolvido receptor solar que:

1. Considerou que através de uma ampla pesquisa bibliográfica desenvolveu um receptor que possuísse as melhores características já amplamente pesquisada e consolidadas;
2. Foi Simulado computacionalmente através do ANSYS CFX para refinamento do projeto, sendo alcançadas as variáveis de saída estimadas e compatíveis com os resultados da literatura.
3. Foi construído em quase sua totalidade um receptor com Capacidade de Absorção de

Energia de 2,4 kW e Temperatura de Saída média de 800 °C ;

Como recomendações para trabalhos futuros, para a finalização da construção do receptor solar, como apresentado no Capítulo 4, é necessária a conclusão da fabricação do isolamento de fibra cerâmica e a montagem das três partes do receptor. Outra finalização importante, é a do prato parabólico, que deve ser construído em material de fibra de vidro com estrutura de alumínio. Com a conclusão dessas atividades, realizar a montagem final de todo o conjunto concentrador solar com os respectivos instrumentos para medição de variáveis, realizar os testes de campo e as análises e comparações dos resultados com os dados das simulações computacionais e da literatura de referência.

O presente trabalho considerou na simulação computacional que não há troca de calor do ar com o isolamento térmico do receptor, ou seja, a interface ar/isolamento é adiabática, o que é uma premissa de um isolamento ideal. Como sugestão, realizar a criação dos corpos e malhas tanto do isolamento térmico quanto da carcaça inox para agregar na simulação computacional. Com essa nova configuração, é possível observar:

1. O perfil de temperatura ao longo de toda estrutura do receptor (cavidade RPC, isolamento térmico e carcaça inox);
2. A eficiência do isolamento térmico de fibra cerâmica;
3. Qual temperatura é alcançada pela carcaça inox, o que pode gerar uma necessidade de melhoria do isolamento térmico. Como essa informação, pode-se dimensionar um isolamento térmico externo a carcaça;
4. Novos dados de eficiência térmica e perdas de calor do receptor solar, entre outras observações importantes.

Outro trabalho futuro a partir da construção do CSP, é a utilização do calor gerado no receptor para produção de hidrogênio verde. Após o processo de aquecimento do ar no receptor solar, o mesmo segue para um reformador, onde ocorre a reforma a vapor da mistura água-glicerol formando o *Synthesis-Gas* (Gás de Síntese) (SYNGAS). Depois do reformador o SYNGAS segue para o equipamento de *Water-Gas Shift Reaction* (Reação de Deslocamento Gás-Água) (WGRS), que fornece como produtos o hidrogênio verde e CO_2 . Neste sistema, são previstos três trocadores de calor que tem a função de aproveitamento de calor de cada etapa, assim aumentando a eficiência térmica do sistema.

REFERÊNCIAS

- ABED, A. A.; EL-MARGHANY, M. R.; EL-AWADY, W. M.; HAMED, A. M. **Recent advances in parabolic dish solar concentrators: Receiver design, heat loss reduction, and nanofluid optimization for enhanced efficiency and applications**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2024.
- ALFRADIQUE, S. H. B. E. C. G. M. F. F. de S. C. E. M. F.; SANT, A. C.; PINTO, A.; LEAL, C. M. C. B. H. P. G. R. S. A. A. de F. A.; PEREIRA, M. de Estado Bento Costa Lima Leite de A. J. S.-E. M. F. D.; MACHADO, G. V.; REGO, E. E. Nota técnica epe/dpg/spg/01/2022 presidente thiago vasconcelos barral ferreira. Disponível em: <http://www.mme.gov.br/http://www.epe.gov.br>.
- AMBROSETTI, G.; GOOD, P. A novel approach to high temperature solar receivers with an absorbing gas as heat transfer fluid and reduced radiative losses. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 183, p. 521–531, 5 2019. ISSN 0038092X.
- ANSYS, I. **ANSYS CFX-Solver Theory Guide**. [S. l.], 2021. Acesso em: 25 ago. 2024. Disponível em: https://dl.cfdexperts.net/cfd_resources/Ansys_Documentation/CFX/Ansys_CFX-Solver_Theory_Guide.pdf.
- BARLEV, D.; VIDU, R.; STROEVE, P. **Innovation in concentrated solar power**. [S. l.]: Elsevier B.V., 2011. 2703-2725 p.
- BLANCO, M. J.; MILLER, S. Introduction to concentrating solar thermal (cst) technologies. **Advances in Concentrating Solar Thermal Research and Technology**, Woodhead Publishing, p. 3–25, 1 2017.
- BULFIN, B.; ACKERMANN, S.; FURLER, P.; STEINFELD, A. Thermodynamic comparison of solar methane reforming via catalytic and redox cycle routes. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 215, p. 169–178, 2 2021. ISSN 0038092X.
- BUTTI, J. M. L.; TRIPP, N. G.; LEOD, J. E. N. M.; RIVERA, S. S. Effect of surface material properties and operating conditions on the heat flux and temperature distributions in the cavity receiver of a solar-dish-coupled biomass gasification reactor. **Energy Conversion and Management**, Elsevier Ltd, v. 244, 9 2021. ISSN 01968904.
- CARVALHO, F. L.; ASECIOS, Y. J.; BELLIDO, J. D.; ASSAF, E. M. Bio-ethanol steam reforming for hydrogen production over $\text{Co}_3\text{O}_4/\text{CeO}_2$ catalysts synthesized by one-step polymerization method. **Fuel Processing Technology**, Elsevier, v. 142, p. 182–191, 2 2016. ISSN 03783820.
- CHEILYTKO, A.; SCHWARZBÖZL, P. Reducing convective losses in a solar cavity receiver vocorec by creating a controlled vortex of returned air. **Renewable Energy**, Elsevier Ltd, v. 230, 9 2024. ISSN 18790682.
- DENG, Y.; LI, S.; APPELS, L.; ZHANG, H.; SWEYGERS, N.; BAEYENS, J.; DEWIL, R. Steam reforming of ethanol by non-noble metal catalysts. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Pergamon, v. 175, p. 113184, 4 2023. ISSN 1364-0321.
- DIAS, F. P. F.; FERNANDES, I. T.; BUENO, A. V.; ROCHA, P. A. C.; OLIVEIRA, M. L. M. de. Exergy analysis of glycerol steam reforming in a heat recovery reactor. **International Journal of Hydrogen Energy**, Pergamon, v. 46, p. 8995–9007, 2 2021. ISSN 0360-3199.

DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar Engineering of Thermal Processes**. Fourth. Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 2013. John A. Duffie (Deceased), Emeritus Professor of Chemical Engineering, and William A. Beckman, Emeritus Professor of Mechanical Engineering, Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin-Madison.

DÄHLER, F.; WILD, M.; SCHÄPPI, R.; HAUETER, P.; COOPER, T.; GOOD, P.; LARREA, C.; SCHMITZ, M.; FURLER, P.; STEINFELD, A. Optical design and experimental characterization of a solar concentrating dish system for fuel production via thermochemical redox cycles. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 170, p. 568–575, 8 2018. ISSN 0038092X.

EPE, E. de P. E. **Balanco Energético Nacional 2023: Relatório Síntese**. 2023. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2024. Disponível em: <https://www.epe.gov.br/sites-pt/publicacoes-dados-abertos/publicacoes/PublicacoesArquivos/publicacao-748/topico-687/BEN2023.pdf>.

FORTUNA, A. de O. **Técnicas Computacionais para Dinâmica dos Fluidos Vol. 30**. [S. l.]: Edusp, 2000. ISBN 9788531405266.

FREDRIKSSON, J.; EICKHOFF, M.; GIESE, L.; HERZOG, M. A comparison and evaluation of innovative parabolic trough collector concepts for large-scale application. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 215, p. 266–310, 2 2021. ISSN 0038092X.

FURLER, P.; SCHEFFE, J.; GORBAR, M.; MOES, L.; VOGT, U.; STEINFELD, A. Solar thermochemical co₂ splitting utilizing a reticulated porous ceria redox system. In: . [S. l.: s. n.], 2012. v. 26, p. 7051–7059. ISSN 08870624.

GAO, Z.; WEI, Y. K.; CHENG, Z. D.; HE, Y. L.; GAO, Q. P. Study on solar-driven methanol steam reforming process in parabolic trough solar receiver-reactors by developing an optical-thermal-chemical model of realistic porosity distributions. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 347, 10 2023. ISSN 03062619.

GROSJEAN, A.; SOUM-GLAUDE, A.; THOMAS, L. Replacing silver by aluminum in solar mirrors by improving solar reflectance with dielectric top layers. **Sustainable Materials and Technologies**, Elsevier B.V., v. 29, 9 2021. ISSN 22149937.

HEATH, P. A. G.; TURCHI, C. S.; III, J. J. B. Life cycle assessment of a parabolic trough concentrating solar power plant and impacts of key design alternatives: Preprint. 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1021/es1033266>.

HOES, M.; ACKERMANN, S.; THEILER, D.; FURLER, P.; STEINFELD, A. Additive-manufactured ordered porous structures made of ceria for concentrating solar applications. **Energy Technology**, Wiley-VCH Verlag, v. 7, 9 2019. ISSN 21944296.

IEA, I. E. A. **Energy Statistics Data Browser**. 2024. Acesso em: 24 ago. 2024. Disponível em: <https://www.iea.org/data-and-statistics/data-tools/energy-statistics-data-browser?country=WORLD&fuel=Energy%20supply&indicator=TESbySource>.

IRENA, I. R. E. A. **World Energy Transitions Outlook 2023: 1.5°C Pathway**. 2023. Accessed: 2024-08-23. Disponível em: https://www.irena.org/-/media/Files/IRENA/Agency/Publication/2023/Jun/IRENA_World_energy_transitions_outlook_2023.pdf.

ISLAM, M. T.; HUDA, N.; ABDULLAH, A. B.; SAIDUR, R. A comprehensive review of state-of-the-art concentrating solar power (csp) technologies: Current status and research trends. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Pergamon, v. 91, p. 987–1018, 8 2018. ISSN 1364-0321.

KAMI, J.; KRIBUS, A.; OSTRACH, B.; KOCHAVI, E. A high-pressure window for volumetric solar receivers. **Journal of Solar Energy Engineering**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 120, p. 101–107, 5 1998. ISSN 0199-6231. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1115/1.2888051>.

LI, Q.; ZHANG, Q. Experimental study on the influence of input solar flux, air flow rate, and absorber parameters on honeycomb ceramic air receiver performance. **Journal of Renewable and Sustainable Energy**, American Institute of Physics Inc., v. 12, 3 2020. ISSN 19417012. Disponível em: [/aip/jrse/article/12/2/023701/284642/Experimental-study-on-the-influence-of-input-solar](https://aip/jrse/article/12/2/023701/284642/Experimental-study-on-the-influence-of-input-solar).

LI, Y.; ZHANG, N.; LIOR, N. Performance comparison of two low-co₂ emission solar/methanol hybrid combined cycle power systems. **Applied Energy**, Elsevier, v. 155, p. 740–752, 10 2015. ISSN 0306-2619.

LIDOR, A.; ASCHWANDEN, Y.; HÄSELI, J.; RECKINGER, P.; HAUETER, P.; STEINFELD, A. High-temperature heat recovery from a solar reactor for the thermochemical redox splitting of h₂o and co₂. **Applied Energy**, Elsevier Ltd, v. 329, 1 2023. ISSN 03062619.

MALISKA, C. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional: fundamentos e coordenadas generalizadas**. [S. l.]: Livros Técnicos e Científicos, 1995.

MILLS, D. Linear fresnel reflector (lfr) technology. **Concentrating Solar Power Technology**, Woodhead Publishing, p. 153–196, 1 2012.

MORAN, M.; SHAPIRO, H.; BOETTNER, D.; BAILEY, M. **Fundamentals of Engineering Thermodynamics**. Wiley, 2010. ISBN 9780470495902. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=oyt8iW6B4aUC>.

MORETTI, C.; PATIL, V.; FALTER, C.; GEISSBÜHLER, L.; PATT, A.; STEINFELD, A. Technical, economic and environmental analysis of solar thermochemical production of drop-in fuels. **Science of the Total Environment**, Elsevier B.V., v. 901, 11 2023. ISSN 18791026.

MOYA, E. Z. Parabolic-trough concentrating solar power (csp) systems. **Concentrating Solar Power Technology**, Woodhead Publishing, p. 197–239, 1 2012.

PARTHASARATHY, P.; CLERCQ, P. L. Heat transfer simulation in a high temperature solar reactor. In: . [S. l.]: Elsevier Ltd, 2015. v. 69, p. 1810–1818. ISSN 18766102.

PATIL, V. R.; KIENER, F.; GRYLKA, A.; STEINFELD, A. Experimental testing of a solar air cavity-receiver with reticulated porous ceramic absorbers for thermal processing at above 1000 °c. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 214, p. 72–85, 1 2021. ISSN 0038092X.

PORFIRIO, A. C.; CEBALLOS, J. C. A method for estimating direct normal irradiation from goes geostationary satellite imagery: Validation and application over northeast brazil. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 155, p. 178–190, 2017. ISSN 0038092X.

ROMERO, M.; GONZÁLEZ-AGUILAR, J. **Solar thermal CSP technology**. 2014. 42-59 p.

ROMERO, M.; GONZÁLEZ-AGUILAR, J. Next generation of liquid metal and other high-performance receiver designs for concentrating solar thermal (cst) central tower systems. In: _____. [S. l.]: Elsevier Inc., 2017. p. 129–154. ISBN 9780081005170.

RÖGER, M.; PFÄNDER, M.; BUCK, R. Multiple air-jet window cooling for high-temperature pressurized volumetric receivers: Testing, evaluation, and modeling. **Journal of Solar Energy Engineering**, American Society of Mechanical Engineers Digital Collection, v. 128, p. 265–274, 8 2006. ISSN 0199-6231. Disponível em: <https://dx.doi.org/10.1115/1.2212437>.

SAD, M.; DUARTE, H.; VIGNATTI, C.; PADRO, C.; APESTEGUÍA, C. Steam reforming of glycerol: Hydrogen production optimization. **International Journal of Hydrogen Energy**, Elsevier, v. 40, n. 16, p. 6097–6106, 2015.

SALLABERRY, F.; LARRAYOZ, A. M. Optical efficiency and incidence angle modifier characterization of a linear fresnel reflector collector: Validation of a certified on-site test combining experimental measurements and simulation results. **Solar Energy**, Pergamon, v. 267, p. 112142, 1 2024. ISSN 0038-092X.

SALVINI, V. R.; LUCHINI, B.; ANEZIRIS, C. G.; PANDOLFELLI, V. C. Innovation in ceramic foam filters manufacturing process. **International Journal of Applied Ceramic Technology**, Blackwell Publishing Ltd, v. 16, p. 378–388, 1 2019. ISSN 17447402.

SCHIEL, W.; KECK, T. Parabolic dish concentrating solar power (csp) systems. **Concentrating Solar Power Technology**, Woodhead Publishing, p. 284–322, 1 2012.

SEDIGHI, M.; PADILLA, R. V.; TAYLOR, R. A.; LAKE, M.; IZADGOSHASB, I.; ROSE, A. High-temperature, point-focus, pressurised gas-phase solar receivers: A comprehensive review. **Energy Conversion and Management**, Pergamon, v. 185, p. 678–717, 4 2019. ISSN 0196-8904.

UNIDO; IRENA; ICLOS. **Green hydrogen for sustainable industrial development: A policy toolkit for developing countries**. 2023.

UZAIR, M.; ANDERSON, T. N.; NATES, R. J. Modeling of convective heat loss from a cavity receiver coupled to a dish concentrator. **Solar Energy**, Elsevier Ltd, v. 176, p. 496–505, 12 2018. ISSN 0038092X.

VERSTEEG, H.; MALALASEKERA, W. **An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method**. Pearson Education Limited, 2007. ISBN 9780131274983. Disponível em: <https://books.google.com.br/books?id=RvBZ-UMpGzIC>.

WANG, C.; DOU, B.; CHEN, H.; SONG, Y.; XU, Y.; DU, X.; ZHANG, L.; LUO, T.; TAN, C. Renewable hydrogen production from steam reforming of glycerol by ni-cu-al, ni-cu-mg, ni-mg catalysts. **International Journal of Hydrogen Energy**, v. 38, p. 3562–3571, 2013. ISSN 03603199.

WANG, P.; LI, J. B.; ZHOU, L.; VAFAI, K. Experimental characterization on pore parameter and the irradiation absorption efficiency of a series sic foam specimens. **Energy Conversion and Management**, Pergamon, v. 212, p. 112795, 5 2020. ISSN 0196-8904.

WANG, Y.; LIU, Q.; SUN, J.; LEI, J.; JU, Y.; JIN, H. A new solar receiver/reactor structure for hydrogen production. **Energy Conversion and Management**, Pergamon, v. 133, p. 118–126, 2 2017. ISSN 0196-8904.

WEHMANN, C. F.; ROCHA, P. A. C.; SILVA, M. E. V. da; ARAÚJO, F. A. A.; CORREIA, D. L. Estudo e aplicação de simulação computacional em problemas simples de mecânica dos fluidos e transferência de calor - parte ii: Problemas clássicos de transmissão de calor. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, Sociedade Brasileira de Física, v. 40, 2018. ISSN 01024744.

ZHANG, H.; SHUAI, Y.; LOUGOU, B. G.; JIANG, B.; YANG, D.; PAN, Q.; WANG, F.; HUANG, X. Effects of foam structure on thermochemical characteristics of porous-filled solar reactor. **Energy**, Elsevier Ltd, v. 239, 1 2022. ISSN 03605442.

ZOLLER, S.; KOEPF, E.; NIZAMIAN, D.; STEPHAN, M.; PATANÉ, A.; HAUETER, P.; ROMERO, M.; GONZÁLEZ-AGUILAR, J.; LIEFTINK, D.; WIT, E. de; BRENDENBERGER, S.; SIZMANN, A.; STEINFELD, A. A solar tower fuel plant for the thermochemical production of kerosene from h₂o and co₂. **Joule**, Cell Press, v. 6, p. 1606–1616, 7 2022. ISSN 25424351.

ANEXO A – PROPRIEDADES DO AR COMO GÁS IDEAL

Na tabela termodinâmica (MORAN *et al.*, 2010) estão expressas as propriedades do ar como gás ideal, com especial interesse nos valores de entalpia em função da temperatura.

TABLE A-22

Ideal Gas Properties of Air

$T(K), h \text{ and } u(kJ/kg), s^\circ (kJ/kg \cdot K)$											
T	h	u	s°	when $\Delta s = 0^1$		T	h	u	s°	when $\Delta s = 0$	
				p_r	v_r					p_r	v_r
200	199.97	142.56	1.29559	0.3363	1707.	450	451.80	322.62	2.11161	5.775	223.6
210	209.97	149.69	1.34444	0.3987	1512.	460	462.02	329.97	2.13407	6.245	211.4
220	219.97	156.82	1.39105	0.4690	1346.	470	472.24	337.32	2.15604	6.742	200.1
230	230.02	164.00	1.43557	0.5477	1205.	480	482.49	344.70	2.17760	7.268	189.5
240	240.02	171.13	1.47824	0.6355	1084.	490	492.74	352.08	2.19876	7.824	179.7
250	250.05	178.28	1.51917	0.7329	979.	500	503.02	359.49	2.21952	8.411	170.6
260	260.09	185.45	1.55848	0.8405	887.8	510	513.32	366.92	2.23993	9.031	162.1
270	270.11	192.60	1.59634	0.9590	808.0	520	523.63	374.36	2.25997	9.684	154.1
280	280.13	199.75	1.63279	1.0889	738.0	530	533.98	381.84	2.27967	10.37	146.7
285	285.14	203.33	1.65055	1.1584	706.1	540	544.35	389.34	2.29906	11.10	139.7
290	290.16	206.91	1.66802	1.2311	676.1	550	554.74	396.86	2.31809	11.86	133.1
295	295.17	210.49	1.68515	1.3068	647.9	560	565.17	404.42	2.33685	12.66	127.0
300	300.19	214.07	1.70203	1.3860	621.2	570	575.59	411.97	2.35531	13.50	121.2
305	305.22	217.67	1.71865	1.4686	596.0	580	586.04	419.55	2.37348	14.38	115.7
310	310.24	221.25	1.73498	1.5546	572.3	590	596.52	427.15	2.39140	15.31	110.6
315	315.27	224.85	1.75106	1.6442	549.8	600	607.02	434.78	2.40902	16.28	105.8
320	320.29	228.42	1.76690	1.7375	528.6	610	617.53	442.42	2.42644	17.30	101.2
325	325.31	232.02	1.78249	1.8345	508.4	620	628.07	450.09	2.44356	18.36	96.92
330	330.34	235.61	1.79783	1.9352	489.4	630	638.63	457.78	2.46048	19.84	92.84
340	340.42	242.82	1.82790	2.149	454.1	640	649.22	465.50	2.47716	20.64	88.99
350	350.49	250.02	1.85708	2.379	422.2	650	659.84	473.25	2.49364	21.86	85.34
360	360.58	257.24	1.88543	2.626	393.4	660	670.47	481.01	2.50985	23.13	81.89
370	370.67	264.46	1.91313	2.892	367.2	670	681.14	488.81	2.52589	24.46	78.61
380	380.77	271.69	1.94001	3.176	343.4	680	691.82	496.62	2.54175	25.85	75.50
390	390.88	278.93	1.96633	3.481	321.5	690	702.52	504.45	2.55731	27.29	72.56
400	400.98	286.16	1.99194	3.806	301.6	700	713.27	512.33	2.57277	28.80	69.76
410	411.12	293.43	2.01699	4.153	283.3	710	724.04	520.23	2.58810	30.38	67.07
420	421.26	300.69	2.04142	4.522	266.6	720	734.82	528.14	2.60319	32.02	64.53
430	431.43	307.99	2.06533	4.915	251.1	730	745.62	536.07	2.61803	33.72	62.13
440	441.61	315.30	2.08870	5.332	236.8	740	756.44	544.02	2.63280	35.50	59.82

1. p_r and v_r data for use with Eqs. 6.41 and 6.42, respectively.

TABLE A-22

(Continued)

<i>T</i> (K), <i>h</i> and <i>u</i> (kJ/kg), <i>s</i> ^o (kJ/kg · K)											
<i>T</i>	<i>h</i>	<i>u</i>	<i>s</i> ^o	when Δ <i>s</i> = 0 ^t		<i>T</i>	<i>h</i>	<i>u</i>	<i>s</i> ^o	when Δ <i>s</i> = 0	
				<i>p_r</i>	<i>v_r</i>					<i>p_r</i>	<i>v_r</i>
750	767.29	551.99	2.64737	37.35	57.63	1300	1395.97	1022.82	3.27345	330.9	11.275
760	778.18	560.01	2.66176	39.27	55.54	1320	1419.76	1040.88	3.29160	352.5	10.747
770	789.11	568.07	2.67595	41.31	53.39	1340	1443.60	1058.94	3.30959	375.3	10.247
780	800.03	576.12	2.69013	43.35	51.64	1360	1467.49	1077.10	3.32724	399.1	9.780
790	810.99	584.21	2.70400	45.55	49.86	1380	1491.44	1095.26	3.34474	424.2	9.337
800	821.95	592.30	2.71787	47.75	48.08	1400	1515.42	1113.52	3.36200	450.5	8.919
820	843.98	608.59	2.74504	52.59	44.84	1420	1539.44	1131.77	3.37901	478.0	8.526
840	866.08	624.95	2.77170	57.60	41.85	1440	1563.51	1150.13	3.39586	506.9	8.153
860	888.27	641.40	2.79783	63.09	39.12	1460	1587.63	1168.49	3.41247	537.1	7.801
880	910.56	657.95	2.82344	68.98	36.61	1480	1611.79	1186.95	3.42892	568.8	7.468
900	932.93	674.58	2.84856	75.29	34.31	1500	1635.97	1205.41	3.44516	601.9	7.152
920	955.38	691.28	2.87324	82.05	32.18	1520	1660.23	1223.87	3.46120	636.5	6.854
940	977.92	708.08	2.89748	89.28	30.22	1540	1684.51	1242.43	3.47712	672.8	6.569
960	1000.55	725.02	2.92128	97.00	28.40	1560	1708.82	1260.99	3.49276	710.5	6.301
980	1023.25	741.98	2.94468	105.2	26.73	1580	1733.17	1279.65	3.50829	750.0	6.046
1000	1046.04	758.94	2.96770	114.0	25.17	1600	1757.57	1298.30	3.52364	791.2	5.804
1020	1068.89	776.10	2.99034	123.4	23.72	1620	1782.00	1316.96	3.53879	834.1	5.574
1040	1091.85	793.36	3.01260	133.3	22.39	1640	1806.46	1335.72	3.55381	878.9	5.355
1060	1114.86	810.62	3.03449	143.9	21.14	1660	1830.96	1354.48	3.56867	925.6	5.147
1080	1137.89	827.88	3.05608	155.2	19.98	1680	1855.50	1373.24	3.58335	974.2	4.949
1100	1161.07	845.33	3.07732	167.1	18.896	1700	1880.1	1392.7	3.5979	1025	4.761
1120	1184.28	862.79	3.09825	179.7	17.886	1750	1941.6	1439.8	3.6336	1161	4.328
1140	1207.57	880.35	3.11883	193.1	16.946	1800	2003.3	1487.2	3.6684	1310	3.944
1160	1230.92	897.91	3.13916	207.2	16.064	1850	2065.3	1534.9	3.7023	1475	3.601
1180	1254.34	915.57	3.15916	222.2	15.241	1900	2127.4	1582.6	3.7354	1655	3.295
1200	1277.79	933.33	3.17888	238.0	14.470	1950	2189.7	1630.6	3.7677	1852	3.022
1220	1301.31	951.09	3.19834	254.7	13.747	2000	2252.1	1678.7	3.7994	2068	2.776
1240	1324.93	968.95	3.21751	272.3	13.069	2050	2314.6	1726.8	3.8303	2303	2.555
1260	1348.55	986.90	3.23638	290.8	12.435	2100	2377.4	1775.3	3.8605	2559	2.356
1280	1372.24	1004.76	3.25510	310.4	11.835	2150	2440.3	1823.8	3.8901	2837	2.175
						2200	2503.2	1872.4	3.9191	3138	2.012
						2250	2566.4	1921.3	3.9474	3464	1.864

Source: Table A-22 is based on J. H. Keenan and J. Kaye, *Gas Tables*, Wiley, New York, 1945.