



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

JOSÉ LUCAS DA SILVA NETO

**PROJETO E PREVISÃO DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR SOLAR DO
TIPO PRATO PARABÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA**

FORTALEZA

2024

JOSÉ LUCAS DA SILVA NETO

PROJETO E PREVISÃO DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR SOLAR DO TIPO
PRATO PARABÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

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)

S58p Silva Neto, José Lucas da.
Projeto e previsão de desempenho de um concentrador solar do tipo prato parabólico para a geração de energia térmica / José Lucas da Silva Neto. – 2024.
119 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. Energia solar. 2. Coletor prato parabólico. 3. Mudanças climáticas. I. Título.

CDD 620.1

JOSÉ LUCAS DA SILVA NETO

PROJETO E PREVISÃO DE DESEMPENHO DE UM CONCENTRADOR SOLAR DO TIPO
PRATO PARABÓLICO PARA A GERAÇÃO DE ENERGIA TÉRMICA

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

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

A Deus.

Aos meus pais, Cesar Rodrigues ("i.m.") e Raimunda William ("i.m.").

A minha esposa Mary Ane.

A minha filha Ana Gabriela.

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter me concedido o conhecimento e a sabedoria para o desenvolvimento da pesquisa.

A minha esposa Mary Ane e a nossa filha Ana Gabriela por estarem ao meu lado em todos os momentos da minha vida.

Ao Prof. Dr. André Valente Bueno pela excelente orientação acadêmica, paciência e ensinamentos que viabilizaram a excelência da pesquisa.

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

Ao meu amigo Elton Perceu da turma de mestrado, pelas reflexões, críticas, sugestões e apoio na consecução da pesquisa.

Aos amigos Claudécir Júnior, Lucas Cruz, Elmo Uchôa, Jhoni Schembek, Helton Carlos, Guilherme Fontenele, Renno Sousa, João Guilherme, Lara Oliveira, Enrique Lima, Caio Monteiro, Ana Beatriz, Caio Thomas, Lucas Duarte, Anderson Vasconcelos, Felipe Frutuoso, João Marcos, Laércio e Bonfim, componentes da equipe técnica do LHMT pelos esforços e apoio no desenvolvimento do projeto de pesquisa.

"Àquele que fez os grandes luminares, o seu amor dura para sempre! o Sol para governar o dia, o seu amor dura para sempre! a Lua e as estrelas para governarem a noite; o seu amor dura para sempre!...Um é o esplendor do Sol, outro o da Lua, e outro o das estrelas; e as estrelas diferem em esplendor umas das outras."
(Sl 136:7-9; 1 Co 15:41)

RESUMO

As recorrentes alterações climáticas e seus efeitos prenunciados pela comunidade científica, conforme estudos técnicos realizados ao longo de décadas, aliado ao monitoramento dos indicadores de controle dos sistemas ecológicos e socioeconômicos, confirmam os impactos catastróficos sobre o meio ambiente e a vida humana em diversas regiões de vários países nos cinco continentes do globo terrestre. Segundo dados da *World Meteorological Organization* (Organização Meteorológica Mundial) (WMO), a temperatura média global (até outubro de 2023) próxima à superfície terrestre foi cerca de $1,40 \pm 0,12^{\circ}\text{C}$ acima da média de 1850–1900 (pré-industrial), sendo o ano de 2023 o mais quente no registro observacional dos últimos 174 anos.

Neste contexto, o espectro das energias renováveis, a energia solar se apresenta como um recurso abundante na natureza, sendo uma fonte economicamente acessível com um potencial energético que supera a somatória da capacidade de geração de energia de todas as reservas de combustíveis não renováveis do planeta Terra, não produzindo gases de efeito estufa (GEE) que causam o aquecimento global e por consequência as mudanças climáticas.

Esta pesquisa foi desenvolvida na base do projeto e análise de desempenho de um concentrador solar do tipo prato parabólico para a geração de energia térmica com simulações computacionais para a coleta de dados das deformações e deslocamentos do conjunto de sustentação do prato parabólico nas posições de inclinação de 0° , 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° e 180° e as eficiências óticas considerando desvios dos raios solares de $0,25^{\circ}$, $0,5^{\circ}$, $0,75^{\circ}$ e 1° na cavidade do receptor. A maior deformação vertical do conjunto de sustentação foi de 1,48 mm; e a deformação horizontal de 0,29 mm; o deslocamento focal de 9,02 mm e abertura mínima necessária da cavidade do receptor de 12,72 mm, na inclinação de 30° do concentrador solar, onde a priori, atendeu os requisitos de projeto. Quanto as eficiências óticas um desvio dos raios solares em $0,5^{\circ}$ decaiu a eficiência para 65,3%.

Palavras-chave: Energia solar. Coletor prato parabólico. Mudanças climáticas.

ABSTRACT

The recurring climate changes and their effects predicted by the scientific community, according to technical studies carried out over decades, combined with the monitoring of control indicators of ecological and socioeconomic systems, confirm the catastrophic impacts on the environment and human life in several regions of several countries on the five continents of the globe.

According to data from WMO, the average global temperature (up to October 2023) near the Earth's surface was about $1.40 \pm 0.12^{\circ}\text{C}$ above the 1850–1900 (pre-industrial) average, with 2023 being the warmest year in the observational record of the last 174 years.

In this context, in the spectrum of renewable energies, solar energy is an abundant resource in nature, being an economically accessible source with an energy potential that exceeds the sum of the energy generation capacity of all non-renewable fuel reserves on planet Earth, without producing greenhouse gases (GHG) that cause global warming and consequently climate change. This research was developed based on the design and performance analysis of a parabolic dish solar concentrator for the generation of thermal energy with computer simulations to collect data on the deformations and displacements of the parabolic dish support assembly in the tilt positions of 0° , 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° and 180° and the optical efficiencies considering deviations of the solar rays of 0.25° , 0.5° , 0.75° and 1° in the receiver cavity. The largest vertical deformation of the support assembly was 1.48189 mm; and the horizontal deformation was 0.29476 mm; the focal displacement was 8.94549 mm and the minimum required opening of the receiver cavity was 18.01248 mm, at the 30° inclination of the solar concentrator, which a priori met the design requirements. As for optical efficiencies, a deviation of the solar rays by 0.5° decreases the efficiency to 65.3

Keywords: Solar energy. Parabolic dish collector. Climate change.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Aumento da Temperatura Global	18
Figura 2 – Emissões de GEE	20
Figura 3 – Custos e participação de energia solar no mercado	21
Figura 4 – Representação esquemática CSP	21
Figura 5 – Tipos de sistema CSP	22
Figura 6 – Utilidades da energia solar	25
Figura 7 – Camadas do Sol	26
Figura 8 – Relações dimensionais Sol - Terra	27
Figura 9 – Mapa de irradiação solar global	28
Figura 10 – Trajetória elíptica da Terra em relação ao Sol	29
Figura 11 – Variação da Irradiância Extraterrestre	30
Figura 12 – Componentes Radiação Solar	31
Figura 13 – Variação da massa de ar terrestre	32
Figura 14 – Esfera celeste, plano horizontal e hemisfério visível	33
Figura 15 – Variação do plano da Trajetória da Terra em relação ao Sol	34
Figura 16 – O movimento de rotação da Terra e a duração dos dias	35
Figura 17 – Variação da altura do Sol em função do ângulo azimute e da latitude do observador a -32°	36
Figura 18 – Variação da altura do Sol em função do ângulo azimute e da latitude do observador a 0°	36
Figura 19 – Variação da altura do Sol em função do ângulo azimute e da latitude do observador a 90°	37
Figura 20 – Ângulos notáveis de um observador no centro da Terra em relação ao Sol	38
Figura 21 – Ângulos notáveis de um observador e de uma superfície na Terra em relação ao Sol	39
Figura 22 – Localização e trajetória do Sol	43
Figura 23 – Mecanismo rastreador de um eixo	44
Figura 24 – Mecanismo rastreador de dois eixos	44
Figura 25 – Sistema controlador passivo	45
Figura 26 – Sistema controlador eletro-óptico	45
Figura 27 – Concentrador tipo calha parabólica (PTC)	47

Figura 28 – Concentrador tipo disco parabólico(PDC)	48
Figura 29 – Torre de energia Solar (PTS)	48
Figura 30 – Refletor Linear Fresnel (LFR)	49
Figura 31 – Piranômetro com pilha termoelétrica	50
Figura 32 – Piranômetro com banda de sombra para medição da radiação solar difusa . .	51
Figura 33 – Pireliômetro para medição de radiação solar direta	52
Figura 34 – Dimensões de uma parábola	53
Figura 35 – Curvas de uma parábola para um foco em comum com o mesmo diâmetro .	53
Figura 36 – Software parábola calculator 2.0	54
Figura 37 – Refletividade de alguns Materiais	55
Figura 38 – Balanço energético do tipo prato parabólico	57
Figura 39 – Número de projetos de CSP instalados desde 2004	61
Figura 40 – Malha com elementos finitos e respectivos nós	65
Figura 41 – Composição do concentrador solar	74
Figura 42 – Cilindro central de união dos arcos de sustentação do prato	78
Figura 43 – Arcos de sustentação do prato parabólico	78
Figura 44 – Simulação estrutural dos arcos de sustentação do prato parabólico	79
Figura 45 – Simulação de flexão dos arcos de sustentação do prato parabólico	79
Figura 46 – Simulação estrutural do subconjunto cilindro central e arcos de sustentação do prato parabólico	79
Figura 47 – Malha com anéis de alumínio para a sustentação do prato	80
Figura 48 – Simulação estrutural da Malha para a sustentação do prato	80
Figura 49 – Prato parabólico	81
Figura 50 – Projeto do sistema de molde do prato parabólico	82
Figura 51 – Suporte base do concentrador solar	84
Figura 52 – Simulação estrutural da coluna e do braço do concentrador solar	85
Figura 53 – Caixa do sistema motoredutor do concentrador solar	85
Figura 54 – Receptor e simulação estrutural do suporte	86
Figura 55 – Conjunto de arcos, malha e receptor	88
Figura 56 – Malha do conjunto de arcos, malha e suportes do receptor	89
Figura 57 – Força concentrada de 30 kg aplicada na face do receptor	90
Figura 58 – Condições de contorno de arcos, malha e suportes do receptor	90

Figura 59 – Modelo físico de giro angular do concentrador	91
Figura 60 – Tensões tridimensionais em um elemento	92
Figura 61 – Nível de deformação de um arco	96
Figura 62 – Posição e movimentação do concentrador	98
Figura 63 – Representação Gráfica pontos A, B e F da parábola	99
Figura 64 – Deformação máxima vertical do ponto A em b2 e b5	100
Figura 65 – Deformação horizontal do ponto A em b2 e b5	101
Figura 66 – Deslocamento vertical do ponto focal (F)	103
Figura 67 – Diâmetro mínimo da cavidade do receptor	105
Figura 68 – Desvio de $0,25^\circ$	105
Figura 69 – Desvio de $0,5^\circ$	106
Figura 70 – Desvio de $0,75^\circ$	106
Figura 71 – Desvio de $1,0^\circ$	107

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Dados técnicos de projeto do prato parabólico - Software calculator 2.0 . . .	54
Tabela 2 – Especificações técnicas de projeto do concentrador solar	75
Tabela 3 – Fabricação do molde do prato parabólico	82
Tabela 4 – Descritivo dos componentes do suporte base do concentrador solar	84
Tabela 5 – Descritivo da caixa do sistema motoredutor do concentrador solar	86
Tabela 6 – Propriedades da liga de alumínio	88
Tabela 7 – Propriedades do aço estrutural	88
Tabela 8 – Discretização da geometria do objeto de pesquisa	89
Tabela 9 – Coordenadas do concentrador sem deformação	99
Tabela 10 – Deformação máxima vertical do ponto A	99
Tabela 11 – Deformação horizontal calculada do ponto A	101
Tabela 12 – Coordenadas do ponto A para b1, b2 e b3	102
Tabela 13 – Coordenadas do ponto A para b4, b5 e b6	102
Tabela 14 – Deslocamento vertical focal do ponto F	103
Tabela 15 – Abertura mínima necessária (D)	104
Tabela 16 – Projetos CSP instalados no mundo	113

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CSP	<i>Concentrated Solar Power</i> (Concentrador Energia Solar)
GEE	Gases do Efeito Estufa
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
LFR	<i>Reflector Linear Fresnel</i> (Refletor Linear Fresnel)
LHMT	Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas da UFC
PDC	<i>Parabolic dish collectors</i> (Coletores Pratos Parabólicos)
PEM	<i>Proton exchange membrane</i> (Membrana de Troca de Prótons)
PTC	<i>Parabolica Trough Collectors</i> (Coletores de Calha Parabólica)
SPT	<i>Solar Power Tower</i> (Torre de Energia Solar)
UFC	Universidade Federal do Ceará
WMO	<i>World Meteorological Organization</i> (Organização Meteorológica Mundial)
WRC	<i>World Radiation Centre</i> (Centro Mundial de Radiação)

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$	graus Celsius
CO_2	Dióxido de carbono
g / s	Grama por segundo
GWh	Gigawatt hora
K	Kelvin
kg/m^2	Quilograma por metro quadrado
kg/m^3	Quilograma por metro cúbico
kg/s	Quilograma por segundo
kg/h	Quilograma por hora
kg/dia	Quilograma por dia
kg/dia	Quilograma por dia
kW	Quilowatt
kWh/g	Quilowatt hora por grama
kWh/m^2	Quilowatt hora por metro quadrado
LH_2	Hidrogênio liquefeito
m	Metro
mm	Milímetro
N/m^2	Newton hora por metro quadrado
R	Raio do Sol
UA	Unidade astronômica
W/m^2	Watt por metro quadrado

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	25
2.1	Potencial energético do Sol	25
2.2	Fundamentos da radiação solar	28
2.2.1	<i>A constante solar</i>	29
2.2.2	<i>As componentes da radiação solar</i>	31
2.3	A geometria solar	32
2.3.1	<i>A esfera celestial</i>	33
2.3.1.1	<i>Os movimentos de translação e rotação da Terra</i>	34
2.3.2	<i>A posição e a aparente trajetória do Sol no céu</i>	37
2.3.2.1	<i>Ângulos de um observador na Terra em relação ao Sol</i>	37
2.3.2.2	<i>Ângulos de um observador e de uma superfície na Terra em relação ao Sol</i>	38
2.3.3	<i>Sistemas de coordenadas horizontais</i>	39
2.3.3.1	<i>Cálculo da elevação ou altura solar</i>	40
2.3.3.2	<i>Cálculo do ângulo azimutal do Sol</i>	42
2.4	Sistemas de rastreamento do Sol	42
2.4.1	<i>Sistemas do número de eixos rastreadores</i>	43
2.4.2	<i>Tipos de controladores dos mecanismos rastreadores</i>	43
2.4.2.1	<i>Sistemas controladores passivos</i>	44
2.4.2.2	<i>Sistema eletro-óptico</i>	45
2.4.2.3	<i>Sistema controlador microprocessado</i>	46
2.5	Principais Tecnologias de CSP	46
2.5.1	<i>Concentrador do tipo calha parabólica</i>	47
2.5.2	<i>Concentrador tipo prato parabólico</i>	47
2.5.3	<i>Concentrador tipo torre de energia solar</i>	48
2.5.4	<i>Concentrador tipo refletor linear Fresnel</i>	49
2.6	Instrumentação para medição das grandezas da energia solar	49
2.6.1	<i>Piranômetro</i>	50
2.6.2	<i>Pireliômetro</i>	51
2.7	Projeto teórico de um CSP do tipo prato parabólico	51

2.7.1	<i>A geometria do prato parabólico</i>	52
2.7.2	<i>Espelhos refletores do prato parabólico</i>	55
2.8	Indicadores de Performance dos CSP	56
2.8.1	<i>Fator de concentração</i>	56
2.8.2	<i>Calculo da eficiência térmica do CSP</i>	57
2.8.2.1	<i>Eficiência térmica do concentrador</i>	57
2.8.2.2	<i>Eficiência térmica do receptor</i>	58
2.8.3	<i>Eficiência ótica do concentrador</i>	59
2.8.4	<i>Cálculo do calor útil</i>	59
2.8.5	<i>Cálculo do calor ótico</i>	59
2.8.6	<i>Cálculo das perdas de calor</i>	60
2.9	Projetos de concentradores de energia solar instalados no mundo	60
2.9.1	<i>Tecnologia de CSP mais utilizadas</i>	60
2.9.2	<i>Condição operacional</i>	61
2.9.3	<i>Classificação de operação das usinas por país</i>	61
2.9.4	<i>Número de projetos instalados por ano</i>	61
2.10	Métodos de Resolução de problemas de Engenharia	62
2.10.1	<i>Métodos analíticos ou teóricos</i>	62
2.10.2	<i>Métodos experimentais</i>	62
2.10.3	<i>Métodos numéricos</i>	62
2.11	Método dos elementos finitos	63
2.11.1	<i>Origem Método dos elementos finitos</i>	63
2.11.2	<i>Principais características do MEF</i>	64
2.11.3	<i>Aplicação do MEF</i>	64
2.11.4	<i>Bases de MEF</i>	64
2.11.5	<i>Procedimento geral de análise do MEF</i>	64
2.11.5.1	<i>Decisões preliminares</i>	65
2.11.5.2	<i>Pré processamento</i>	65
2.11.5.3	<i>Processamento</i>	66
2.11.5.4	<i>Pós-processamento</i>	68
2.12	Revisão Bibliográfica	69
3	METODOLOGIA	74

3.1	Projeto do concentrador solar prato parabólico	74
3.1.1	<i>Memorial de cálculo do projeto do prato parabólico</i>	75
3.2	Projeto dos componentes do concentrador de energia solar	77
3.2.1	<i>O conjunto do prato parabólico</i>	77
3.2.1.1	<i>Cilindro central</i>	77
3.2.1.2	<i>Arcos de sustentação do prato parabólico</i>	77
3.2.1.3	<i>Malha com anéis de alumínio para sustentação do prato</i>	79
3.2.1.4	<i>Prato parabólico</i>	81
3.2.1.5	<i>Espelhos do prato parabólico</i>	81
3.2.1.6	<i>Modelagem do prato parabólico</i>	81
3.2.2	<i>O conjunto do sistema de sustentação e movimentação do concentrador solar</i>	83
3.2.2.1	<i>Coluna, base e braço do prato parabólico</i>	84
3.2.2.2	<i>Projeto da caixa do sistema motoredutor do concentrador solar</i>	85
3.2.2.3	<i>Receptor</i>	86
3.3	Procedimento geral das simulações computacionais e análises	87
3.3.1	<i>Geração da geometria do concentrador solar</i>	87
3.3.2	<i>Definição das propriedades do material</i>	87
3.3.3	<i>Elaboração da malha do modelo de elementos finitos</i>	88
3.3.4	<i>Aplicação das cargas e condições de contorno</i>	89
3.3.4.1	<i>Quanto a aplicação das cargas</i>	89
3.3.4.2	<i>Quanto as condições de contorno</i>	90
3.3.5	<i>Análise estrutural linear estática do concentrador solar</i>	91
3.3.5.1	<i>Equações governantes</i>	92
3.3.5.2	<i>Equações de equilíbrio</i>	93
3.3.5.3	<i>Equações da relação deformação-deslocamento</i>	94
3.3.5.4	<i>Equações da relação tensão-deformação</i>	94
3.3.5.5	<i>Matriz constitutiva para um material isotrópico em 3D</i>	95
3.3.5.6	<i>Matriz de rigidez do elemento finito</i>	95
3.3.6	<i>Análise e interpretação dos resultados</i>	96
3.3.7	<i>Otimização do projeto</i>	97
3.3.8	<i>Validação dos resultados</i>	97
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	98

4.1	Deformação máxima vertical do ponto A	99
4.2	Deformações horizontais para o ponto A	100
4.3	Coordenadas x e y do ponto A	101
4.4	Deslocamento vertical do ponto focal (F)	102
4.5	Diâmetro mínimo necessário de D do receptor	104
4.6	Rendimento ótico para erros de rastreamento do Sol	105
5	CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS	108
	REFERÊNCIAS	109
6	ANEXO A	113

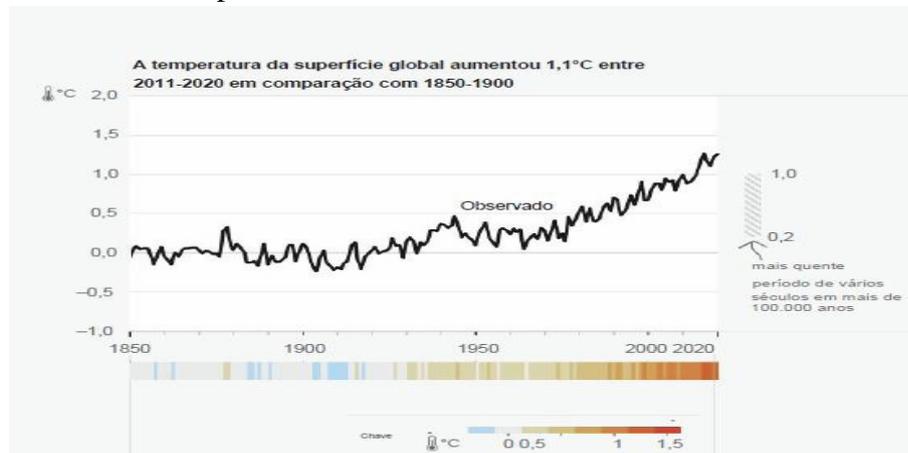
1 INTRODUÇÃO

As recorrentes alterações climáticas e seus efeitos denunciados pela comunidade científica, conforme estudos técnicos realizados ao longo de décadas, aliado ao monitoramento dos indicadores de controle dos sistemas ecológicos e socioeconômicos, confirmam os impactos catastróficos sobre o meio ambiente e a vida humana em diversas regiões de vários países nos cinco continentes do globo terrestre.

O relatório LEE *et al.* (2023) *Intergovernmental Panel on Climate Change* (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas) (IPCC) em sua sexta publicação, nomeia em síntese como trágicos efeitos das alterações climáticas para o meio ambiente e para a subsistência humana, o aumento da mortalidade humana e da incidência de morbidades físicas, a baixa produtividade das atividades laborais, a perda da biodiversidade marinha nos oceanos e nas florestas, uma maior frequência de intensas chuvas e inundações, deslizamentos de terra, uma maior formação de ciclones e furacões tropicais, a escassez de água com o aumento de terras áridas, a elevação do nível do mar com a destruição de infraestruturas das cidades costeiras, o aumento na transmissão de doenças físicas, e dos distúrbios na saúde mental das pessoas.

O aquecimento global caracterizado na Figura 1 pelo aumento da temperatura da superfície do globo terrestre na década de 2011-2020 em cerca de 1,1°C em relação a temperatura média no período de 1850–1900, mais precisamente, [1,09°C (0,95 a 1,20)°C], com aumento maior sobre a Terra [1,59°C (1,34 a 1,83)°C] em relação ao oceano [0,88°C (0,68 a 1,01)°C], contribuiu significativamente para a ampliação e agravamento dos efeitos indesejáveis das mudanças climáticas (LEE *et al.*, 2023).

Figura 1 – Aumento da Temperatura Global



Fonte: AR6 IPCC (2023)

Segundo dados da WMO (2023) *World Meteorological Organization*, (Organização Meteorológica Mundial) a temperatura média global (até outubro de 2023) próxima à superfície terrestre foi cerca de $1,40 \pm 0,12^{\circ}\text{C}$ acima da média de 1850–1900 (pré-industrial), sendo o ano de 2023 o mais quente no registro observacional dos últimos 174 anos.

Esta condição relatada pela WMO coloca sobre os governos das nações a nível mundial e suas respectivas sociedades o desafio de implementar políticas públicas e ações imediatas permanentes para conter o avanço do aquecimento global e suas desastrosas consequências que ameaçam a própria existência da humanidade.

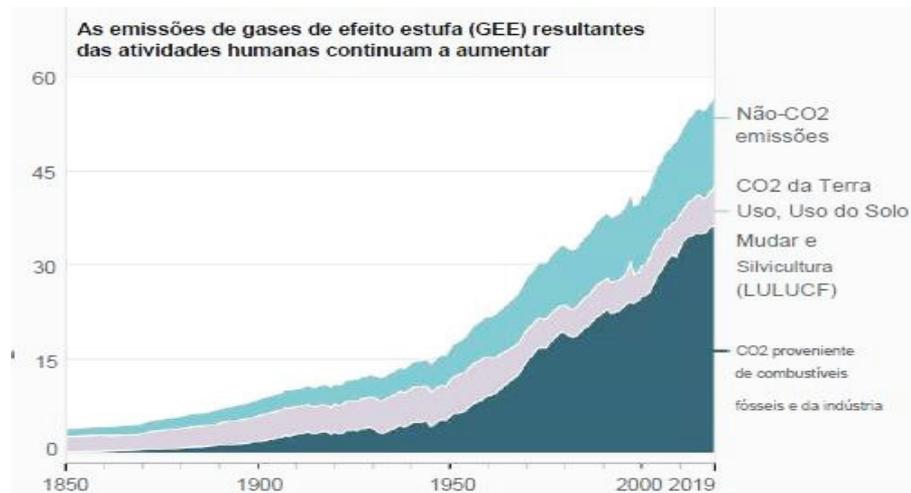
Em busca da mitigação dos efeitos do aquecimento global, e por conseguinte das mudanças climáticas diversos pactos e acordos ambientais em fóruns mundiais tem sido realizados por representações oficiais de governos dos países de todo o mundo, como o acordo de Paris em 2015 que estabeleceu como meta a manutenção do aumento da temperatura média global abaixo dos $2,0^{\circ}\text{C}$ com a busca de limitar este aumento a $1,5^{\circ}\text{C}$ acima dos níveis pré-industriais de 1850-1900, e além disso, adotar a estratégia da disponibilização de recursos financeiros por parte dos países desenvolvidos de no mínimo US\$ 100 bilhões de dólares por ano em favor dos países em desenvolvimento para a implementação de políticas de transição energética para matrizes de energias limpas, visando a diminuição da poluição ambiental e a estabilização das alterações climáticas (ONU, 2015).

Apesar dos esforços para o uso de energias limpas, o atual desenho das matrizes energéticas dos países signatários do acordo de Paris 2015, com raras exceções, predomina com o uso contínuo da queima de combustíveis fósseis nas atividades econômicas e processos industriais aumentando assim a emissão e concentração de Gases do Efeito Estufa (GEE), promovendo em curto prazo temporal o agravamento do aquecimento global e suas respectivas consequências para a sociedade mundial, algumas já plenamente consolidadas. Logo, até este momento, podemos observar que não houve o cumprimento das metas preconizadas pelos governos mundiais no acordo de Paris, especialmente os investimentos monetários.

As emissões de GEE provenientes da queima de combustíveis fósseis e da indústria tem se tornado cada vez mais resiliente e crescente (LEE *et al.*, 2023). A Figura 2 mostra claramente que ao longo dos anos, por décadas, as emissões de GEE no mundo é ascendente, promovendo o aumento do aquecimento global cada vez mais prejudicial ao equilíbrio ecológico e a hígidez física e mental da vida humana, apesar dos esforços de mitigação e adaptação das matrizes energéticas de vários países para a energia verde, consubstanciada na menor utilização

de combustíveis fósseis nos processos industriais.

Figura 2 – Emissões de GEE



Fonte: AR6 IPCC (2023)

Uma efetiva decisão política conjunta de governos dos países no mundo é crucial para o redesenho da matriz energética mundial, onde paulatinamente até a sua predominância total, o uso de energias renováveis verdes garantirá as emissões praticamente a zero de GEE, substituindo as fontes primárias dos combustíveis fósseis (petróleo, gás natural, carvão mineral, etc.) geradoras de poluição e aumento de temperatura do meio ambiente.

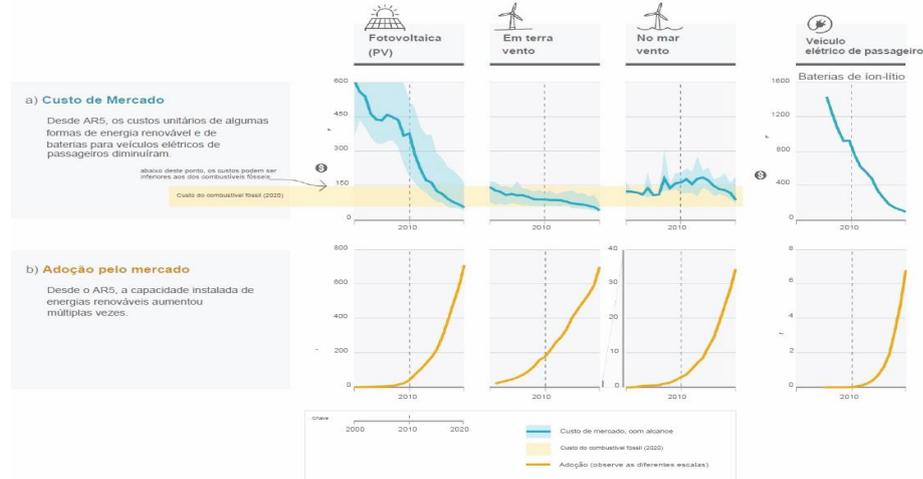
No espectro das energias renováveis, a energia solar se apresenta como um recurso abundante na natureza, sendo uma fonte economicamente acessível com um potencial energético que supera a somatória da capacidade de geração de energia de todas as reservas de combustíveis não renováveis do planeta Terra, pois, a quantidade de radiação solar que atinge o nosso planeta anualmente é de aproximadamente 7.500 vezes o consumo de energia que a população mundial necessita agregando-se a esta escala de produção energética que se apenas 0,1% da energia solar disponível fosse convertida numa eficiência de 10%, a energia gerada seria quatro vezes maior que toda a capacidade mundial de geração de energia (VICHI; MANSOR, 2009).

Considerando o desenvolvimento das pesquisas e a produção de energia renovável em larga escala, esta tem se tornado cada vez mais competitiva quanto aos seus custos de fabricação, montagem e manutenção, bem como, gradativamente tem alcançado uma melhor eficiência energética, se apresentando como a principal alternativa da engenharia para a emissão zero de CO_2 , e por conseguinte, como fator contributivo para a redução do aquecimento global.

A Figura 3 demonstra que os custos de mercado das formas de energia renovável experimenta uma tendência de redução contínua podendo atingir custos inferiores a energia

oriunda da queima de combustíveis fósseis, e de outra maneira, a capacidade instalada de energia renovável vem aumentando numa escala de múltiplas vezes (LEE *et al.*, 2023).

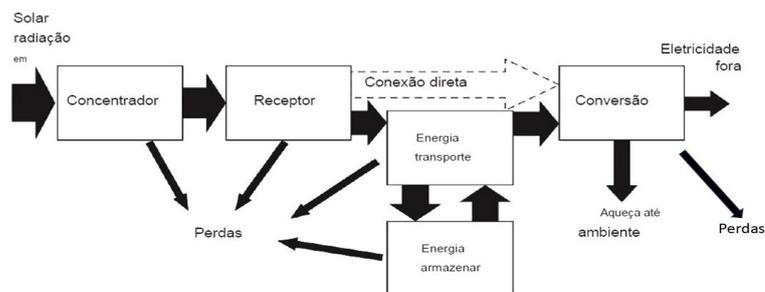
Figura 3 – Custos e participação de energia solar no mercado



Fonte: AR6 IPCC (2023)

Os sistemas de *Concentrated Solar Power* (Concentrador Energia Solar) (CSP) tem como princípio base a conversão da energia solar em energia térmica (calor), onde a radiação solar é captada por um concentrador que remete-a para um receptor gerando energia térmica que pode ser convertida diretamente para uma forma final de energia (eletricidade), ou transportada indiretamente por meio de um fluido (água) para a conversão em uma energia finalística desejada. Considera-se também no processo CSP que existem perdas nas fronteiras de conversão de energia, e também, a possibilidade de armazenamento da energia gerada para uso em outros momentos de demandas de conversão energética (LOVEGROVE; STEIN, 2012). A Figura 4 mostra a representação esquemática dos componentes de um sistema de energia solar térmica.

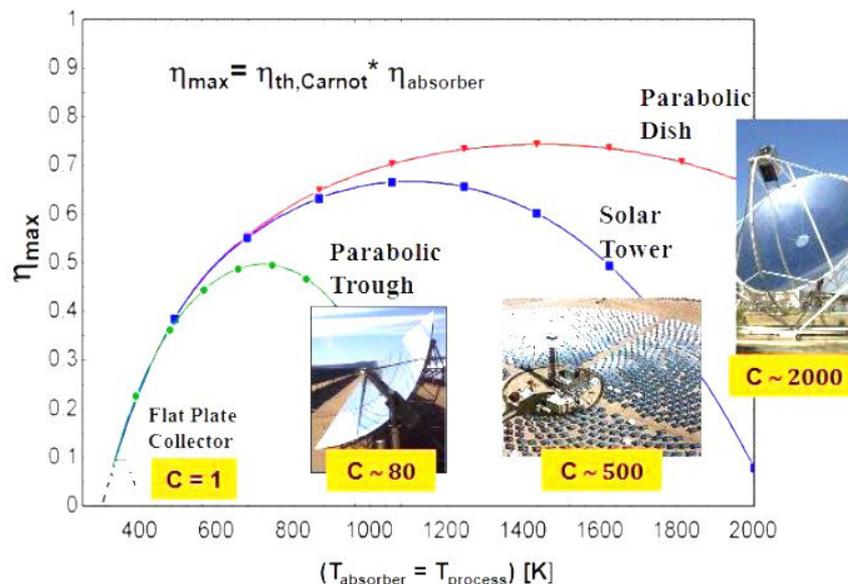
Figura 4 – Representação esquemática CSP



Fonte: Lovegrove;Stein (2012)

Considerando a abundância, a acessibilidade, o potencial e a eficiência energética, bem como, a geração de energia térmica (calor) dos sistemas de energia solar concentrada CSP, estes podem ser do tipo coletor linear fresnel, calha parabólica, torre solar e prato parabólico, tendo todos em comum a conversão da energia solar em energia térmica (calor) e a partir desta conversão os objetivos finalísticos para a geração de energia elétrica, dessalinização e tratamento biológico da água, cozimento de alimentos, aquecimento de ambientes, secagem de alimentos e outras utilidades (ARMIJO; SHINDE, 2016). A Figura 5 apresenta os principais tipos de CSP com as suas respectivas taxas de concentração e eficiências.

Figura 5 – Tipos de sistema CSP



Fonte: SANDIA REPORT (2016)

A pesquisa contemplou como objeto de estudo o sistema de energia solar concentrada do tipo prato parabólico consolidada na avaliação dos fatores de viabilidade econômica quanto aos custos de fabricação, montagem e manutenção deste sistema, sua maior capacidade de concentração solar e eficiência energética (cerca de 30%), e especialmente pelas condições do meio ambiente local da Universidade Federal do Ceará (UFC) para a execução funcional do experimento, bem como, a disponibilidade de recursos humanos habilitados e de engenharia do Laboratório de Hidrogênio e Máquinas Térmicas da UFC (LHMT) para a integral realização da pesquisa com grande probabilidade de sucesso técnico e operacional.

A pesquisa obedecendo aos parâmetros técnicos e operacionais planejados foi realizada com o seguinte objetivo geral:

- Projetar o concentrador solar para alcançar a geração de energia térmica a nível de $800^{\circ}C$

no receptor do concentrador solar, suficiente para a produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor.

No âmbito da consecução da pesquisa, visando o desenvolvimento e o aperfeiçoamento do sistema CSP do tipo prato parabólico foram delineados os seguintes objetivos específicos:

- Projetar, fabricar, montar e operar um concentrador de energia solar do tipo prato parabólico com diâmetro de 3 m;
- Avaliar e calcular por simulação utilizando-se de sistemas computacionais a deformação e deslocamentos verticais e horizontais do prato parabólico submetido a uma carga de 30 kg em diversos ângulos de operação no seguimento do Sol;
- Verificar a influência dos resultados dos deslocamentos do ponto focal na eficiência ótica do sistema de captação de energia solar;
- Contemplar novas oportunidades de pesquisa científica e desenvolvimento técnico para o sistema concentrador de energia solar do tipo prato parabólico a partir do estudo, resultados e conclusões do objeto da pesquisa.

A relevância da pesquisa esta ancorada primordialmente no benefício para o meio ambiente e para a subsistência humana com ganhos sociais e econômicos, onde esta tecnologia permitirá a descarbonização dos processos das diversas atividades humanas, contribuindo para a redução do aquecimento global e de suas maléficas consequências. No aspecto técnico científico esta pesquisa vai subsidiar o desenvolvimento e aperfeiçoamento da tecnologia de geração de energia térmica através do sistema concentrador de energia solar do tipo prato parabólico e na viabilização da produção de hidrogênio verde por reforma a vapor com excelência na eficiência operacional.

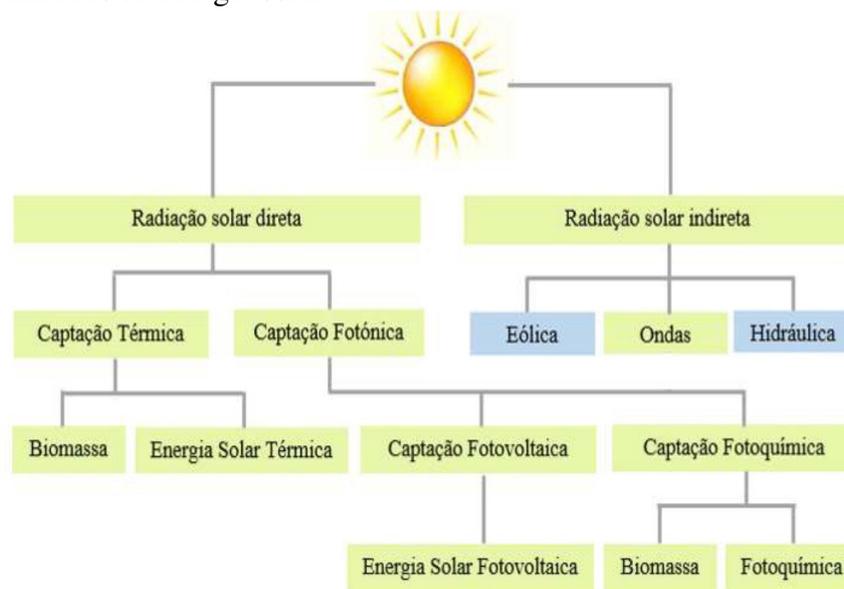
Esta dissertação apresenta esta introdução contextualizando a situação problema, o desvelar do objeto de estudo com o delineamento de seus objetivos, uma fundamentação teórica abordando de uma forma progressiva racional os conceitos gerais mais importantes para a compreensão do desenvolvimento da pesquisa, a metodologia do estudo realizado formatado no projeto, fabricação e montagem do concentrador de energia solar, na identificação dos instrumentos para medição das grandezas desejadas e das normas técnicas utilizadas, e nos procedimentos de ensaios experimentais com simulações computacionais do objeto de estudo, de forma, a propiciar aos interessados a fiel reprodução do experimento. Consolidando esta pesquisa foram coletados os resultados de dados técnicos e operacionais com os desdobramentos

das discussões segundo os objetivos delineados, bem como, as conclusões deste estudo com a identificação das oportunidades de avanço tecnológico e no desenvolvimento de novas futuras pesquisas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os fundamentos e princípios da energia solar são indispensáveis para a plena compreensão da aplicação das tecnologias que utilizam a latente energia do Sol para a geração de eletricidade, bem como, outras modalidades de energias, além de outras utilidades. A Figura 6 ilustra os macroprocessos do uso da energia solar.

Figura 6 – Utilidades da energia solar



Fonte: NOGUEIRA, H,2010

Esta seção apresenta o conhecimento base do potencial energético do Sol, os fundamentos da radiação solar, a geometria solar, as principais tecnologias de CSP, a instrumentação para medição das grandezas de energia solar, os indicadores de performance dos CSP, os projetos de concentradores de energia solar instalados no mundo e a revisão bibliográfica consolidada nos estudos correlatos de CSP de proeminentes pesquisadores.

2.1 Potencial energético do Sol

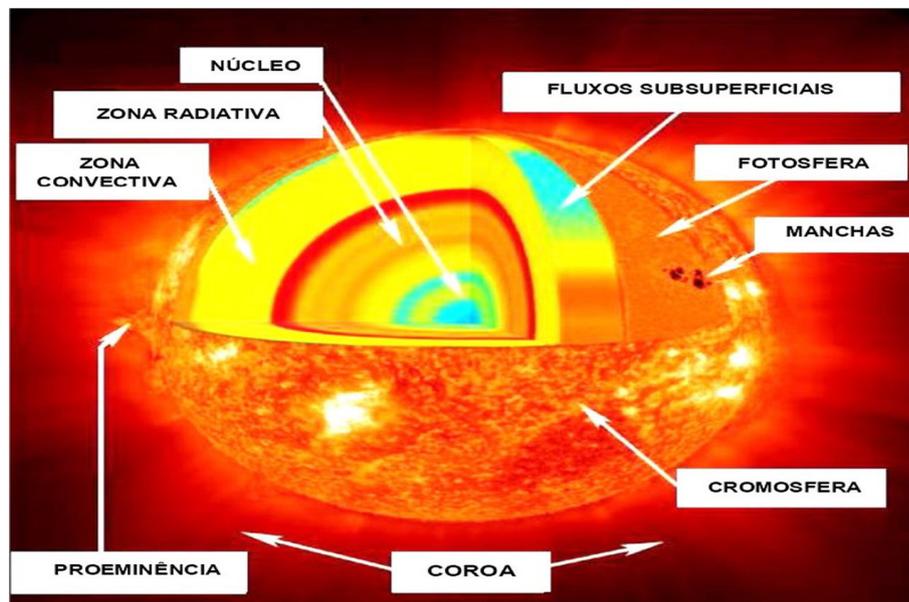
O Sol é um astro flamejante posicionado no centro do sistema solar, ao qual, o planeta Terra está inserido recebendo continuamente desta radiante estrela a luz e calor. A relevante importância da radiação solar é incontestável por ser a origem de quase todas as energias conhecidas no mundo e sustentar quase toda a vida na Terra, especialmente, através do processo da fotossíntese (síntese da glicose a partir da luz solar, dióxido de carbono e água) e pelas transformações de clima e tempo, como por exemplo, as energias dos ventos e das marés

oceânicas por serem influenciadas pelos diversos gradientes de temperaturas em várias regiões do planeta Terra (KALOGIROU, 2009).

A energia produzida no interior do Sol que transcende para o espaço celeste, se concentra em três zonas (nuclear, central e convectiva), sendo gerada primeiramente na zona nuclear que contém 40% da massa total solar, 15% de seu volume e 90% da energia gerada, cuja abrangência métrica desta zona se estende entre 0 e 0,23 do seu raio (R) com temperaturas de 8 a $40 \cdot 10^6$ K e densidade 10^5 kg/m³. Na zona central a 0,7 R do centro do Sol a temperatura chega a 130.000 K numa densidade de 70 kg/m³ e na zona convectiva de 0,7 a 1 de seu raio (R), a temperatura estimada é de 5.000 K com densidade de 10^{-5} kg/m³ (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

O Sol possui 6 camadas, conforme apresentado na Figura 7 descritas como núcleo, zona radiativa, zona convectiva, fotosfera, cromosfera e coroa, das quais, no núcleo acontece a geração de energia, por meio de reações termonucleares, que através de processos convectivos se propagam atravessando as fronteiras destas camadas até ao espaço sideral (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 7 – Camadas do Sol



Fonte: Pinho, Galdino (2014)

A composição mássica do Sol é constituída de 80% de hidrogênio, 20% de hélio e 0,1% de outros elementos, sendo a energia solar gerada a partir de reações termonucleares oriundas da transformação de 4 prótons de hidrogênio em 2 prótons + 2 nêutrons de hélio conhecida como partícula alfa, tendo ainda como resultantes desta reação termonuclear 2 pósitrons com

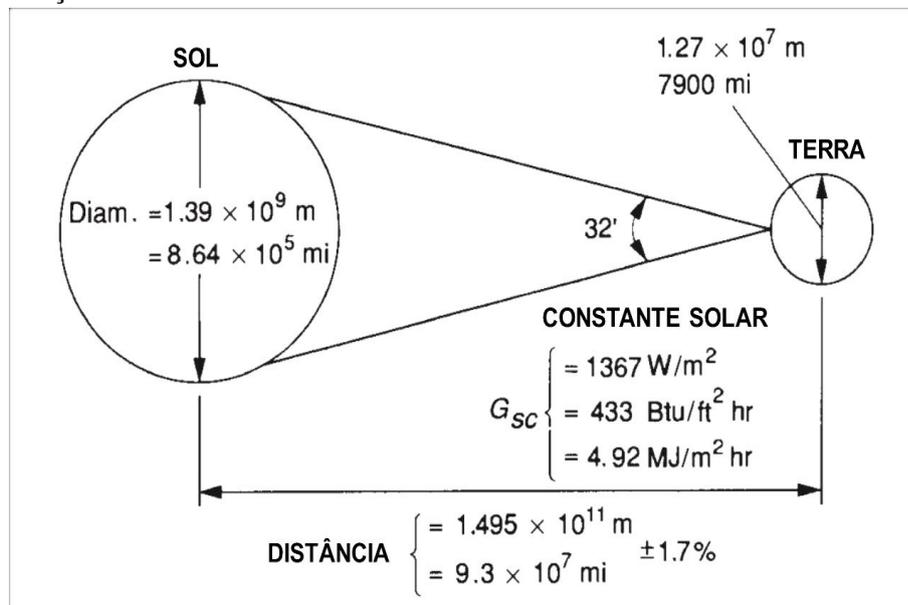
energia positiva e 2 neutrinos, sendo a massa perdida nesta transformação convertida em energia solar (QUASCHNING, 2014).

Considerando o hidrogênio como o elemento químico base desta reação termonuclear, o Sol possui um quantitativo de hidrogênio suficiente para alimentar as reações nucleares por mais 5 bilhões de anos terrestres, caracterizando-se como uma fonte de energia abundante e inesgotável (PINHO; GALDINO, 2014).

Em termos de potencial energético a taxa de emissão de radiação solar é de aproximadamente $3,8 \cdot 10^{23}$ kw resultante da conversão de $4,3 \cdot 10^9$ g/s de massa em energia, sendo $1,7 \cdot 10^{14}$ kw dos $3,8 \cdot 10^{23}$ kw interceptados pela Terra equivalentes a 5.000 vezes maior que a soma de todos os outros insumos energéticos gerados por outros meios de transformação de energias na Terra. (energia nuclear terrestre, geotérmica e etc.) (GOSWAMI, 2015).

A estrutura física dimensional do Sol em relação ao planeta Terra é apresentada na Figura 8 como uma esfera de matéria gasosa com diâmetro de $1,39 \cdot 10^9$ metros a uma distância média da Terra de $1,495 \cdot 10^{11}$ metros, com uma densidade estimada de 100 vezes a da água e com uma temperatura efetiva de corpo negro de 5777 K, sendo a temperatura nas regiões centrais estimada em 8 a $40 \cdot 10^6$ K e uma constante solar de 1367 W/m^2 (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Figura 8 – Relações dimensionais Sol - Terra

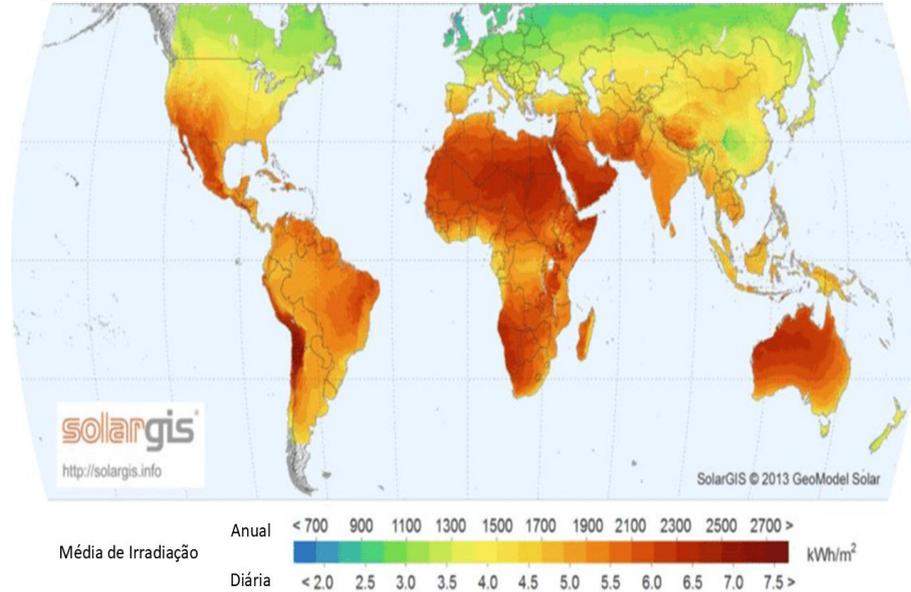


Fonte: Duffie; Beckman (1980)

Segundo DUFFIE e BECKMAN (1980) a energia solar radiante em W/m^2 que atinge uma superfície na Terra em um dia independente de sua localização com boas condições climáticas é de 1000 W/m^2 . A irradiação global anual sobre o planeta Terra mensurada em

kWh/m^2 considerada como a radiação solar incidente em sua superfície em um período de um ano é variável, a depender da localização de uma determinada região. A Figura 9 ilustra a irradiação solar global média anual e diária nas diversas regiões do globo terrestre.

Figura 9 – Mapa de irradiação solar global



Fonte: Solargis (2013)

Neste contexto não podemos desconsiderar este potencial energético do Sol, pois se configura numa energia limpa, abundante, e renovável com uma diversidade enorme de aplicações, tais como cultivo e secagem de alimentos, aquecimento de edificações e de água, operação de motores, bombas e turbinas, dessalinização da água para consumo, geração de eletricidade, produção de hidrogênio verde e outras modalidades de energia e utilidades. A pesquisa e o desenvolvimento para aproveitamento desta latente energia deve ser fomentada e apoiada por políticas públicas governamentais, cabendo aos pesquisadores científicos o desafio de aproveitar o maior potencial energético da energia solar, através de processos com máquinas, equipamentos e dispositivos que convertam esta energia em outras modalidades energéticas e utilidades com a máxima eficiência, considerando o menor custo possível e a maior abrangência de benefícios.

2.2 Fundamentos da radiação solar

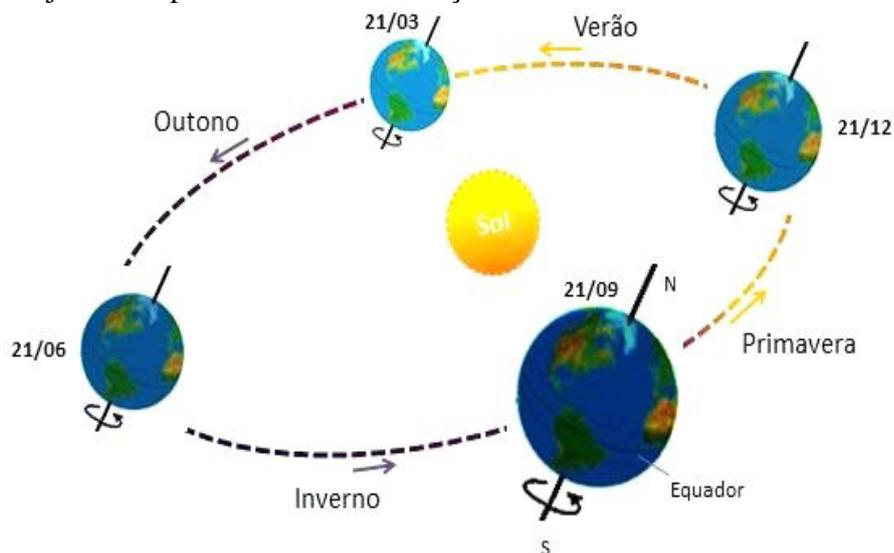
A radiação solar é definida como a energia emitida na forma de ondas eletromagnéticas pelo Sol irradiando o planeta Terra com a luz visível e calor. Esta energia varia conforme a

localização geográfica do observador na Terra, com a época do ano terrestre e com a variação da distância Terra-Sol, sendo estimado que esta variação do fluxo de radiação solar extraterrestre sem considerar as restrições atmosféricas da Terra fica em média na faixa de $\pm 3,3\%$ (DUFFIE; BECKMAN, 1980). A radiação solar é genericamente a energia com origem no Sol, porém, quando é referenciada como fluxo de potência que atinge uma superfície W/m^2 é denominada "irradiância solar", entretanto, quando é designada como a quantidade de energia incidente numa superfície por unidade de área num período de tempo Wh/m^2 é chamada de "irradiação solar", sendo ainda, a radiação solar denominada "irradiação extraterrestre" quando esta atinge o topo da camada atmosférica do planeta Terra. Em geral estes termos são sinônimos, pois, tratam-se de uma mesma definição física em unidades referenciais de tempo e espaço diferentes (PINHO; GALDINO, 2014).

2.2.1 A constante solar

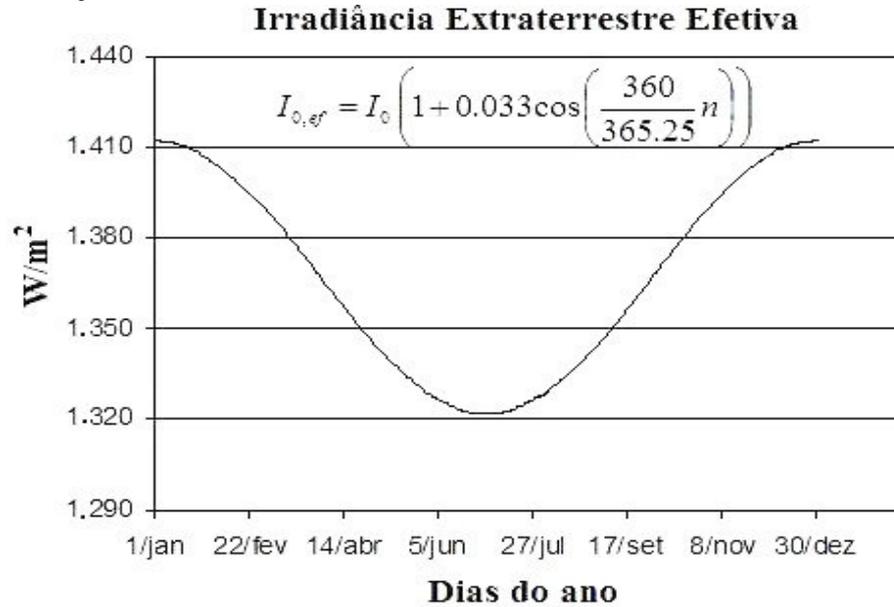
O termo "Constante solar" é conceituado como sendo o valor da irradiância extraterrestre efetiva que alcança uma superfície perpendicular aos raios solares na distância média da geometria Terra-Sol que tem como valor adotado pela *World Radiation Centre* (Centro Mundial de Radiação) (WRC) de $1367 W/m^2$. Esta constante solar na realidade varia em razão da alteração da distância do globo terrestre em relação ao Sol, devido a excentricidade da trajetória elíptica da Terra em torno do Sol que por sua vez, estabelece as estações do ano, conforme demonstrado na Figura 10 (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 10 – Trajetória elíptica da Terra em relação ao Sol



Considerando um modelo matemático para a percepção desta variação da irradiação extraterrestre efetiva, a Figura 11 representa a alteração desta irradiação ao longo dos dias e meses de um ano referencial (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 11 – Variação da Irradiância Extraterrestre



Fonte: Pinho;Galdino(2014)

DUFFIE e BECKMAN (1980) apresentam a seguinte equação para o cálculo da radiação extraterrestre incidente no plano normal à radiação no enésimo dia do ano B:

$$G_{on} = G_{sc} \left(1 + 0,033 \cdot \cos \frac{360 \cdot n}{365} \right) \quad (2.1)$$

IQBAL (1983) cita a equação 2.2 com a precisão de $\pm 0,01\%$ para o cálculo de G_{on} :

$$G_{on} = G_{sc} (1,000110 + 0,0334221 \cdot \cos B + 0,001280 \cdot \sen B + 0,000179 \cdot \cos 2B + 0,000077 \cdot \sen 2B) \quad (2.2)$$

Onde:

G_{on} é a radiação extraterrestre incidente no plano normal à radiação no enésimo dia do ano B;

G_{sc} é a constante solar;

n é o dia do ano juliano, sendo n = 1 para o primeiro dia do ano (1º de janeiro) e n = 365 para o último dia do ano (31 de dezembro), considerando o mês de fevereiro com 28 dias;

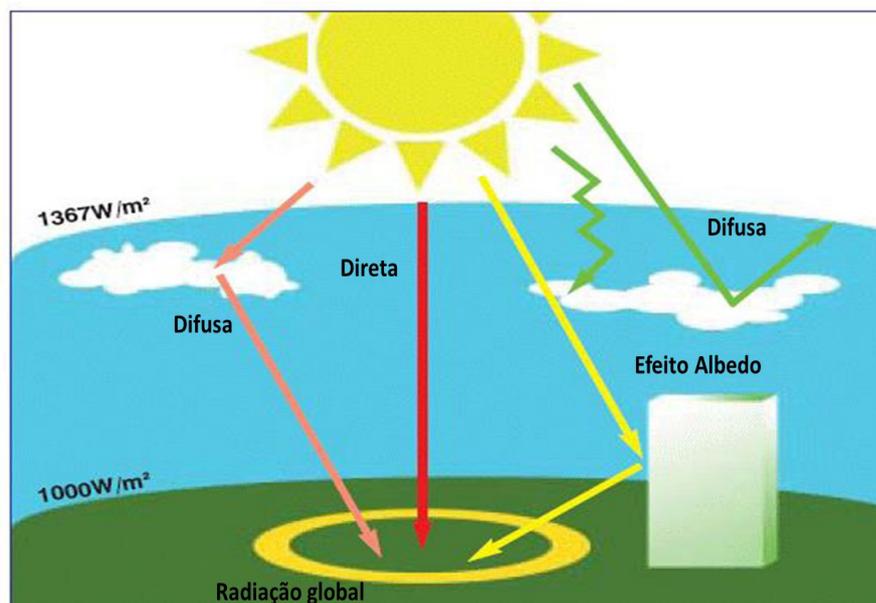
B é calculado pela fórmula: $B = (n - 1) \cdot \frac{360 \cdot n}{365}$

2.2.2 As componentes da radiação solar

A radiação solar (irradiância extraterrestre) considerando a atmosfera da Terra sofre alterações e passam a ser derivadas como "Radiação de feixe ou direta" que é a radiação solar recebida do Sol sem ter sido espalhada pela atmosfera, a "Radiação difusa" definida como a radiação solar recebida do Sol após a sua direção ter sido alterada pela absorção e espalhamento na atmosfera e a "Radiação total ou global, que é o resultado do somatório da radiação de feixe direta e da radiação difusa numa superfície horizontal coletora dos raios do Sol (DUFFIE; BECKMAN, 1980).

Considera-se que quando a superfície coletora dos raios do Sol está inclinada o fator "Albedo" definido como a refletividade difusa de uma outra qualquer superfície próxima ao coletor dos raios do Sol tem influência sobre a radiação solar que alcança o concentrador termossolar. A Figura 12 evidencia estas componentes da radiação solar (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 12 – Componentes Radiação Solar



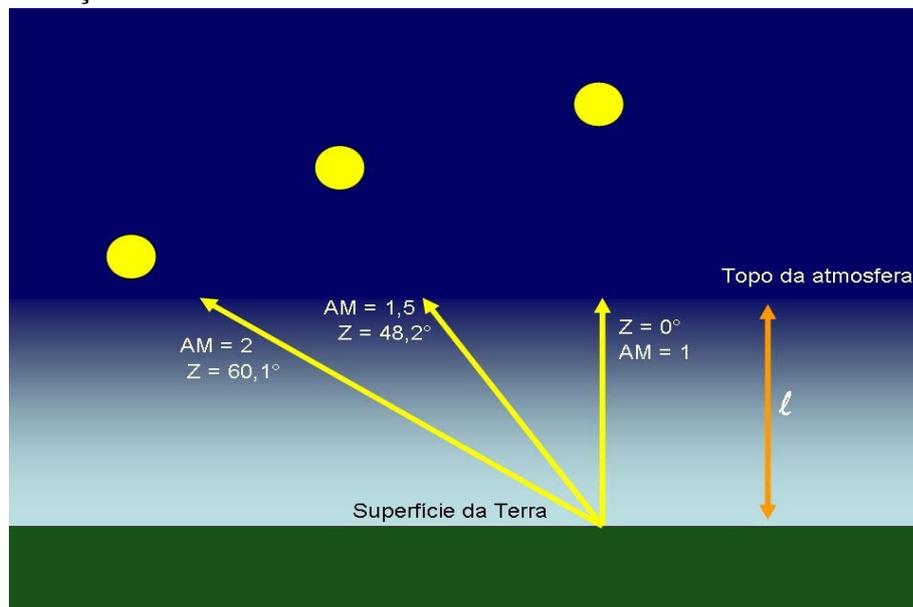
Fonte: Quadrado com adaptações (2023)

A radiação solar é diretamente influenciada pela distância da Terra em relação ao Sol, pelas condições da meteorologia da atmosfera local que provocam os efeitos de absorção e espelhamento, e também, pela espessura da camada atmosférica da Terra denominada "Massa de ar" (MA), que por sua vez, depende da posição do Sol segundo o ângulo zenital solar representada pela equação 2.3:

$$MA = \frac{1}{\cos\theta_z} \quad (2.3)$$

A Figura 13 ilustra a influência da massa de ar segundo o ângulo zenital do Sol na radiação solar, por exemplo, para os ângulos zenitais iguais a 0° , $48,2^\circ$ e $60,1^\circ$, a massa de ar é igual respectivamente a 1, 1,5 e 2, sendo que fora da atmosfera terrestre a massa de ar é igual a 0 (zero) (BRITO–CRESESB, 2006).

Figura 13 – Variação da massa de ar terrestre



Fonte: Krenzinger et. al (2010)

2.3 A geometria solar

O projeto de um concentrador solar do tipo prato parabólico deve ser idealizado para a obtenção da máxima eficiência de transformação energética, e para isso, é imperativo considerar alguns fatores quanto ao seu aspecto construtivo, tais como, o formato do espelho parabólico para garantia de que os raios do Sol refletidos sejam direcionados com exatidão e precisão para o ponto focal do receptor; o material do espelho com o objetivo de se obter uma alta refletividade, durabilidade e resistência as intempéries; a operação segura do equipamento com baixos custos de manutenção e a captura da energia solar pelo coletor do concentrador solar através de um preciso sistema de rastreamento da posição e da aparente trajetória do Sol no céu, essenciais para o pleno aproveitamento e transformação da energia solar em energia térmica (SAHU *et al.*, 2021).

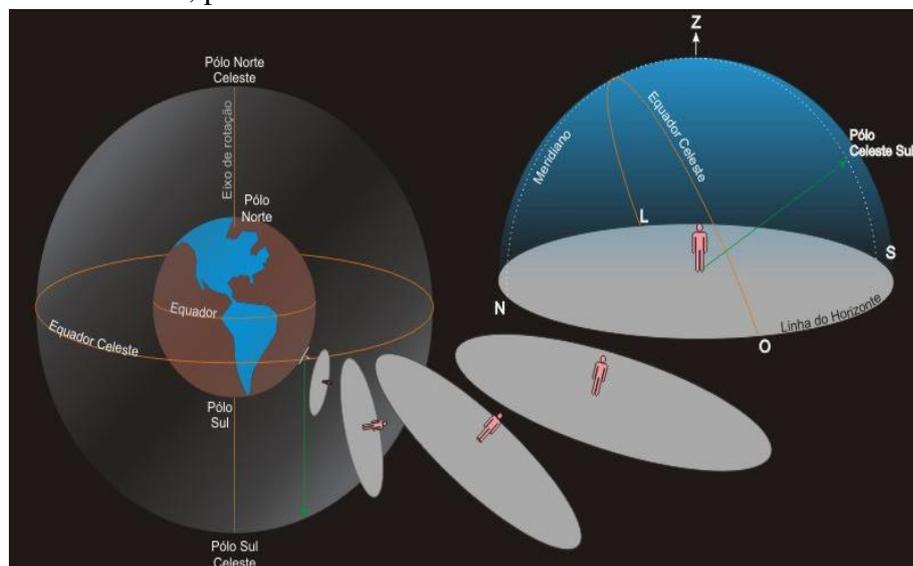
A plena compreensão da real posição e da aparente trajetória do Sol no céu nos propicia de forma efetiva a otimização dos estudos sobre energia solar no que concerne a realizar simulações computacionais para a determinação da energia gerada por um sistema; efetivar a transposição da radiação solar do plano horizontal para um plano inclinado; observar a influência deste fator em períodos específicos de tempo e espaço na inclinação e orientação de superfícies coletoras de captação da energia solar; efetuar estudos de sombreamento sobre a superfície do coletor e estimar a radiação solar incidente em determinado local e momento, além de outras finalidades (MEDEIROS; MARTINS, 2020).

2.3.1 A esfera celestial

Do ponto de vista da ciência astronômica o céu é representado por uma imaginária esfera de raio arbitrário, na qual, ao projetarmos os corpos celestiais identificamos a real posição destes e suas aparentes trajetórias, sendo a mais conveniente forma de determinação do movimento do Sol no céu (JAGER *et al.*, 2016).

Concebendo esta esfera celestial com a Terra posicionada em seu centro ao projetarmos o plano estabelecido pela linha do equador terrestre sobre o plano do equador celeste da esfera dividimos-a em duas metades, chamadas abóbadas, onde se projeta a posição e a aparente trajetória de qualquer corpo celeste, especialmente o Sol, objeto de interesse da pesquisa. A Figura 14 demonstra a projeção da metade inferior da esfera celeste a partir de um observador posicionado em um ponto no hemisfério sul terrestre (MEDEIROS; MARTINS, 2020).

Figura 14 – Esfera celeste, plano horizontal e hemisfério visível



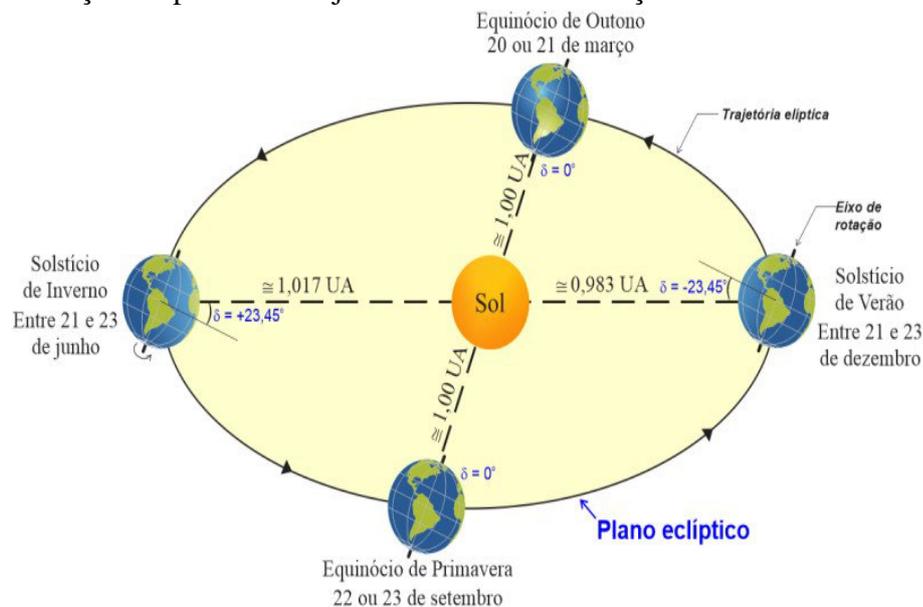
Fonte: Medeiros; Martins (2020)

2.3.1.1 Os movimentos de translação e rotação da Terra

Se considerarmos uma latitude do ponto de observação localizada no intervalo entre a linha do equador e o polo sul terrestre e sendo a aparente movimentação do Sol realizada de leste a oeste este descreverá no céu celeste planos oblíquos ao plano da linha do horizonte do observador, tendo o plano do equador celeste a mesma inclinação dos planos traçados pelo Sol. Note-se que o movimento do Sol é aparente de leste a oeste, pois na realidade é a Terra que gira em torno do Sol num plano elíptico excêntrico com os seus movimentos de translação e rotação de oeste para leste (MEDEIROS; MARTINS, 2020).

A Figura 15 ilustra a variação do plano da trajetória da Terra em torno do Sol num plano eclíptico com os respectivos calendários de solstícios de verão (entre 21 e 23 de dezembro) e inverno (entre 21 e 23 de junho), equinócios de outono (entre 20 e 21 de março) e primavera (22 e 23 de setembro), especificando a declinação solar de $23,45^\circ$ para os solstícios e 0° para os equinócios com as distâncias Terra-Sol de 0,983 UA para o solstício de verão, 1,017 UA para o solstício de inverno, 1,00 UA para os equinócios de outono e primavera, sendo uma unidade astronômica (UA) igual a 150 milhões de quilômetros.

Figura 15 – Variação do plano da Trajetória da Terra em relação ao Sol

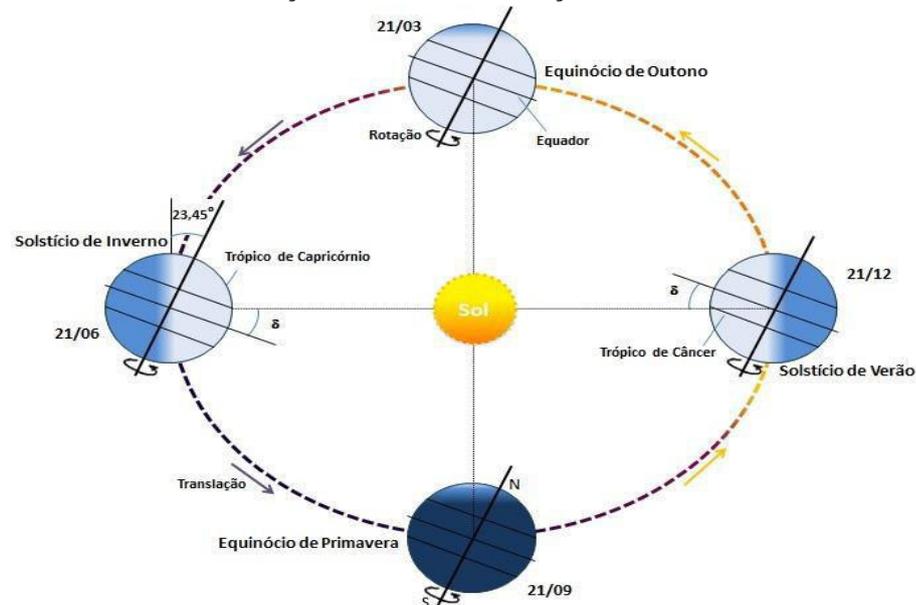


Fonte: Jagger et al., 2016

A Figura 16 mostra que em virtude da inclinação do eixo da Terra podemos verificar no solstício de verão dias mais longos na região do hemisfério sul e dias mais curtos no solstício de inverno. De outra maneira, nos equinócios a duração dos dias são as mesmas para ambos os

hemisférios e que na linha do equador a duração do dia é sempre o mesmo com leves flutuações na duração dos dias em localidades próximo ao equador. A duração dos dias determinada pela rotação da Terra em seu próprio eixo em cada estação do ano é fator importante para maior aproveitamento da energia solar visando uma maior produção energética (PINHO; GALDINO, 2014).

Figura 16 – O movimento de rotação da Terra e a duração dos dias

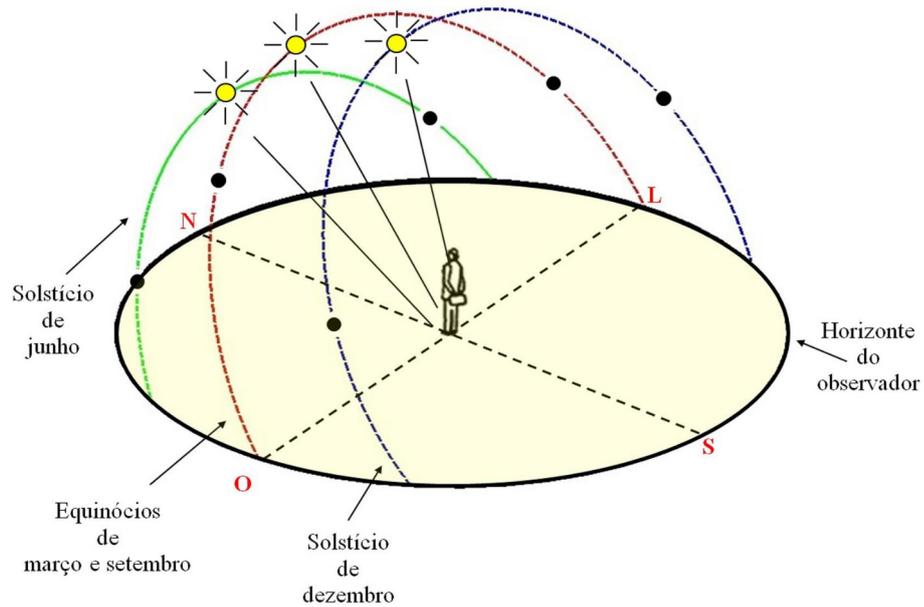


Fonte: Pinho;Galdino,2014

A Figura 17 mostra a trajetória do Sol no céu em diferentes momentos de cada dia do ano levando-se em conta a posição do observador determinado pelos parâmetros de sua latitude e longitude. Observe-se que a trajetória do Sol vai se modificando quanto aos pontos do nascente ao poente por causa do ângulo de inclinação de $23,5^\circ$ do eixo de rotação da Terra em relação ao plano de sua órbita. A evidência deste movimento solar demonstra que a posição do Sol dia a dia deve ser rastreada considerando sua variação de posição do nascente (leste) ao poente (oeste), bem como sua progressão de norte ao sul ao longo do ano no plano de horizonte do observador. Neste caso o observador está a uma latitude de -32° no sul do Brasil no hemisfério sul. Numa análise do gráfico é observável que a linha vermelha apresenta a trajetória do Sol para uma declinação solar de 0° (COSTA; MAROJA, 2018).

Se considerarmos o ponto de observação exatamente na linha do equador terrestre, ou seja, com latitude $\phi = 0^\circ$, sobrepondo o plano do equador terrestre em relação ao equador celeste, então o Sol descreverá uma aparente trajetória de leste a oeste com planos perpendiculares ao plano da linha de horizonte do observador, conforme demonstrado na Figura 18 (MEDEIROS;

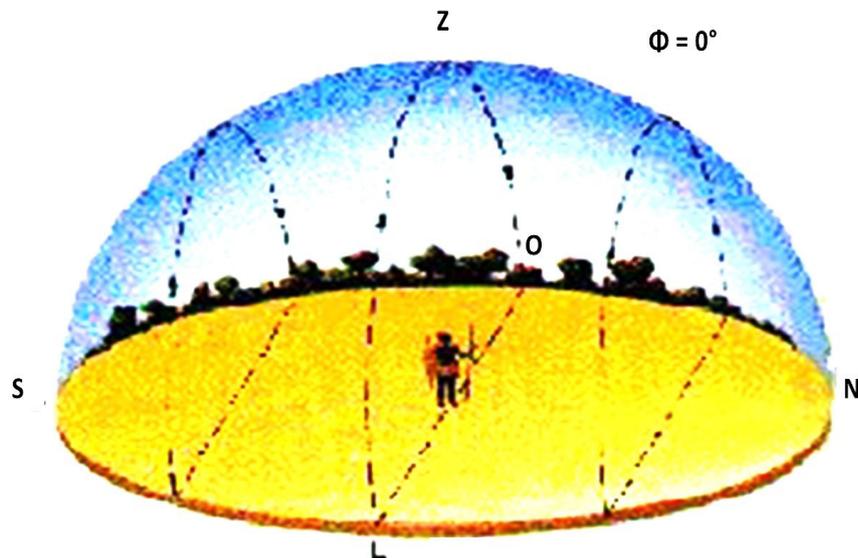
Figura 17 – Variação da altura do Sol em função do ângulo azimute e da latitude do observador a -32°



Fonte: Costa,2016

MARTINS, 2020).

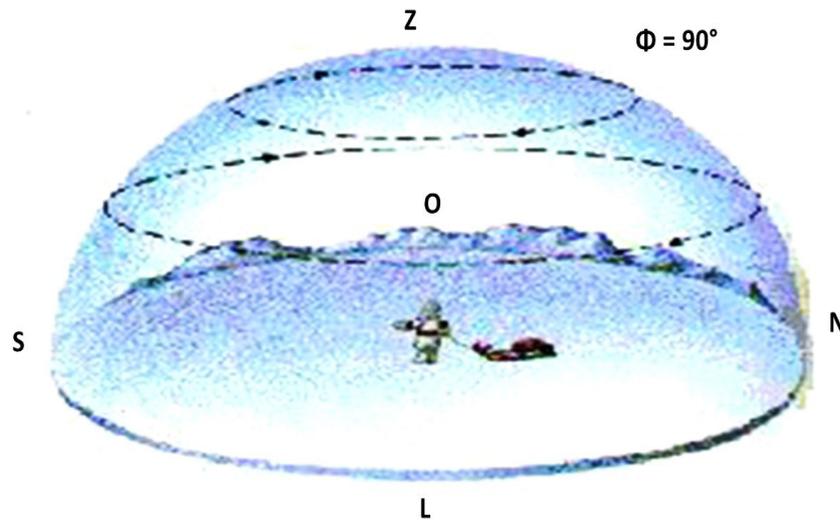
Figura 18 – Variação da altura do Sol em função do ângulo azimute e da latitude do observador a 0°



Fonte: Costa,2016

De outra maneira, se o observador estiver posicionado na latitude $\phi = 90^\circ$ (polo sul ou norte) o Sol realizará uma trajetória aparente de leste a oeste com planos paralelos ao plano da linha do horizonte, conforme mostra a Figura 19 (MEDEIROS; MARTINS, 2020).

Figura 19 – Variação da altura do Sol em função do ângulo azimute e da latitude do observador a 90°



Fonte: Costa,2016

2.3.2 A posição e a aparente trajetória do Sol no céu

A determinação da precisa posição do Sol e a sua aparente trajetória no céu a cada dia do ano em qualquer ponto da Terra deve ser consolidada por um sistema de rastreamento do Sol instalado no próprio equipamento CSP, que em suma, posiciona o coletor do concentrador em sincronia com a posição espacial do Sol nos sentidos dos eixos cardeais leste-oeste e norte-sul terrestre, visando a captura da maior quantidade de radiação solar direta desejada para a otimização da eficiência do sistema CSP.

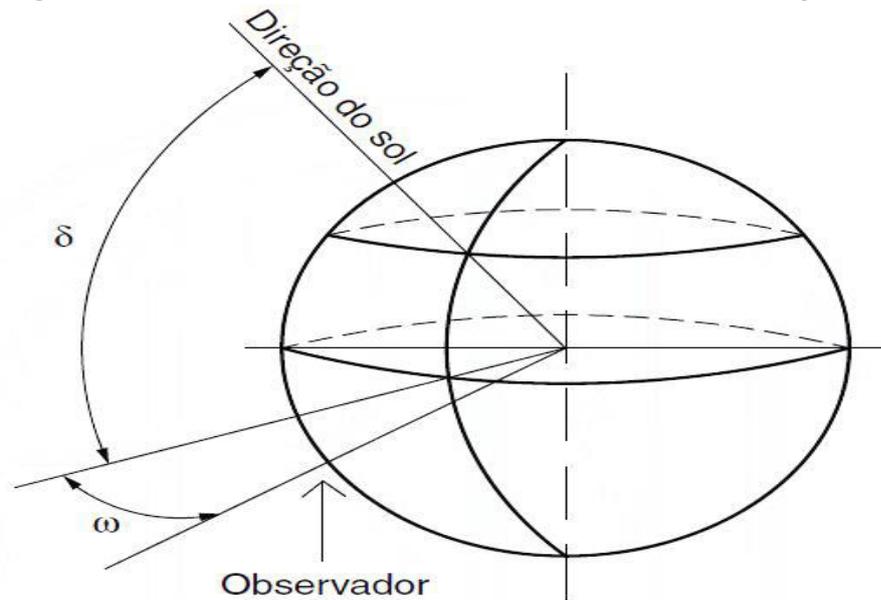
2.3.2.1 Ângulos de um observador na Terra em relação ao Sol

Tomando como referência o planeta Terra e um observador localizado no centro da Terra voltado para o ponto cardeal norte geográfico verdadeiro no hemisfério sul, temos dois ângulos, sendo o primeiro denominado declinação solar (δ) e o segundo ângulo horário solar (ω) essenciais para a compreensão da determinação da posição do Sol no espaço celestial (MEDEIROS; MARTINS, 2020). A Figura 20 ilustra estes dois ângulos supramencionados.

De acordo com a ABNT (2020), a declinação solar e o ângulo horário solar são definidos como:

Declinação solar (δ): ângulo de vértice no centro da Terra formado pela direção do Sol e pelo plano do Equador com faixa de variação de $-23,45^\circ \leq \delta \leq +23,45^\circ$, e, por

Figura 20 – Ângulos notáveis de um observador no centro da Terra em relação ao Sol



Fonte: ABNT NBR 10899-2020

convenção, positivo no hemisfério norte.

Ângulo horário solar (w): ângulo diedro com aresta no eixo de rotação da Terra formado pelo semiplano que contém o Sol e o semiplano que contém o meridiano local, com faixa de variação de $-180^\circ \leq \delta \leq +180^\circ$ e, por convenção, positivo no período da tarde.

2.3.2.2 Ângulos de um observador e de uma superfície na Terra em relação ao Sol

Tomando como referência um observador e uma superfície de captação de energia solar localizados no hemisfério sul da Terra voltados para o ponto cardeal norte geográfico verdadeiro, vários ângulos essenciais são estabelecidos para a compreensão da geometria Sol-Terra em relação ao observador e a superfície, conforme ilustrado na Figura 21 (MEDEIROS; MARTINS, 2020).

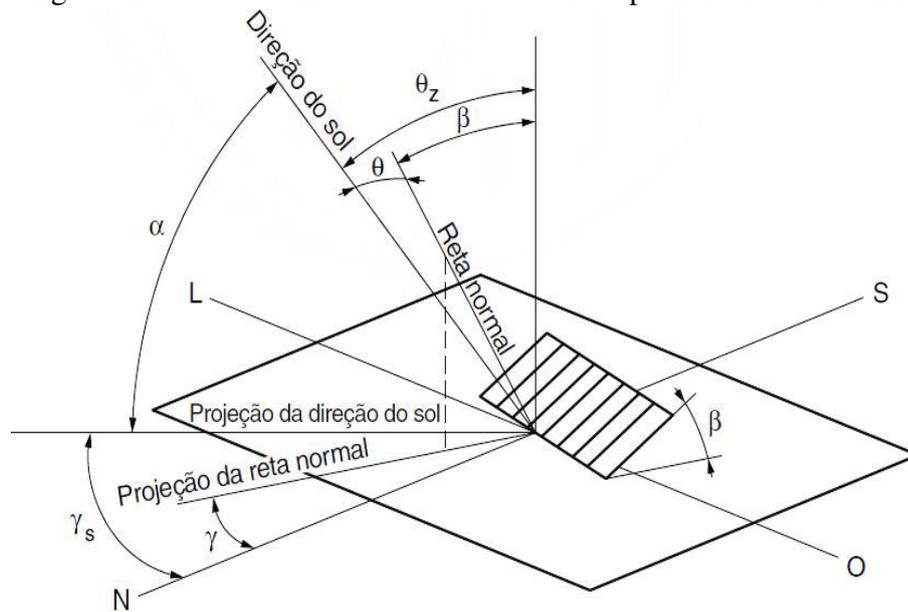
De acordo com ABNT (2020), temos as seguintes definições para os ângulos que regem a relação da posição do Sol com relação a um observador e com uma superfície de captação de energia solar na Terra:

Elevação ou altura solar (α): ângulo de vértice no observador formado pela direção do Sol e pela projeção da direção do Sol no plano horizontal.

Ângulo zenital (θ_z): ângulo entre o raio solar incidente e a vertical

Ângulo azimutal do Sol (γ_s): ângulo entre o norte geográfico e a projeção do raio solar no plano horizontal, com faixa de variação de $-180^\circ \leq \delta \leq +180^\circ$ e, por convenção,

Figura 21 – Ângulos notáveis de um observador e de uma superfície na Terra em relação ao Sol



Fonte: ABNT NBR 10899-2020

positivo no sentido leste, com norte igual a 0° .

De acordo com ABNT (2020), temos as seguintes definições para os ângulos que regem a relação da posição do Sol com a superfície de captação da energia solar:

Inclinação de uma superfície (β): ângulo de menor declive entre a superfície e o plano horizontal, com faixa de variação $0^\circ \leq \beta \leq +90^\circ$.

Ângulo de incidência em uma superfície (θ): ângulo entre o raio solar incidente (direção do Sol) e a reta normal à superfície.

Ângulo azimutal de uma superfície (γ): ângulo entre o Norte geográfico e a projeção da reta normal à superfície no plano horizontal, com faixa de variação $-180^\circ \leq \gamma \leq +180^\circ$. e, por convenção, positivo no sentido leste, com norte igual a 0° .

2.3.3 *Sistemas de coordenadas horizontais*

O sistema de coordenadas horizontais é o mais aplicado na área de energia solar para a determinação da posição e da trajetória aparente do Sol que se modificam em função do local do observador, do dia e da hora da observação, considerando os parâmetros angulares da elevação ou altura solar (α) e o ângulo azimutal do Sol (γ_s), que por sua vez são calculados em função do ângulo horário solar (ω) e da declinação do Sol (δ) (MEDEIROS; MARTINS, 2020). Para equacionar estas variáveis IQBAL (1983) aponta as seguintes equações:

2.3.3.1 Cálculo da elevação ou altura solar

$$\text{sen}\alpha = \text{sen}\delta \cdot \text{sen}\phi + \text{cos}\delta \cdot \text{cos}\phi \cdot \text{cos}\omega = \text{cos}\theta_z \quad (2.4)$$

Onde:

α é a altura solar em graus;

γ é a declinação solar;

ϕ é a latitude do observador;

ω é o ângulo horário solar.

a) Cálculo da declinação solar (δ) de Spencer

$$\begin{aligned} \delta = & (0,006918 - 0,399912 \cdot \text{cos}\Gamma + 0,070257 \cdot \text{sen}\Gamma - 0,006758 \cdot \text{cos}^2 \cdot \Gamma \\ & + 0,000907 \cdot \text{sen}2\Gamma - 0,002697 \cdot \text{cos}3\Gamma + 0,00148 \cdot \text{sen}3\Gamma) \cdot \left(\frac{180}{\pi}\right) \end{aligned} \quad (2.5)$$

Onde:

δ é a declinação solar em graus;

Γ é o fator gama.

b) Cálculo de Γ (fator gama)

$$\Gamma = \frac{2 \cdot \pi (dn - 1)}{365} \quad (2.6)$$

Onde:

Γ é o fator gama;

dn é o dia do ano juliano, sendo $dn = 1$ para o primeiro dia do ano (1° de janeiro) e $dn = 365$ para o último dia do ano (31 de dezembro), considerando o mês de fevereiro com 28 dias.

c) Cálculo do ângulo horário solar (ω)

$$\omega = (H_s - 12) \cdot 15 \quad (2.7)$$

Onde:

ω é o ângulo solar;

H_s é o horário solar.

d) Cálculo do horário solar H_s

$$H_s = H_o + \Delta_L + E_t \quad (2.8)$$

Onde:

H_s é o horário solar;

H_o é o horário oficial do local em minutos (horário de verão acrescentar 60 minutos);

Δ_L é a correção da longitude;

E_t é a equação do tempo.

e) Cálculo da correção da longitude (Δ_L)

$$\Delta_L = 4 \cdot (L_p - L_e) \quad (2.9)$$

Onde:

Δ_L é a correção da longitude em minutos;

L_p é a longitude padrão associado ao fuso horário oficial local em graus;

L_e é a longitude do local em graus.

f) Cálculo da equação do tempo (E_t)

$$E_t = (0,000075 + 0,001868 \cdot \cos\Gamma - 0,032077 \cdot \sin\Gamma - 0,014615 \cdot \cos 2\Gamma - 0,04089 \cdot \sin 2\Gamma) \cdot (229,18) \quad (2.10)$$

Onde:

E_t é a equação do tempo em minutos;

Γ é fator gama.

2.3.3.2 Cálculo do ângulo azimutal do Sol

$$\cos(\gamma_s) = \frac{\text{sen}(\alpha) \cdot \text{sen}(\phi) - \text{sen}(\delta)}{\cos(\alpha) \cdot \cos(\phi)} \quad (2.11)$$

Onde:

γ é o ângulo azimutal do Sol em graus;

α é a altura solar em graus;

ϕ é a latitude do observador em graus.

O software "*Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln*" com uma precisão significativa determina a obtenção dos valores numéricos da posição e trajetória aparente do Sol confirmando a lógica da fundamentação teórica apresentada para os parâmetros declinados na subseção 2.3.3.1 e subseção 2.3.3.2. A Figura 22 mostra os resultados dos cálculos utilizando o referido software supracitado para um observador no hemisfério sul na cidade de Fortaleza - Ceará localizada numa latitude de $-3,7^\circ$ sul no dia 20 de agosto de 2024 às 14h:00, segundo os seguintes parâmetros:

- a) Elevação ou altura do Sol $57,0^\circ$;
- b) Declinação solar $12,2^\circ$;
- c) Ângulo horário solar 1 h 56min;
- d) Horário solar 11 h 57min;
- e) Equação do tempo $-3,14$;
- f) Ângulo azimute $299,1^\circ$;
- g) Ascensão reta do Sol 10 h.

2.4 Sistemas de rastreamento do Sol

Os mecanismos rastreadores da posição e da trajetória aparente do Sol tem como funcionalidade movimentar e posicionar o sistema CSP de forma a concentrar a maior quantidade de raios solares em seu coletor propiciando a absorção destes no receptor para geração de energia térmica durante todo o dia no período do nascer ao pôr do Sol em uma determinada localidade.

Figura 22 – Localização e trajetória do Sol

The screenshot shows the 'Motions of the Sun Simulator' interface. At the top, there is a navigation bar with links: Lar, Aplicativos nativos, Legado, ADVs, HTML5, Oficinas, Diversos. Below this is a breadcrumb trail: Home > NAAP Labs > Movimentos do Sol > Simulador de Movimentos do Sol. The main content area is titled 'Motions of the Sun Simulator' and includes a 'reset help about' link.

The central part of the interface features a 3D horizon diagram showing the sun's path (ecliptic) and the observer's position. To the right, the 'Time and Location Controls' section allows setting the day of year (20 August) and the time of day (14:00). Below this is a clock and a world map showing the observer's latitude (3.7° S).

The 'Animation Controls' section includes a 'start animation' button, an 'animation mode' selector (radio buttons for 'continuous' and 'loop day', and a checkbox for 'step by day'), and an 'animation speed' slider set to 3.0 hrs/sec. There is also a checkbox for 'use lower quality graphics when animating to improve performance'.

The 'General Settings' section includes several checkboxes: 'show the sun's declination circle', 'show the ecliptic', 'show month labels', 'show underside of celestial sphere', and 'show stickfigure and its shadow'. Below these are radio buttons for 'time of day' and 'day of year'.

The 'Information' panel at the bottom left provides the following data for an observer at latitude 3.7° S on 20 August at 14:00 (2:00 PM):

sun's hour angle: 1h 56m	sun's altitude: 57.0°
sidereal time: 11h 57m	sun's azimuth: 299.1°
equation of time: -3:14	sun's right ascension: 10h 0m
<input type="checkbox"/> show analemma	sun's declination: 12.2°

Fonte: Astronomy Education at the University of Nebraska-Lincoln

2.4.1 Sistemas do número de eixos rastreadores

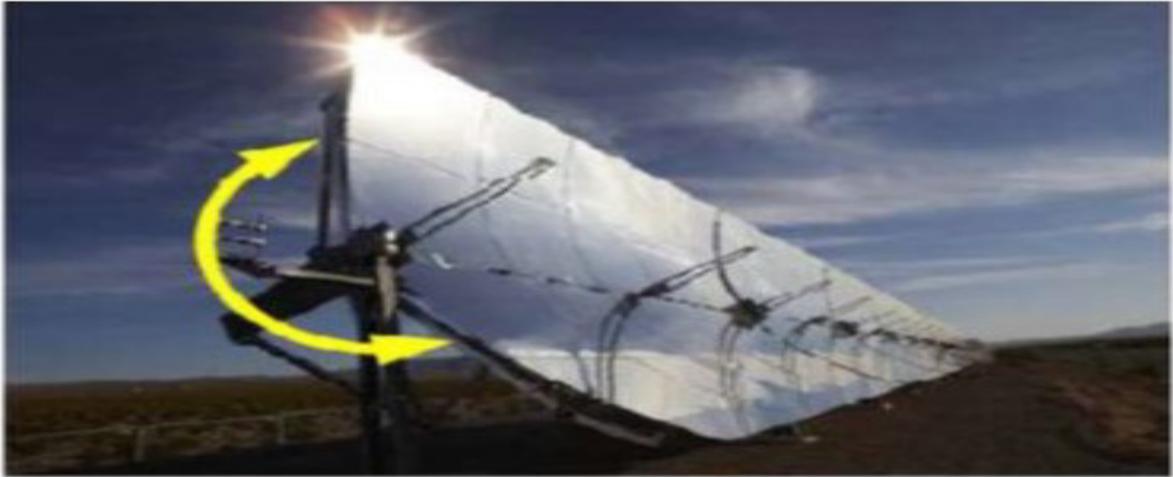
Estes mecanismos quando projetados para acompanhar a trajetória do Sol no sentido dos pontos cardeais leste-oeste são denominados sistemas rastreadores de um eixo. A Figura 23 ilustra um CSP do tipo calha parabólica com apenas um eixo de acompanhamento da trajetória do Sol.

Quando estes mecanismos são projetados para acompanhar a trajetória do Sol no sentido dos pontos cardeais norte-sul e leste-oeste são denominados sistemas rastreadores de dois eixos. A Figura 24 ilustra um CSP do tipo prato parabólico com dois eixos de acompanhamento da trajetória do Sol.

2.4.2 Tipos de controladores dos mecanismos rastreadores

Os mecanismos rastreadores para uma maior precisão da posição e movimentação aparente do Sol no céu utilizam sistemas controladores que podem ser quanto ao tipo de controle:

Figura 23 – Mecanismo rastreador de um eixo



Fonte: Barbosa,2015

Figura 24 – Mecanismo rastreador de dois eixos



Fonte: Barbosa,2015

passivos, eletro-ópticos e microprocessados.

2.4.2.1 *Sistemas controladores passivos*

Os sistemas passivos não usam qualquer controle de ordem eletrônica e/ou motorizada, mas um sistema com uma rede de tubos com fluidos de baixo ponto de ebulição que ao serem aquecidos pelos raios solares fluem para o outro lado da rede de tubos pressionando geralmente um sistema hidráulico com pistões instalados no concentrador solar para sua movimentação (MOHAMED *et al.*, 2012). A Figura 25 ilustra o sistema controlador passivo com a utilização de fluido com baixo ponto de ebulição.

Figura 25 – Sistema controlador passivo



Fonte: Zomeworks corporation

2.4.2.2 Sistema eletro-óptico

Este sistema é muito utilizado em locais de boas condições climáticas (céu limpo) e de forma simples utilizam sensores de raios solares para a identificação da posição do Sol auferindo bons resultados de localização solar (MOHAMED *et al.*, 2012). A Figura 26 mostra um sistema controlador eletro-óptico.

Figura 26 – Sistema controlador eletro-óptico



Fonte: Paru solar

2.4.2.3 Sistema controlador microprocessado

Os sistemas microprocessados alimentados por dados com base nas equações matemáticas que determinam a posição do Sol, acionam um sistema de movimentação com motores elétricos que posicionam o concentrador de forma exata na posição requerida para rastreamento do Sol requerendo uma instalação de alta acurácia. Geralmente são adequados para concentradores de energia solar de grande porte, possuindo um mecanismo de calibração eletrônica automática ou usando sensores ópticos para esse fim (MOHAMED *et al.*, 2012).

2.5 Principais Tecnologias de CSP

Existem diversas tecnologias de concentração da radiação solar visando produzir variados tipos de energias com as suas derivadas utilidades. Os sistemas de CSP utilizam basicamente um processo comum a todas as tecnologias de CSP, onde a energia radiante do Sol é transformada em energia térmica e a partir desta em outras modalidades de energia ou outras utilidades finalísticas.

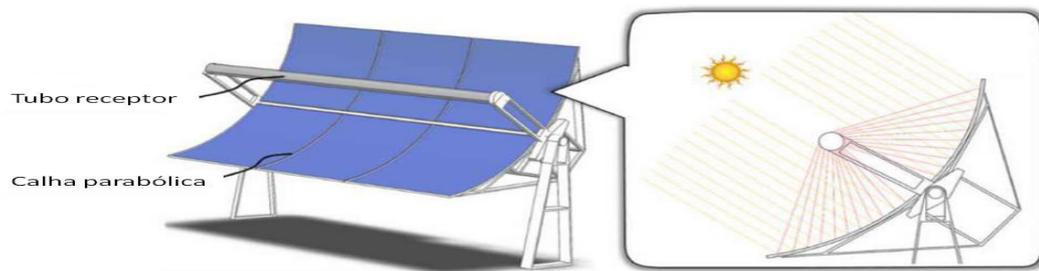
Para a tecnologia de CSP a energia térmica é o fator preponderante para a determinação da sua devida aplicação, sendo a temperatura o indicador base para o alcance do produto final desejado e determinante do modelo construtivo do concentrador a ser adotado. Em síntese a energia térmica com temperatura entre (27-60°C) é utilizada para aquecer água de piscinas, bem como, para a climatização e sanitização de espaços, (90-120°C) cozimento de alimentos, (40-250°C) utilizada em variados processos industriais, (250-1000°C) geração de energia elétrica e de (500-2500°C) produção de combustíveis, especialmente o hidrogênio, promissor em tempos de transição energética dos combustíveis fósseis para a energia verde renovável (GIL, 2019).

Basicamente existem 4 destacados tipos de tecnologias CSP, o concentrador calha parabólica [*Parabolic Trough Collectors* (Coletores de Calha Parabólica) (PTC)], o refletor linear Fresnel [*Reflector Linear Fresnel* (Refletor Linear Fresnel) (LFR)], ambos, concentram a energia solar ao longo da extensão linear de um coletor, o prato parabólico [*Parabolic dish collectors* (Coletores Pratos Parabólicos) (PDC)], e a torre de energia solar [*Solar Power Tower* (Torre de Energia Solar) (SPT)], que convergem a energia solar para um foco pontual (BLANCO, 2016).

2.5.1 Concentrador do tipo calha parabólica

A tecnologia mais utilizada na atualidade é a do tipo PTC, conhecida como calha parabólica consistindo em seu aspecto construtivo de um espelho coletor de raios solares no formato parabólico e um tubo receptor central localizado no ponto focal da parábola do concentrador, de modo que, os raios solares ao incidirem no coletor parabólico convergem para o tubo receptor em toda a extensão do concentrador produzindo um fluxo de calor para aquecer um fluido de transferência de energia térmica (água, sais fundidos, óleo térmico a base de glicol, glicerol ou sintéticos) no interior do tubo a uma temperatura de até 200°C aplicando esta energia térmica gerada nos processos de dessalinização e aquecimento da água, cozimento de alimentos, produção de eletricidade e outras utilidades (ZHANG *et al.*, 2024). A Figura 27 apresenta o modelo base construtivo do concentrador do tipo calha parabólica.

Figura 27 – Concentrador tipo calha parabólica (PTC)



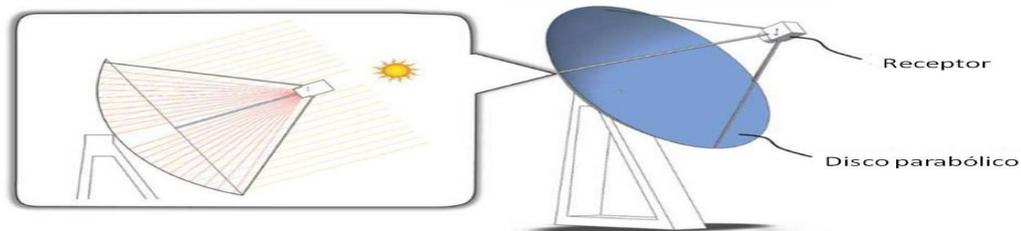
Fonte: Zang Cheng; Li (2024)

2.5.2 Concentrador tipo prato parabólico

A tecnologia de CSP do tipo PDC se configura na sua forma de construção de um prato parabólico com uma área espelhada que capta a radiação do Sol e um receptor térmico montado no ponto central do foco do prato parabólico. A otimização de sua eficiência de conversão da radiação solar em energia térmica depende de um alto grau de refletividade da face espelhada e da incidência dos raios do Sol perpendicularmente ao campo de abertura do prato parabólico, que por sua vez, requer um sistema de dois eixos para o rastreamento da trajetória aparente do Sol no céu de forma a captar a radiação direta incidente no coletor. Esta tecnologia CSP apresenta uma alta eficiência, portabilidade, simplicidade, economia e uma condição operacional autônoma sendo amplamente aplicada para geração de energia elétrica,

dessalinização da água, fogões solares, além de outras utilidades (ZHANG *et al.*, 2024). A Figura 28 ilustra o modelo base construtivo do concentrador do tipo disco parabólico.

Figura 28 – Concentrador tipo disco parabólico(PDC)

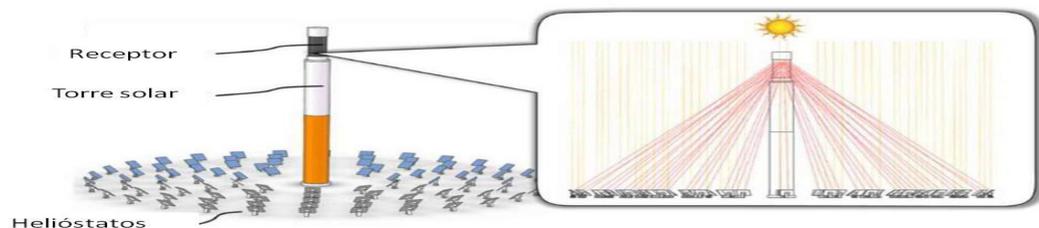


Fonte: Zang Cheng; Li (2024)

2.5.3 Concentrador tipo torre de energia solar

Esta tecnologia se caracteriza pela concentração de elevadas temperaturas consistindo em seu aspecto construtivo de uma torre solar e de um conjunto de espelhos, denominado helióstatos, dispostos ao redor da torre numa configuração oval captando a luz solar através de um rastreamento automático da trajetória aparente do Sol no céu e redirecionando-a para o ponto focal da torre. Geralmente utilizando o ciclo Rankine ou Brayton esta tecnologia fototérmica é muito aplicada para a produção de energia elétrica em larga escala devido a sua alta capacidade de concentração solar e o alcance de altas temperaturas (ZHANG *et al.*, 2024). A Figura 29 ilustra o modelo base construtivo do concentrador do tipo torre de energia solar.

Figura 29 – Torre de energia Solar (PTS)

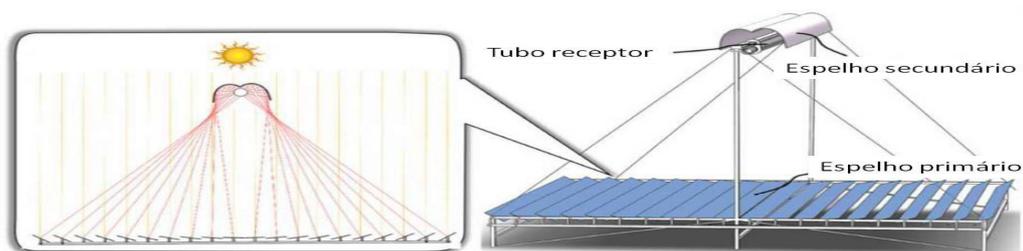


Fonte: Zang Cheng; Li (2024)

2.5.4 Concentrador tipo refletor linear Fresnel

O concentrador refletor linear Fresnel possui em sua estrutura um conjunto de espelhos planos segmentados dispostos paralelamente em relação ao outro formando o que denominamos espelho primário, cuja função, é captar a luz solar através de um sistema de rastreamento da trajetória aparente do Sol no céu de forma otimizada e redirecioná-la para um espelho secundário com formato parabólico localizado acima deste espelho primário. Além destes componentes o LFR contempla um tubo receptor localizado em toda a extensão do espelho secundário que ao captar a radiação solar advinda do espelho primário a redireciona para este tubo receptor localizado no foco do espelho secundário garantindo uma maior uniformidade e eficiência no fluxo da energia térmica para o fluido de transferência de calor (ZHANG *et al.*, 2024). A Figura 30 ilustra o modelo base construtivo do concentrador do tipo refletor linear fresnel LFR.

Figura 30 – Refletor Linear Fresnel (LFR)



Fonte: Zang Cheng; Li (2024)

2.6 Instrumentação para medição das grandezas da energia solar

A medição da radiação solar em suas componentes global, direta normal e difusa no plano horizontal é de extrema importância para a concepção de projetos e estudos de energia solar, especialmente os sistemas de tecnologia de CSP avaliando as condições atmosféricas reais do local de instalação destes equipamentos ampliados para uma região. Normalmente são utilizados dois destacados instrumentos de medição solarimétricos com características diferenciadas, dentre eles, o piranômetro e o pireliômetro (BRASIL, 2000).

2.6.1 Piranômetro

Segundo IQBAL (1983) “Um piranômetro é um instrumento para medir a irradiância global e difusa que chega de todo o hemisfério. Este hemisfério é geralmente a cúpula completa do céu. Um piranômetro também pode ser usado em uma posição inclinada, caso em que também receberá a radiação refletida no solo”. O piranômetro em seu aspecto construtivo é composto de placas metálicas pintadas na cor branca e preta numa configuração em coroas circulares concêntricas, estrela ou quadriculados que ao sofrerem a incidência da radiação solar de forma igualitária se dilatam provocando uma diferença de tensão entre as seções pintadas. Uma termopilha gera através de termopares uma tensão elétrica diretamente proporcional a diferença de temperatura entre as placas metálicas nas cores preta e branca, cujo sinal, é convertido para a determinação da radiação solar global. (BRASIL, 2000). A Figura 31 mostra um modelo de piranômetro do tipo preto e branco com pilha termoelétrica.

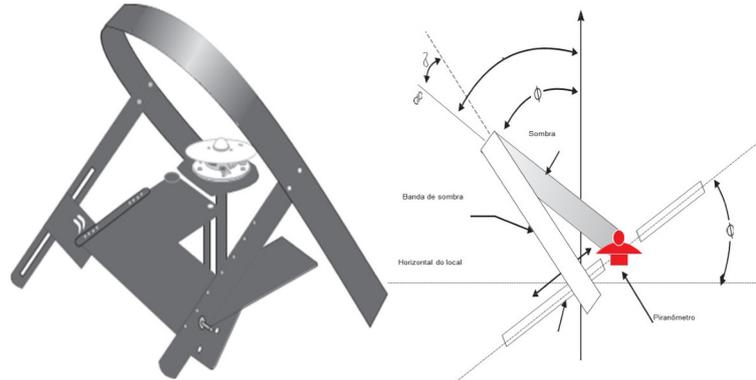
Figura 31 – Piranômetro com pilha termoelétrica



Fonte: Do Brasil, Atlas solarimétrico (2000)

Para a medição da radiação solar difusa é instalado junto ao piranômetro um dispositivo de banda de sombreamento que tem como funcionalidade impedir a incidência da radiação solar direta, e utilizando o mesmo princípio funcional de medição solarimétrica para a radiação solar direta se determina a radiação solar difusa devendo a banda de sombreamento ser posicionada paralelamente ao plano da eclíptica. (projeção sobre a esfera celeste da trajetória aparente do Sol observada a partir da Terra). Em geral o piranômetro apresenta boa integridade, linearidade e uniformidade na medição da radiação solar (BRASIL, 2000). A Figura 32 ilustra um piranômetro com banda de sombreamento para medição da radiação solar difusa.

Figura 32 – Piranômetro com banda de sombra para medição da radiação solar difusa



Fonte: Do Brasil, Atlas solarimétrico (2000)

2.6.2 Pireliômetro

Conforme IQBAL (1983) “Um pireliômetro é um instrumento para medir o fluxo de radiação solar direta na incidência normal. O instrumento é geralmente acoplado a um suporte equatorial acionado eletricamente para o Sol.”

O pireliômetro é um instrumento de medição da radiação solar direta normal bastante preciso com erro máximo de $\pm 0.5\%$ que utiliza o mesmo princípio funcional de medição do piranômetro, através de uma termopilha. Este instrumento é integrado diretamente aos sistemas de CSP com instalação junto ao coletor solar de forma a acompanhar o movimento aparente do Sol no céu pelo sistema de rastreamento do concentrador solar medindo a radiação solar direta com incidência normal no coletor durante todo o dia de modo contínuo. Em sua estrutura no seu aspecto construtivo possui paredes metálicas duplicadas para evitar qualquer influência dos ventos e da temperatura ambiente na medição da radiação solar direta, bem como, proporcionar a devida proteção contra as águas das chuvas. Apresenta em sua parte frontal uma abetura para propiciar a visualização do disco solar e a região circumsolar (BRASIL, 2000). A Figura 33 apresenta um modelo de pireliômetro para medição de radiação solar direta de incidência normal.

2.7 Projeto teórico de um CSP do tipo prato parabólico

Um concentrador solar do tipo prato parabólico para a sua máxima eficiência de transferência da radiação solar de um coletor para a geração de energia térmica no receptor depende de vários parâmetros dimensionais de projeto, entre eles, o formato da parábola do prato com a determinação de seu ponto focal, profundidade, diâmetro, área de abertura e a relação entre o foco e o diâmetro.

Figura 33 – Pireliômetro para medição de radiação solar direta



Fonte: Do Brasil, Atlas solarimétrico (2000)

2.7.1 A geometria do prato parabólico

O dimensionamento matemático de uma parábola é definido por pontos que se movem de forma simétrica em uma linha curva equidistantes de um ponto de origem (vértice) e de uma linha fixa (diretriz) no eixo cartesiano x y , onde o eixo x é o eixo da parábola e o eixo y a reta que passa pelo ponto médio (vértice) entre o foco da parábola (F) e a linha fixa (diretriz) (THAKKAR *et al.*, 2015).

A Figura 34 representa a geometria da parábola onde estão definidos os pontos que formam o desenho da parábola, bem como, a distância focal (F), a profundidade (h), o diâmetro (d) e o raio solar que incide sobre o prato parabólico refletido para o foco. A Equação 2.12 expressa o cálculo para a formatação da curva da parábola.

$$y^2 = 4 \cdot f \cdot x \qquad x = \frac{y^2}{4 \cdot f} \qquad (2.12)$$

A relação matemática definida pela distância focal em relação ao diâmetro do prato parabólico ($\frac{f}{d}$), agregado ao ângulo de aro (ψ) é que balizam o uso de parte da curva da parábola para o projeto dimensional do prato parabólico (BARBOSA, 2015).

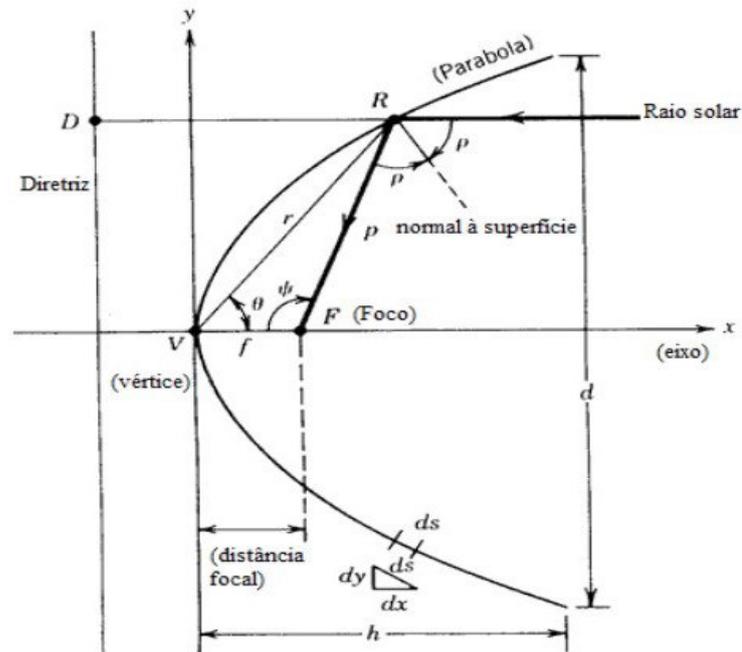
A Figura 35 ilustra segmentos de curvas da parábola com um foco em comum com o mesmo diâmetro definido para a parábola.

BARBOSA (2015) apresenta as seguintes expressões matemáticas para o cálculo dos parâmetros para um determinado segmento da parábola:

- a) Altura ou profundidade da parábola (h)

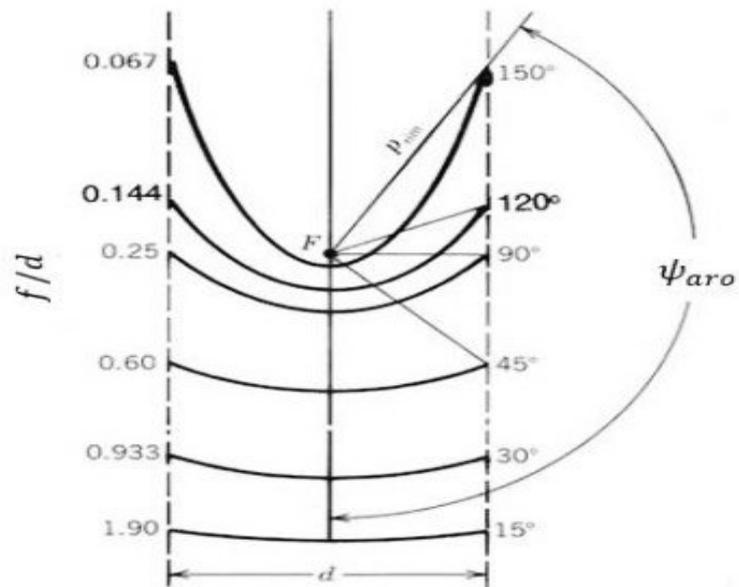
$$h = \frac{d^2}{16 \cdot f} \qquad (2.13)$$

Figura 34 – Dimensões de uma parábola



Fonte: FAREED, M., AUATF, S. and al.2012

Figura 35 – Curvas de uma parábola para um foco em comum com o mesmo diâmetro



Fonte: W.; GEYER, M.2015

b) Ângulo de aro (ψ_{aro})

$$\tan(\psi_{aro}) = \frac{1}{\frac{d}{8 \cdot h}} - \frac{2 \cdot h}{d} \quad (2.14)$$

c) A relação entre $\frac{f}{d}$ e o ângulo de aro (ψ)

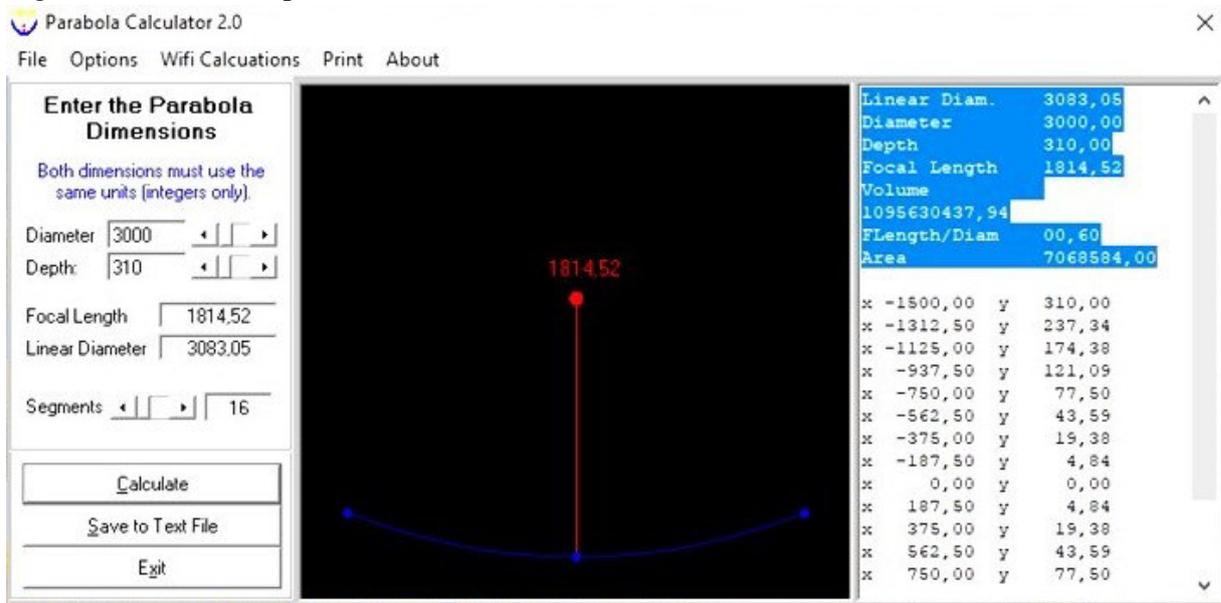
$$\frac{f}{d} = \frac{1}{4 \cdot \tan\left(\frac{\psi_{aro}}{2}\right)} \quad (2.15)$$

d) Comprimento do arco da parábola (S)

$$s = \left[\frac{d}{2} \cdot \sqrt{\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right)^2 + 1} \right] + 2f \cdot \ln \left[\frac{4 \cdot h}{d} \cdot \sqrt{\left(\frac{4 \cdot h}{d}\right)^2 + 1} \right] \quad (2.16)$$

O *software parábola calculator 2.0* com uma precisão significativa determina a obtenção dos valores numéricos destes parâmetros confirmando a lógica da fundamentação teórica apresentada para o cálculo das parábolas e os valores consolidados pelo *software* CATIA versão 8 para o prato parabólico objeto da pesquisa declinados na seção "Metodologia" na Tabela 2. A Figura 36 e a Tabela 1 mostram os resultados dos cálculos utilizando o "software parábola calculator 2.0."

Figura 36 – Software parábola calculator 2.0



Fonte: software calculator 2.0

Tabela 1 – Dados técnicos de projeto do prato parabólico - Software calculator 2.0

DADOS TÉCNICOS	VALOR	UNIDADE
Diâmetro do prato	3000	mm
Comprimento focal	1814,52	mm
Relação $\frac{f}{D}$	0,6	-
Área de abertura	7068584,00	mm^2
Profundidade do prato	310	mm
Diâmetro linear do prato	3083,05	mm
Volume do prato parabólico	1095630437,94	mm^3

Fonte: Autoria própria, (2024)

2.7.2 Espelhos refletores do prato parabólico

Outro fator de suma importância para a máxima eficiência ótica de um concentrador solar do tipo prato parabólico é o tipo de material e o formato do chamado espelho refletivo cuja finalidade é a entrega dos raios solares captados para o receptor integralmente, de modo a ser gerada energia térmica com a maior amplitude possível.

Matematicamente a refletividade é definida por:

$$R_i = \frac{I_{refletida}}{I_{incidente}} \quad (2.17)$$

Onde:

R_i é o índice de refletividade;

$I_{refletida}$ é a radiação refletida pelo espelho coletor;

$I_{incidente}$ é a radiação capturada pelo espelho coletor.

(BARBOSA, 2015) apresenta na Figura 37 os seguintes índices de refletividade para vários materiais que podem ser utilizados como espelho refletivo do concentrador, destacando-se a prata galvanizada com 0,96 de refletividade.

Figura 37 – Refletividade de alguns Materiais

Material	Refletividade ($\rho_{s,m}$)
Cobre	0,75
Espelho	0,97
Ouro	0,76 ± 0,03
Alumínio	0,82
Prata	0,94
Prata Galvanizada	0,96
Papel de alumínio	0,80

Fonte: (BARBOSA, 2015)

A prata por ter o maior índice de refletividade é o material mais utilizado para os espelhos dos pratos parabólicos, porém, dois fatores são importantes para uma avaliação no uso deste material, em primeiro lugar suas reservas são estimadas de 20 anos para a sua prospecção e em segundo lugar o alto custo envolvido. Ocorrendo o uso contínuo deste material se houver um

grande desenvolvimento na construção CSP, a escassez deste produto elevará ainda mais o seu custo inviabilizando economicamente o seu uso (GROSJEAN *et al.*, 2021).

Um estudo teórico realizado por GROSJEAN *et al.* (2021) mostrou que a substituição da prata pelo alumínio com a adição de várias camadas com materiais dielétricos sobre a camada de alumínio atingiu 96,1% de refletividade, portanto, superior a refletividade da prata e com menor custo de fabricação. Esta pilha dielétrica foi configurada com 8 finas camadas sobre o substrato alumínio sendo depositados de forma intercaladas 4 camadas de dióxido de titânio (TiO_2) e 4 camadas de fluoreto de magnésio (MgF_2) que ao serem submetidas a incidência dos raios solares atingiu a refletividade de 96,1%. Depreende-se que nesta área existem grandes oportunidades de pesquisa e desenvolvimento face as restrições de materiais e consideráveis custos para esse processo de refletividade dos raios solares nos sistemas CSP.

2.8 Indicadores de Performance dos CSP

O desempenho de um concentrador solar é avaliado por importantes grandezas ambientais, tais como, a irradiância solar incidente no concentrador, o calor ótico, calor útil, perdas óticas e as perdas de calor (THAKKAR *et al.*, 2015). A Figura 38 a partir da captação e reflexão da energia solar até a sua absorção e conversão em energia térmica apresenta os principais indicadores de performance. (BARBOSA, 2015) aponta as seguintes expressões matemáticas para determinar os resultados que avaliam o desempenho do sistema CSP do tipo prato parabólico.

2.8.1 Fator de concentração

É a razão entre a área útil da superfície refletora e a área da cavidade (foco) do receptor do CSP. Este fator descreve a quantidade de radiação concentrada pelo concentrador, sendo que, quanto maior for este fator de concentração, maior será a energia solar concentrada no ponto focal do receptor. (BARBOSA, 2015)

$$C = \frac{A_{\text{útil coletor}}}{A_{\text{receptor}}} \quad (2.18)$$

Onde:

C é o fator de concentração;

$A_{\text{útil coletor}}$ é a área útil da superfície refletora do concentrador (m^2);

Figura 38 – Balanço energético do tipo prato parabólico



Fonte: (THAKKAR *et al.*, 2015)

$A_{receptor}$ é área do foco do receptor (m^2).

.

2.8.2 Cálculo da eficiência térmica do CSP

A eficiência térmica do CSP é calculada separadamente considerando a eficiência térmica do concentrador e a do receptor de acordo com as seguintes equações:

2.8.2.1 Eficiência térmica do concentrador

É a razão entre o calor útil que será transferido para um fluido e o calor coletado pela superfície refletora determinada pela área de abertura do coletor vezes a irradiação solar total de incidência no coletor (BARBOSA, 2015).

$$\eta_{concentrador} = \frac{Q_{\text{útil}}}{A_{ac} \cdot I_b} \quad (2.19)$$

Onde:

$\eta_{concentrador}$ é a eficiência térmica do concentrador (%);

$Q_{\text{útil}}$ é o calor útil (W);

A_{ac} é a área de abertura do coletor (m^2);

I_b é a radiação solar incidente na área de abertura do coletor ($\frac{W}{m^2}$).

2.8.2.2 Eficiência térmica do receptor

É a razão entre o calor útil que será transferido pelo receptor para um fluido e o calor ótico da superfície refletora determinada pela área de abertura do coletor vezes a irradiação solar total de incidência no coletor vezes a eficiência ótica (BARBOSA, 2015).

$$\eta_{receptor} = \frac{Q_{\acute{u}til}}{A_{ac} \cdot I_b \cdot \eta_{\acute{o}tica}} \quad (2.20)$$

Onde:

$\eta_{receptor}$ é a eficiência térmica do receptor;

$Q_{\acute{u}til}$ é o calor útil; (W);

A_{ac} é a área de abertura do coletor (m^2);

I_b é a radiação solar incidente na área de abertura do coletor ($\frac{W}{m^2}$);

$\eta_{\acute{o}tica}$ é a eficiência ótica (%).

A eficiência térmica do receptor pode ser calculada também pela seguinte equação:

$$\eta_{receptor} = \frac{\dot{m}_{ar} \int_{T_{ar,entrada}}^{T_{ar,sai\acute{d}ada}} c_p(T) dT}{A_{ac} \cdot I_b \cdot \eta_{\acute{o}tico}} = \frac{\dot{m}_{ar} [h(T_{ar,sai\acute{d}ada}) - h(T_{ar,entrada})]}{A_{ac} \cdot I_b \cdot \eta_{\acute{o}tico}} \quad (2.21)$$

Onde:

\dot{m}_{ar} é a vazão mássica de ar (kg/s);

$T_{ar,entrada}$ é a temperatura de entrada do ar (K);

$T_{ar,sai\acute{d}ada}$ é a temperatura de saída do ar (K);

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

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

$h(T_{ar,sai\acute{d}ada})$ é a entalpia do ar de saída (kJ/kg);

A_{ac} é a área de abertura do coletor (m^2);

I_b é a radiação solar incidente na área de abertura do coletor ($\frac{W}{m^2}$);

$\eta_{\acute{o}tica}$ é a eficiência ótica.

2.8.3 Eficiência ótica do concentrador

É a eficiência que expressa o quantitativo de radiação solar incidente na superfície coletora e que é refletida para o receptor, levando-se em consideração os aspectos geométricos do coletor e do receptor do CSP (BARBOSA, 2015).

$$\eta_{\text{ótica}} = \rho_{sm} \cdot \tau_g \cdot \alpha_r \cdot S \quad (2.22)$$

Onde:

$\eta_{\text{ótica}}$ é a eficiência ótica (%);

ρ_{sm} é a refletividade do coletor;

τ_g é a transmitância do vidro envolvente do receptor;

α_r é a absortividade do receptor;

S é o sombreamento do receptor na área de abertura do coletor.

2.8.4 Cálculo do calor útil

É a radiação absorvida pelo receptor por unidade de área de abertura do concentrador considerando a radiação incidentes e as características óticas do receptor e do concentrador (BARBOSA, 2015).

$$Q_{\text{útil}} = Q_{\text{ótico}} - Q_{\text{perdas}} \quad (2.23)$$

Onde:

$Q_{\text{útil}}$ é o calor útil (W);

$Q_{\text{ótico}}$ é o calor ótico (W);

Q_{perdas} são as perdas de calor por condução, convecção e radiação no receptor (W).

2.8.5 Cálculo do calor ótico

É o calor absorvido pelo receptor resultante da radiação solar incidente na área de abertura do coletor (BARBOSA, 2015).

$$Q_{\text{ótico}} = A_{ac} \cdot \eta_{\text{ótica}} \cdot I_b \quad (2.24)$$

Onde:

$Q_{\text{ótico}}$ é o calor ótico (W);

A_{ac} é a área de abertura do coletor (m^2);

$\eta_{\text{ótica}}$ é a eficiência ótica (%);

I_b é a radiação solar incidente na área de abertura do coletor ($\frac{W}{m^2}$).

2.8.6 Cálculo das perdas de calor

São as perdas de calor no receptor resultantes do calor perdido por condução, convecção e radiação. Considerando que o isolamento do receptor possui materiais com baixa condutividade térmica, as perdas de calor por condução são desprezíveis (BARBOSA, 2015).
Da Equação 2.23

$$Q_{\text{perdas}} = Q_{\text{ótico}} - Q_{\text{útil}} \quad (2.25)$$

$$Q_{\text{perdas}} = (\rho_{sm} \cdot \tau_g \cdot \alpha_r \cdot S) - (\dot{m}_{ar} [h(T_{ar,saída}) - h(T_{ar,entrada})]) \quad (2.26)$$

2.9 Projetos de concentradores de energia solar instalados no mundo

Existem 4 tecnologias de CSP aplicáveis de reconhecida eficiência exergética e viabilidade econômica. O sistema de calhas parabólicas PTC com eficiência total de 11 a 16%, os refletores lineares Fresnel LFR, com eficiência total de 8 a 12%, a torre solar SPT, com eficiência de 12 a 16% e os pratos parabólicos PDC com eficiência maior que 30% (ALAMI *et al.*, 2023).

Com base nos dados da Tabela 16 no Anexo A para projetos de CSP instalados no mundo, desde 2004 utilizando estas tecnologias, cujo objetivo primário é a geração de energia elétrica (usina elétrica), observa-se as seguintes informações técnicas e estatísticas destes sistemas referenciados por (ALAMI *et al.*, 2023).

2.9.1 Tecnologia de CSP mais utilizadas

91 usinas são do tipo calha parabólica (64%);

34 usinas são do tipo torre solar (24%);

16 usinas são do tipo linear Fresnel (11%);

2 usinas são do tipo prato parabólico que foram descomissionadas (1%).

2.9.2 *Condição operacional*

114 usinas estão em operação (80%);

20 usinas estão na condição de não operacionalidade (14%);

9 usinas estavam em construção com previsão de início de operação para os anos (2022-2023) (6%).

2.9.3 *Classificação de operação das usinas por país*

Espanha possui 51 usinas em operação com capacidade total instalada de 2,3 GW;

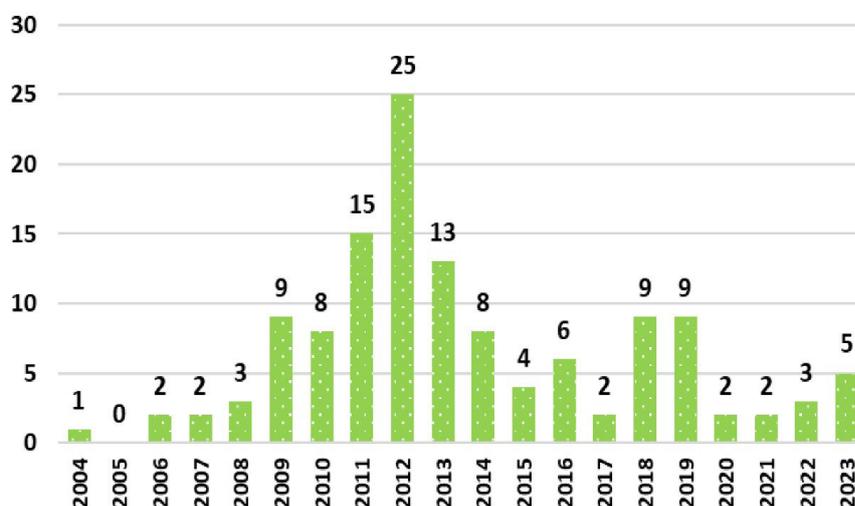
Estados Unidos da América possuem 26 usinas em operação com capacidade total instalada de 1,5 GW;

China possui 17 usinas com capacidade total instalada de 596 MW.

2.9.4 *Número de projetos instalados por ano*

A Figura 39 ilustra o número de projetos de CSP instalados por ano desde 2004 com destaques para os anos de 2012 e 2019 onde foram instalados respectivamente 25 e 9 projetos, apesar do ano 2019 apresentar condições operacionais extremamente adversas em razão da pandemia da COVID-19.

Figura 39 – Número de projetos de CSP instalados desde 2004



Fonte: Alami (2023)

2.10 Métodos de Resolução de problemas de Engenharia

MALISKA (2017) apresenta a utilização de três métodos matemáticos para a resolução de complexos problemas de engenharia, os métodos analíticos ou teóricos, os métodos experimentais e os métodos numéricos.

2.10.1 Métodos analíticos ou teóricos

Os métodos analíticos ou teóricos tem como característica principal para a resolução de problemas de engenharia a expressividade e compreensão da natureza do comportamento de um determinado fenômeno do objeto em estudo, a partir do cálculo de uma ou mais equações matemáticas que apesar de denotarem uma certa estabilidade nos resultados, apresentam em certas situações simplificações ou dificuldades quanto a natureza de ordens infinitas em decorrência da complexidade do fenômeno em estudo, bem como, muitas vezes da ausência de equações que venham a exprimir o fenômeno estudado (ALMEIDA, 2020).

2.10.2 Métodos experimentais

Os métodos experimentais nos mostra o comportamento dos fenômenos intrínsecos ao sistema de acordo com a sua realidade, ou seja, os fenômenos são reproduzidos de acordo com os seus processos reais ou bem próximo da realidade, e portanto, os resultados obtidos são específicos e mais exatos, devendo ser empregado quando não temos modelos matemáticos aproximados que representem a ocorrência do fenômeno, ou quando a geometria estrutural do objeto em estudo é complexa (ALMEIDA, 2020).

Em certas pesquisas o emprego dos métodos experimentais é inviável por exigir um aporte de altos investimentos monetários em equipamentos, dispositivos, instrumentos de medição, e em certas situações a possibilidade da reprodução exata do fenômeno em estudo é inviável ou existe um alto risco de acidentes de ordem ambiental, ou patrimonial, ou de segurança do trabalho (ALMEIDA, 2020).

2.10.3 Métodos numéricos

Os métodos numéricos são os mais utilizados por fornecerem resultados confiáveis bem próximos da realidade com custos exequíveis onde para qualquer geometria arbitrária do objeto de estudo, utilizando-se de modelos matemáticos pertinentes as equações diferenciais

ordinárias ou parciais através de softwares específicos com pouco dispêndio de tempo, são determinados os valores das variáveis em qualquer ponto de interesse da estrutura, sob qualquer domínio amplo ou restrito e sob as condições de contorno estabelecidas (MALISKA, 2017), (ALMEIDA, 2020)).

Os métodos numéricos computacionais essencialmente se utilizam de cálculos repetitivos com equações previamente estabelecidas, considerando diversos protótipos, reproduzindo o fenômeno estudado bem próximo da realidade. Os métodos computacionais mais utilizados são: o método das diferenças finitas (analisa a diferença entre pontos consecutivos); o método dos volumes finitos (analisa a diferença de volumes); o método dos elementos de contorno (analisa só o contorno do elemento) e o método dos elementos finitos, que será minuciosamente apresentado a partir deste ponto, por ter sido o método aplicado para a solução problema do escopo desta pesquisa (MALISKA, 2017) (ALMEIDA, 2020).

2.11 Método dos elementos finitos

O método dos elementos finitos (MEF) possui uma ampla gama de utilização nos mais variados ramos da engenharia sendo bastante confiável quanto a resposta requerida apresentando com clareza e objetividade os resultados obtidos, tais como problemas constantes, transitórios, lineares ou não lineares, análise de tensão, transferência de calor, fluxo de fluido, eletromagnetismo e etc. (MOAVENI, 2015)

2.11.1 Origem Método dos elementos finitos

No início dos anos 1900 pesquisadores usaram barras elásticas equivalentes discretizadas para modificarem o contínuo elástico das barras, mas foi em 1940 que Courant desenvolveu pioneiramente o método de elementos finitos usando as interpolações polinomiais em micro-partes de sub-regiões triangulares para investigar problemas de torção. O marco de desenvolvimento do método de elementos finitos veio com as pesquisas da Boeing que usou elementos de tensão triangular para modelar as asas de aviões. Nos anos da década de 1960 Clough popularizou o método expandindo-o para análise de transferência de calor e problemas de fluxo de infiltração. Pioneiramente Zienkiewicz e Cheung em 1967 protagonizaram o registro científico do método quando escreveram e lançaram o primeiro livro sobre o assunto (MOAVENI, 2015)

2.11.2 Principais características do MEF

De uma forma geral o método dos elementos finitos consiste na modelagem construtiva de um produto, objeto de pesquisa, em pequenos elementos com uma dimensão finita, denominada discretização, onde ao se aplicar equações matemáticas diferenciais nestes elementos temos respostas individuais, ou de uma área de interesse, ou uma resposta total global do produto para um determinado fenômeno, segundo as variáveis sob análise técnica, como por exemplo, deformações e tensões em uma análise estrutural de uma barra metálica submetida a esforços de carregamento (ALMEIDA, 2020).

2.11.3 Aplicação do MEF

O método dos elementos finitos pode ser aplicado em uma vasta gama de processos de engenharia com resultados bem aproximados da realidade. Sua aplicação perpassa por uma análise estática (linear, não linear, plasticidade, propagação de trincas); análise dinâmica (com ou sem amortecimento, modal e harmônica, linear e não linear, transiente e vibração aleatória), sendo a análise térmica, dinâmica dos fluidos, elétrica e eletromagnética campos de aplicação possíveis para o MEF (ALMEIDA, 2020).

2.11.4 Bases de MEF

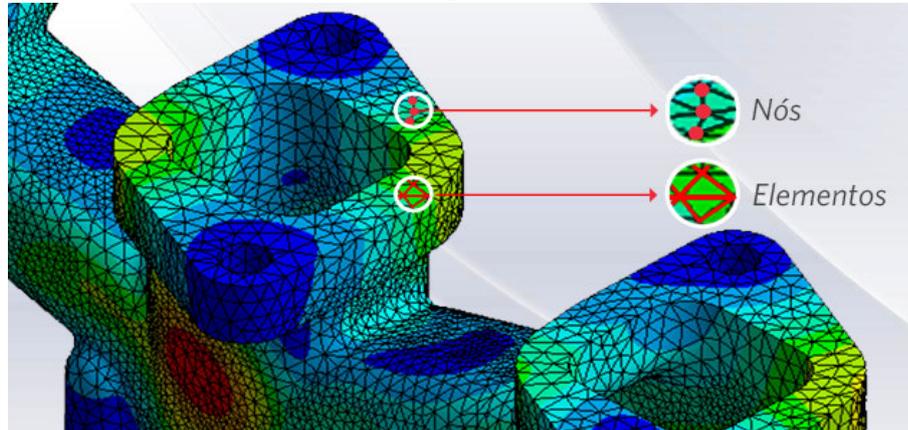
O método dos elementos finitos é em sua essência um método numérico que utiliza equações diferenciais para uma solução aproximada dos problemas de engenharia. A busca por uma maior aproximação da ocorrência de um fenômeno real com os seus resultados validados são os principais objetivos do MEF, considerando que o número de elementos finitos e suas incógnitas definidas para a geometria em análise são muito importantes, pois, quanto maior o nº de elementos, a resposta se aproxima da exatidão, porém, o tempo de resposta é maior exigindo mais recursos computacionais. Em regra não existe um procedimento padrão de definição do nº de elementos finitos e nós, porém, as boas práticas alinhadas com a verificação de independência de malhas podem definir a melhor configuração destes fatores (ALMEIDA, 2020).

2.11.5 Procedimento geral de análise do MEF

Na aplicação do MEF a geometria sólida do objeto de estudo é dividido em elementos de dimensões finitas, onde cada elemento é limitado por nós, sendo que a combinação de cada

nó com outro nó é realizada por equações matriciais que fornecem o resultado global do estudo em questão. A Figura 40 ilustra uma peça automotiva com a geração de malha destacando os elementos finitos com os seus respectivos nós (ALMEIDA, 2020).

Figura 40 – Malha com elementos finitos e respectivos nós



Fonte: <https://www.esss.com/>

Geralmente o procedimento base recomendado para análise do MEF segue as ações das decisões preliminares, pré-processamento, processamento e pós-processamento

2.11.5.1 *Decisões preliminares*

Esta etapa processual é realizada antes do uso do "software", onde se realiza o levantamento de dados que vão ser utilizados na simulação computacional, como por exemplo, o tipo de análise (estática, dinâmica, linear, não linear, transiente, etc.); a modelagem geométrica do objeto de estudo (dimensões, formatos, curvaturas, etc.); os materiais do objeto da pesquisa; as condições de contorno a serem aplicadas (cargas, fixações, engastes, etc.) e as alternativas de tipo de malha a ser aplicada, se densa ou esparsa, bem como o n° de elementos finitos com os respectivos n° de nós com o objetivo de economizar tempo de máquina computacional, pois, não é razoável que isso venha a ser definido no momento do processamento do estudo da pesquisa (ALMEIDA, 2020).

2.11.5.2 *Pré processamento*

Esta etapa consolida a parte pragmática dos pontos já definidos nas decisões preliminares, pois, o modelo do objeto sólido em estudo é gerado no computador a partir de um modelo base projetado em um programa específico de desenho técnico, indicando-se o material

ou materiais componentes do produto em análise, bem como, a aplicação das condições de contorno, com determinação do nº de elementos, nós e a respectiva geração otimizada da malha (ALMEIDA, 2020).

2.11.5.3 *Processamento*

Esta etapa é em si a aplicação plena do método dos elementos finitos no ambiente computacional, onde uma vez definidas as equações matemáticas diferenciais com suas variáveis que representam o fenômeno físico do objeto em estudo, os resultados são obtidos através dos cálculos sobre os nós do modelo, determinando-se o resultado global requerido da peça analisada.

Uma vez que o modelo contínuo é discretizado em elementos de tamanho finito cada elemento é limitado por nós, onde a resposta de cada nó quando combinados coletivamente fornecem a resposta global do modelo através de equações matriciais.

Para exemplo de efeito prático segue um procedimento de análise didática simplificada de cálculos de variáveis envolvendo a lei de Hooke, cargas, tensões e deslocamentos para um melhor entendimento da aplicação do MEF (ALMEIDA, 2020).

a) Lei de Hooke

$$\{F\} = \{K\} \cdot \{x\} \quad (2.27)$$

Onde:

F é o vetor força (força externa aplicada);

K é a matriz de rigidez;

x é o valor do deslocamento (movimento dos nós).

b) Montagem da matriz de rigidez elementares

A matriz de rigidez [K] elementares são montadas considerando os elementos e nós que guardam uma relação direta entre si para o cálculo das variáveis

$$[K_{12}] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} \\ K_{21} & K_{22} \end{bmatrix} \quad [K_{23}] = \begin{bmatrix} K_{22} & K_{23} \\ K_{32} & K_{33} \end{bmatrix}$$

c) Matriz de rigidez global

A partir das matrizes elementares é montada uma matriz global de rigidez com base no teorema de Castigliano utilizado para calcular deslocamentos em uma estrutura elástica linear, onde a energia de deformação de uma estrutura linear

elástica pode ser expressa em função de uma força aplicada.

$$[K_{11}] = \begin{bmatrix} K_{11} & K_{12} & K_{13} & \cdots & K_{1n} \\ K_{21} & K_{22} & K_{23} & \cdots & K_{2n} \\ K_{31} & K_{32} & K_{33} & \cdots & K_{3n} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ K_{n1} & K_{n2} & K_{n3} & \cdots & K_{nn} \end{bmatrix}$$

d) Cálculo do deslocamento das forças aplicadas

Para cada elemento é realizado o cálculo em seu próprio sistema de coordenadas, urgindo a necessidade de transferir todas as coordenadas de cada nó para um sistema global por meio de uma matriz de transformação antes de resolver a equação diferencial. Através das transformações se determina o deslocamento dada as forças aplicadas, conforme as equações delineadas na sequência:

$$\{F\} = [k] \cdot \{x\} \quad (2.28)$$

$$\{F\} = [K] \cdot [N] \cdot \{x\} \quad (2.29)$$

$$\{F\} = [K] \cdot \{x_G\} \quad (2.30)$$

$$\{F\} \cdot [K^{-1}] = [K] \cdot [K^{-1}] \cdot \{X_G\} \quad (2.31)$$

$$\{F\} \cdot [K^{-1}] = [1] \cdot \{X_G\} \quad (2.32)$$

$$\{F\} \cdot [K^{-1}] = \{X_G\} \quad (2.33)$$

Onde:

N é a matriz de transformação

X_G é o deslocamento no sistema global

e) Cálculo das tensões do modelo

Com o deslocamento calculado, através da geometria inicial do modelo e da lei de Hooke, se determinam as tensões do modelo.

$$\{\sigma\} = [\varepsilon] \cdot \frac{\{X_G\}}{[l_o]} \quad (2.34)$$

onde:

ε é a matriz de elasticidade do modelo

l_o é a geometria inicial do modelo

f) Cálculo das tensões gerais do modelo

Considerando os vários esforços e solicitações agindo simultaneamente sobre o modelo (torção, flexão, tensão, forças, etc.) isto torna imperativo utilizar algum critério de resistência.

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{1}{2}[(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2]} \quad (2.35)$$

onde:

σ_1 são as tensões gerais no modelo

σ_n são as tensões nos nós

Considere-se que todos os cálculos são realizados em ambiente computacional com capacidade suficiente de processamento, pois, é inexequível que tais cálculos se realizem fora do ambiente computacional.

2.11.5.4 Pós-processamento

Nesta etapa do processo vários pontos são analisados de forma a validar os resultados obtidos, atentando especialmente para a coerência dos resultados, como por exemplo, a localização de tensões, o equilíbrio entre reações e solicitações e outros fatores pertinentes ao fenômeno estudado. Vale salientar que o bom senso do engenheiro é fator crucial na validação dos resultados, considerando que eventuais correções, ou mesmo a otimização do modelo com troca de materiais, modificação da geometria do modelo podem ser realizados (ALMEIDA, 2020).

2.12 Revisão Bibliográfica

A tecnologia CSP, especificamente a do tipo prato parabólico tem despontado em diversas aplicações, especialmente em multi projetos com a finalidade de produzir hidrogênio como elemento combustível, caracterizando a energia verde tão necessária para a redução da emissão de gases de efeito estufa, e por conseguinte, o controle das mudanças climáticas. Estes estudos técnicos de produção de hidrogênio através da energia elétrica fornecida por um conjunto de pratos parabólicos provam que esta tecnologia é econômica e eficiente também para este fim.

Ghorbani *et al.* (2019) realizaram o estudo de uma usina com uma estrutura de liquefação de hidrogênio (LH_2) usando energia solar cuja produção alcança o quantitativo de 290 toneladas de hidrogênio líquido por dia, utilizando a tecnologia CSP configurado por um conjunto de pratos parabólicos produzindo através do ciclo Rankine orgânico a energia necessária para a efetivação do processo de produção do hidrogênio líquido. Estima-se um eficiência exergética do sistema de 73,57% semelhante a uma usina sediada em Ingolstadt na Alemanha.

MASTROPASQUA *et al.* (2020) realizaram uma análise técnica econômica, através de um estudo teórico proposto para um sistema de eletrólise de alta temperatura que utiliza um sistema CSP de múltiplos pratos parabólicos com microturbinas a gás posicionadas no foco das antenas para a geração de energia elétrica, visando uma produção de 150 kg/dia de hidrogênio. A configuração utilizada foi de dez pratos parabólicos, sendo nove para a geração de eletricidade por meio das microturbinas e uma fornecendo calor para a célula de eletrólise de óxido sólido. Nesta análise os parâmetros de resultados quanto a eficiência nominal de energia solar para hidrogênio foi acima de 30%, e a eficiência da célula de eletrólise em torno de 80% com custos nivelado de hidrogênio de 5,9 a 9,1 Euros/kg.

YILMAZ *et al.* (2019) apresentaram um estudo de multigeração assistida de energia solar com o objetivo para as utilidades de aquecimento, resfriamento, secagem, geração de energia e produção de hidrogênio usando a energia proveniente de um conjunto de concentradores solares do tipo prato parabólico agregado a uma estrutura de *Proton exchange membrane* (Membrana de Troca de Prótons) (PEM) eletrolisador, resfriamento por absorção de duplo efeito, secador e bomba de calor. O estudo demonstrou uma eficiência energética do sistema de 48,19% e uma eficiência exergética de 43,57%. Especificamente, os concentradores apresentaram uma alta eficiência energética e exergética, sendo respectivamente 47,23% e 42,14% equiparados ao do sistema como um todo, caracterizando um bom potencial energético para esta modalidade assistida de energia solar utilizando o concentrador solar do tipo prato parabólico.

BASEM *et al.* (2022) construíram uma usina híbrida parabólica solar a vapor constituída por um concentrador do tipo prato parabólico que gera a energia térmica para uma miniestação de vapor (turbina, gerador, condensador e uma bomba). Quanto ao aspecto dos parâmetros de resultados deste projeto o sistema gerou energia de 900 a 2000 W com uma eficiência útil de 31 a 34%.

YILMAZ e OZTURK (2022) em outro estudo mais recente na mesma linha de multigeração de energia solar agora para geração de energia, aquecimento, hidrogênio, amônia e água doce, utilizando um conjunto de concentradores solar do tipo prato parabólico e câmara de combustão, e agregados a estes, um ciclo de turbina a gás, ciclo de Rankine, uma unidade de produção de água doce, uma unidade de produção de hidrogênio, uma unidade de produção de amônia e uma unidade de célula de combustível de óxido sólido, realizaram uma análise de desempenho teórica do sistema demonstrando resultados de uma eficiência energética de 58,38% e uma eficiência exergética de 54,21%

EBRAHIMI *et al.* (2021) realizaram uma pesquisa para uma configuração integrada de unidade de liquefação de hidrogênio e um conjunto de concentradores solar do tipo prato parabólico com o objetivo de cogeração de hidrogênio líquido e oxigênio por ciclo de divisão termo-eletroquímico de água de magnésio-cloro. A análise indicou resultados expressivos de produção pelo sistema de 7.116 kg/h de hidrogênio líquido e 57.597 kg/h de oxigênio, alcançando um eficiência térmica total de 71,4% com um consumo específico de energia do ciclo de liquefação de 7,6 kWh/kg de LH_2 .

MEHRPOOYA *et al.* (2018) realizaram um estudo de simulação experimental de uma usina solar com a integração dos processos de dessalinização, refrigeração por absorção e produção de energia elétrica abastecidos pela energia térmica de um conjunto de concentradores do tipo prato parabólico e uma turbina a vapor que produziu 820,8 kW de refrigeração, água dessalinizada a uma taxa de 22,79 kg/s e 4632 kW de energia elétrica. A eficiência exergética do ciclo foi de 66,05% e a eficiência térmica geral de todo o sistema foi da ordem de 80,70%.

SALEH *et al.* (2017) construíram um concentrador solar do tipo prato parabólico com diâmetro de 2,4 m, distância focal de 0,85 m com refletividade do espelho de 0,90. O prato parabólico foi fabricado em fibra de vidro com água fluindo através do receptor numa razão de 0,4 kg/min. A temperatura máxima de saída do receptor foi de 635 °C para uma radiação solar de $857 W/m^2$, com a velocidade do vento de 3,6 m/s, a umidade de 59,6% e uma temperatura ambiente de 26 °C, não tendo sido divulgado a eficiência obtida no experimento.

O estudo realizado por SONI e REDDY (2024) investigou o uso concomitante de um conjunto de concentradores do tipo calha parabólica com um conjunto de concentradores do tipo prato parabólico integrados a unidade de armazenamento de energia térmica com o intuito de produzir 5.500 kW de potência para a produção de hidrogênio verde. Foi constatada uma eficiência de 15,06% para os concentradores do tipo calha parabólica com perda ótica no receptor de 26,4% e para os concentradores do tipo prato parabólico uma eficiência de 18,80% com perda ótica de 16,1% para uma produção máxima anual de 238,38 toneladas de hidrogênio.

KULAL e PATIL (2016) realizaram um estudo prático de um concentrador do tipo prato parabólico para a análise do desempenho do coletor de raios solares para três tipos diferentes de materiais refletores, uma chapa de aço inoxidável, uma película de alumínio e uma outra película de prata. Os pesquisadores não registraram os aspectos dimensionais e construtivos do concentrador solar do tipo parabólico, porém, divulgaram as eficiências do concentrador em 19,8% utilizando a chapa de aço inoxidável como material refletivo, 26,58% para a película de prata e 24,07% para a película de alumínio, caracterizando a película de prata como o melhor material refletivo e contributivo para uma maior eficiência do concentrador.

MOHAMED *et al.* (2012) fabricaram um concentrador solar prato côncavo em chapas de aço galvanizado com espelhos com capacidade de refletividade de 76%, dimensionalmente configurado com 1,6 m de diâmetro, profundidade de 0,018 m e distância focal de 0,84 m com o objetivo base para o aquecimento de água. Equipado com um sistema de rastreamento do Sol e instrumentos de medição da temperatura e da energia solar a água aqueceu ao nível de 80 °C com uma eficiência do concentrador de 30%.

El *et al.* (2009) realizaram um estudo experimental de um concentrador solar do tipo prato parabólico com dimensões de 2,2 m de diâmetro, 3,8m² de área de superfície do coletor, profundidade da parábola de 0,4 m e uma distância focal de 0,75 m. A temperatura média alcançada no receptor composto de dois discos alcançou 400 °C e uma eficiência de 27% com aplicação prática desta energia térmica para o aquecimento de água, geração de eletricidade e produção de vapor.

ZAYED *et al.* (2020) tendo como plataforma de estudo um projeto técnico de um concentrador solar do tipo prato parabólico, inicialmente de modo teórico e posteriormente experimental com o objetivo de estabelecer os parâmetros dimensionais óticos e geométricos de maior e melhor performance para o concentrador solar, estabeleceram para este objetivo um ângulo de borda de 45°, uma distância focal de 7,54 m, uma concentração geométrica de 2.498 e

uma eficiência de 19,55%.

BUSCEMI *et al.* (2020) por análise teórica desenvolveram uma pesquisa sobre a forma de deposição da poeira nos espelhos do concentrador solar, considerando que este agente influi de forma direta na eficiência ótica do concentrador, os dados da pesquisa indicaram que 80% da poeira depositada foi por deposição úmida e o restante por deposição seca, porém, esta última modalidade de deposição é de frequência diária.

UZAIR *et al.* (2017) utilizando um sistema computacional realizaram um estudo da fluidodinâmica do fluxo de ar ao redor do prato e do receptor térmico de um concentrador solar para diferentes ângulos de incidência estabelecendo como resultado as perdas térmicas dimensionada em até 40%.

XIAO *et al.* (2020) num estudo com abordagem no desempenho ótico e térmico de um concentrador solar do tipo parabólico por sistemas computacionais verificaram que os parâmetros posicionais do ângulo de aro e do ângulo de inclinação do prato parabólico estabeleceram um aumento na eficiência térmica de 2,61% e 2,43% respectivamente, e que a posição do receptor e a emissividade aumentaram de forma mais significativa a eficiência em 8,1% e 1,82%, respectivamente.

GHOLAMALIZADEH e CHUNG (2017) considerando os principais parâmetros construtivos de um concentrador solar do tipo prato parabólico projetaram que ao realizar o aumento do diâmetro do prato parabólico de 3 m para 5 m, houve um acréscimo na produção anual de energia de 1,95 GWh para 6,74 GWh melhorando a performance do sistema.

NUWAYHID *et al.* (2001) em um estudo de um conjunto de dois concentradores solares parabólicos, um com diâmetro de 2,00 m manufaturado em alumínio e outro com 1,60 m fabricado em aço inoxidável, considerando a refletividade destes materiais concluíram que o concentrador construído em alumínio alcançou uma temperatura máxima de 250 °C no receptor e o concentrador produzido com aço inoxidável atingiu a temperatura máxima de 350 °C estabelecendo que apesar de menor diâmetro o concentrador de aço inoxidável obteve melhor performance.

SANDOVAL *et al.* (2019) utilizando sistema de modelagem matemáticas compararam dois diferentes concentradores solares para a obtenção da temperatura máxima alcançada. O primeiro concentrador estudado com distância focal de 4,87 m alcançou uma temperatura de 1.150 K e o segundo com a distância focal de 2,47 m atingiu temperaturas próximas de 301 K, ou seja, uma temperatura 4 vezes menor demonstrando a influência deste parâmetro na entrega

da temperatura, e por conseguinte, energia térmica.

MALIK *et al.* (2022) elaboraram um artigo de revisão sobre CSP com 156 estudos catalogados nesta área, dentre eles, alguns já supracitados, porém, alguns resultados são interessantes de serem conhecidos para subsídios de projetos da área, como por exemplo, o emprego da prata como material refletivo é o melhor material a ser utilizado no prato parabólico por ter uma excelente refletividade de 97% e uma temperatura de trabalho de 125 °C. Outra conclusão importante aponta que a produção de eletricidade através de um sistema de concentradores do tipo prato parabólico, tem como referência uma eficiência global de 22,75% com um custo de 0,2565 dólares/kWh gerado.

Estes estudos até aqui delineados parecem indicar que os sistemas integrados de processos industriais assistidos por energia solar com fluxo de energia utilizando concentradores solares do tipo prato parabólico são promissores, porém, devem ser melhor pesquisados e efetivados construtivamente numa usina real para confirmação das eficiências dos sistemas alcançadas nos estudos teóricos, bem como, o desenvolvimento progressivo para o alcance de maiores eficiências energéticas e exergéticas. Outro ponto importante a ser mencionado é que a geometria do prato parabólico e os materiais refletivos devem ser exaustivamente estudados e pesquisados para se obter os melhores parâmetros construtivos, especialmente a técnica de modelagem do prato parabólico para a maior e melhor eficiência do sistema.

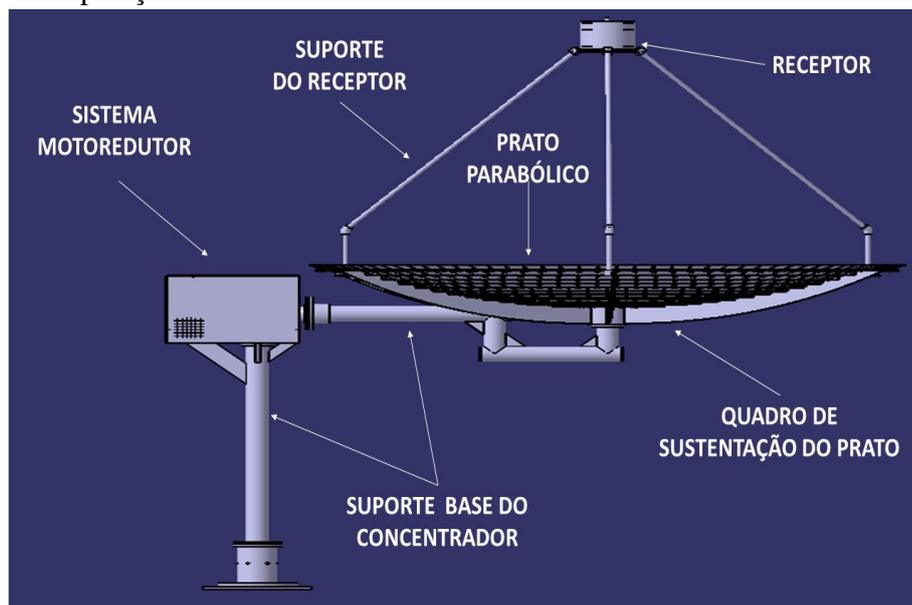
3 METODOLOGIA

Nesta seção são apresentados os aspectos construtivos concernentes ao projeto e aos materiais definidos para a fabricação de um concentrador solar do tipo prato parabólico de ponto focal fixo para a geração de energia térmica visando como produto final a produção de hidrogênio verde por reforma a vapor com excelência em todos os seus aspectos técnicos. Esta seção apresenta em seu desenho estrutural o projeto, a manufatura executada e a realização de simulações técnicas para o conjunto do prato parabólico do concentrador solar, excluído do escopo desta pesquisa o estudo do receptor.

3.1 Projeto do concentrador solar prato parabólico

O projeto do concentrador solar foi realizado na base técnica-operacional do LHMT da Universidade Federal do Ceará – UFC no Campus do Pici na cidade de Fortaleza, estado do Ceará - Brasil, por equipe especializada utilizando como recurso técnico computacional o software CATIA versão 8 para a modelagem do prato parabólico, quadro de sustentação do prato, o sistema para a movimentação do concentrador solar, através de um conjunto composto por um motor e um redutor, o receptor com os seus suportes de sustentação e o suporte base de toda a estrutura do concentrador solar. A Figura 41 ilustra a composição do concentrador solar prato parabólico.

Figura 41 – Composição do concentrador solar



Fonte: Elaborado pelo autor

As premissas básicas para a proposição das especificações técnicas do projeto do concentrador solar foi centrada na necessidade da disponibilidade de uma potência de 1800 W de energia térmica do sistema para os mais variados fins de geração de energia ou utilidades, com uma irradiação solar média de 600 W/m^2 e uma eficiência do sistema de 46%, sendo os dados de potência e eficiência obtidos através de simulações computacionais e a irradiância solar em softwares demonstrativos de radiação solar. Estudos de viabilidade técnica e econômica considerando o montante de energia requerida, as condições do meio ambiente de instalação do concentrador solar, eficiência do sistema e segurança operacional, indicaram o concentrador de energia solar do tipo prato parabólico com melhor viabilidade para o atendimento dos requisitos de projeto.

A partir desta realidade utilizando-se dos recursos técnicos de engenharia e computacionais foram determinadas as dimensões métricas, a geometria do modelo do concentrador solar, especificamente os seus componentes com os respectivos materiais, bem como, os sistemas e dispositivos imprescindíveis para o pleno funcionamento de todo o conjunto do concentrador solar.

3.1.1 Memorial de cálculo do projeto do prato parabólico

As especificações técnicas do projeto do concentrador solar mostradas na Tabela 2 foram obtidas a partir do seguinte memorial de cálculo:

Tabela 2 – Especificações técnicas de projeto do concentrador solar

ESPECIFICAÇÃO	VALOR	UNIDADE
Diâmetro do prato	3,00	m
Área de abertura	7,07	m^2
Ângulo de aro	45	graus
Comprimento focal	1,81	m
Relação $\frac{f}{D}$	0,60	-
Profundidade do prato	0,311	m
Diâmetro linear do prato	3,083	m
Volume do prato	1,099	m^3

Fonte: Elaborado pelo autor

a) Diâmetro do prato parabólico

$$D = \sqrt{\frac{4P}{\eta \cdot \pi \cdot I}} \quad (3.1)$$

Sendo $P = 1800 \text{ W}$ (potência); $\eta = 0,46$ (eficiência do sistema); $\pi = 3,1416$ e

$I = 600 \text{ W/m}^2$ (irradiância sola média), resolvendo a Equação 3.1, $D = 3,00 \text{ m}$ (Diâmetro do prato parabólico).

b) Área de abertura

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (3.2)$$

Sendo $D = 3,00 \text{ m}$, resolvendo a Equação 3.2, $A = 7,07 \text{ m}^2$ (área de abertura do prato parabólico).

c) Ângulo de aro

Como parâmetro de projeto foi adotado o ângulo de aro de 45 graus.

d) Comprimento focal

$$f = \frac{D}{4 \cdot \tan \frac{\theta}{2}} \quad (3.3)$$

Sendo $D = 3,00 \text{ m}$ (diâmetro do prato parabólico), $\theta = 45$ graus (ângulo de aro), resolvendo a Equação 3.3, $f = 1,81$ (comprimento focal).

e) Relação $\frac{f}{D}$

$$R = \frac{f}{D} \quad (3.4)$$

Sendo $f = 1,81 \text{ m}$ (comprimento focal), $D = 3,00 \text{ m}$ (diâmetro do prato parabólico), resolvendo a Equação 3.4, $R = 0,60$ (relação $\frac{f}{d}$)

f) Profundidade do prato parabólico

$$d = \frac{D^2}{16 \cdot f} \quad (3.5)$$

Sendo $D = 3,00 \text{ m}$ (diâmetro do prato parabólico), $f = 1,81 \text{ m}$ (comprimento focal), resolvendo a Equação 3.5, $d = 0,311 \text{ m}$ (profundidade do prato parabólico).

g) Diâmetro linear do prato parabólico

$$D_{LP} = 2 \cdot \sqrt{d(4 \cdot f + d)} \quad (3.6)$$

Sendo $d = 0,311 \text{ m}$ (profundidade do prato parabólico), $f = 1,81 \text{ m}$ (comprimento focal), resolvendo a Equação 3.6, $D_{LP} = 3,06 \text{ m}$ (Diâmetro linear do prato parabólico).

h) Volume do prato parabólico

$$V_p = \frac{1}{2} \cdot \pi \cdot r^2 \cdot d \quad (3.7)$$

Sendo $r = 1,5$ m (raio do prato parabólico), $d = 0,311$ m (profundidade do prato parabólico), resolvendo a Equação 3.7, $V_p = 1,099$ m^3 (volume do prato parabólico).

3.2 Projeto dos componentes do concentrador de energia solar

O concentrador de energia solar foi projetado com uma composição de três conjuntos integrados entre si formados pelo prato parabólico, o sistema de sustentação e movimentação do concentrador solar e o receptor. Para a garantia de sua durabilidade, resistência e segurança em sua operacionalidade, visando alcançar os objetivos previstos no projeto, todos os conjuntos foram submetidos a simulação de teste estrutural ou de flexão utilizando-se do software ANSYS.

3.2.1 O conjunto do prato parabólico

Este conjunto é a parte central do concentrador solar responsável pela captura dos raios solares e seu redirecionamento para um ponto focal fixo no receptor. É composto por um cilindro central, seis arcos e uma armação de malha com anéis de alumínio para sustentação do prato, e o prato parabólico propriamente dito.

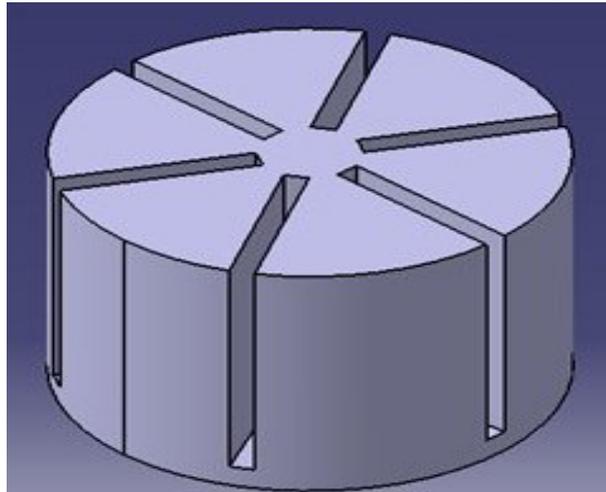
3.2.1.1 Cilindro central

O cilindro central tem como função promover a união dos arcos de sustentação, tendo em sua composição o material alumínio 6351 projetado dimensionalmente para um diâmetro de 100 mm com ranhuras de 10 mm de largura e altura de 130 mm. Este componente foi manufaturado pelos processos de corte, usinagem e fresamento de seus canais de encaixe (ranhuras) dos arcos de sustentação. A Figura 42 ilustra o projeto base do cilindro central.

3.2.1.2 Arcos de sustentação do prato parabólico

Os arcos de sustentação do prato parabólico foram determinados em número de seis em chapa laminada 5052F com comprimento de 1500 mm, espessura de 10 mm e altura de 110 mm na face de união com o cilindro central, tendo a sua fabricação sido realizada em processo

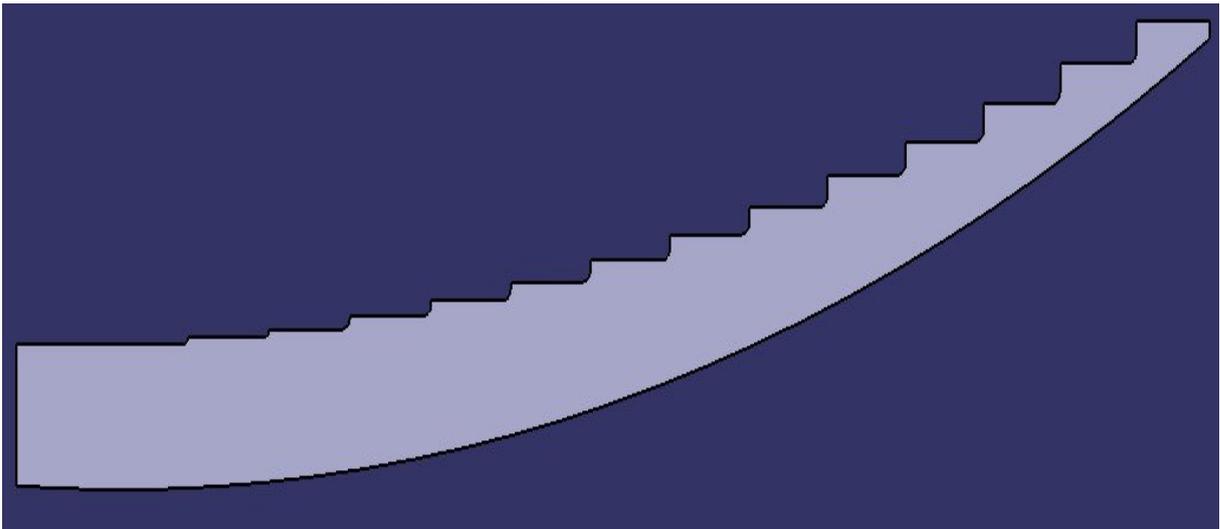
Figura 42 – Cilindro central de união dos arcos de sustentação do prato



Fonte: Elaborado pelo autor

de corte a laser. A Figura 43 ilustra o desenho do arco de sustentação do prato parabólico.

Figura 43 – Arcos de sustentação do prato parabólico

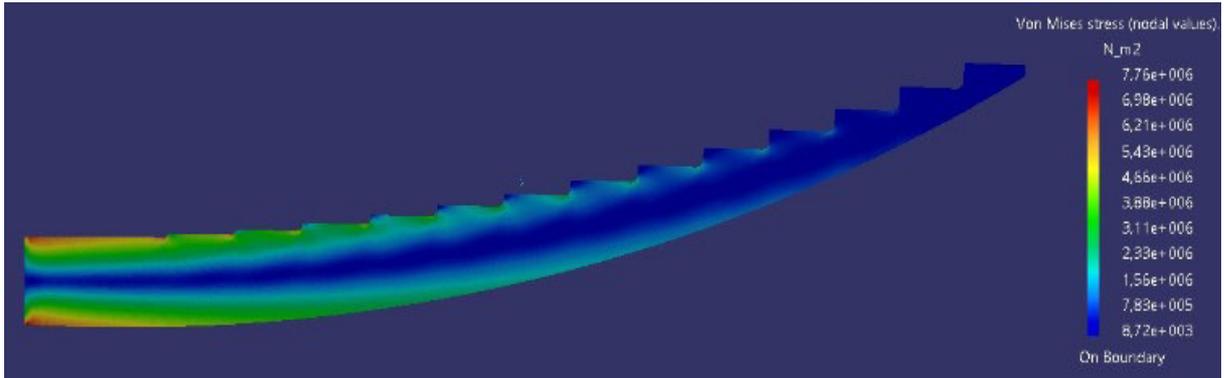


Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 44 e a Figura 45 ilustra respectivamente a simulação estrutural e a de flexão para o arco de sustentação do prato parabólico, as quais, não demonstraram qualquer anormalidade ou fator de comprometimento da estrutura, sendo a flexão calculada em 19,06 mm do arco.

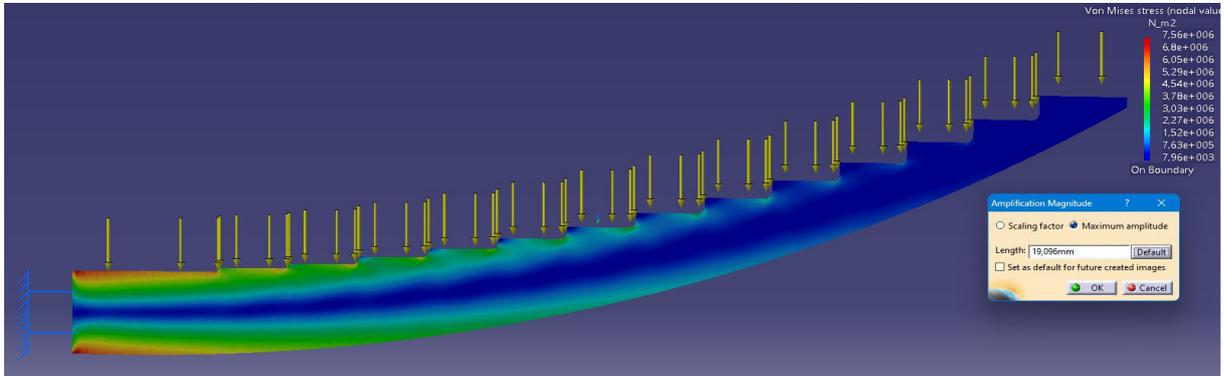
A Figura 46 apresenta a simulação estrutural do subconjunto cilindro central e arcos de sustentação do prato parabólico unidos pelo processo de solda TIG em liga de alumínio 4043 não apresentando nenhuma anomalia.

Figura 44 – Simulação estrutural dos arcos de sustentação do prato parabólico



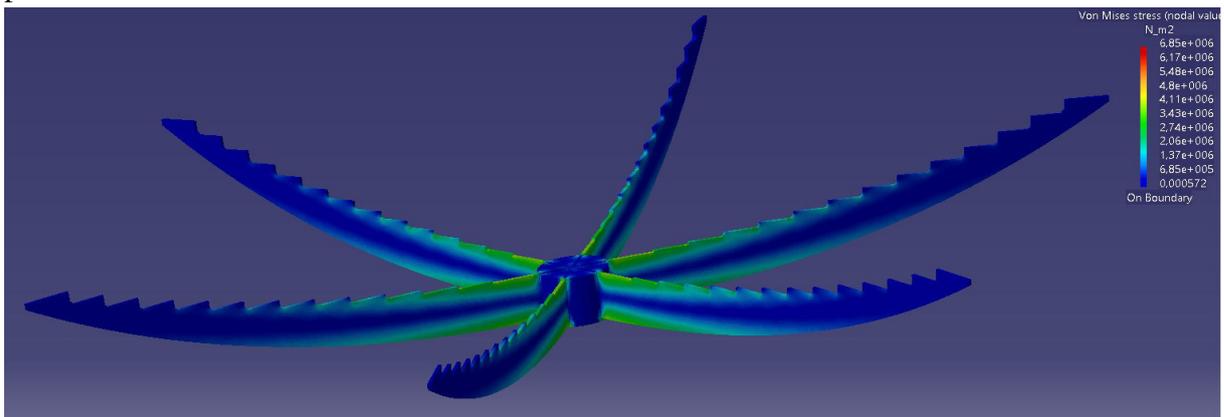
Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 45 – Simulação de flexão dos arcos de sustentação do prato parabólico



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 46 – Simulação estrutural do subconjunto cilindro central e arcos de sustentação do prato parabólico



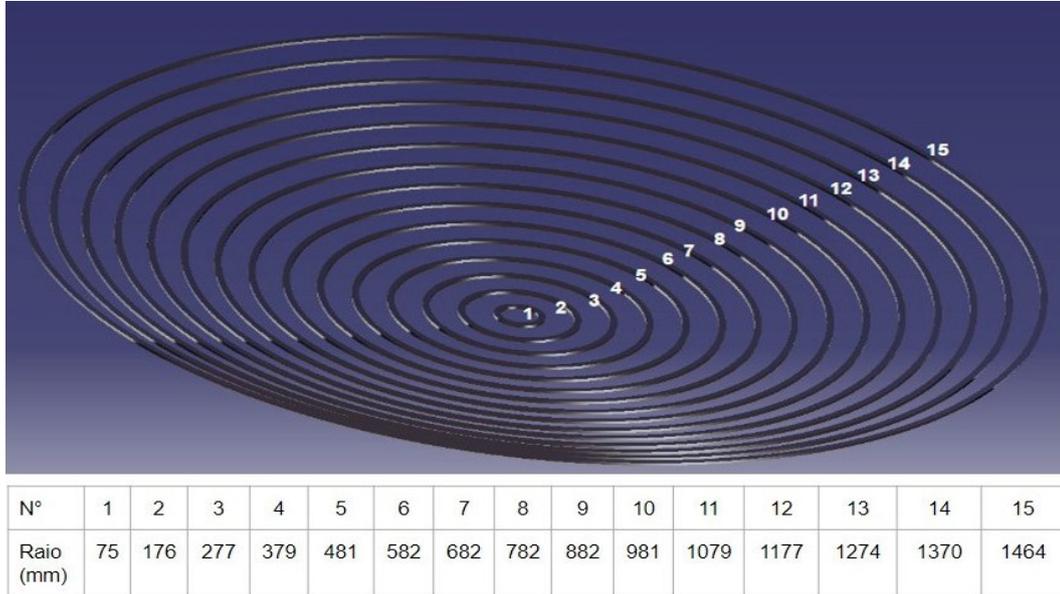
Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1.3 Malha com anéis de alumínio para sustentação do prato

A armação com a malha de 15 anéis foi projetada para ser fabricada em alumínio com corte a laser servindo como um elemento de integração entre os arcos de sustentação do

prato e o prato parabólico propriamente dito. A malha é constituída de 15 anéis. A Figura 47 apresenta a malha com anéis de alumínio para sustentação do prato parabólico.

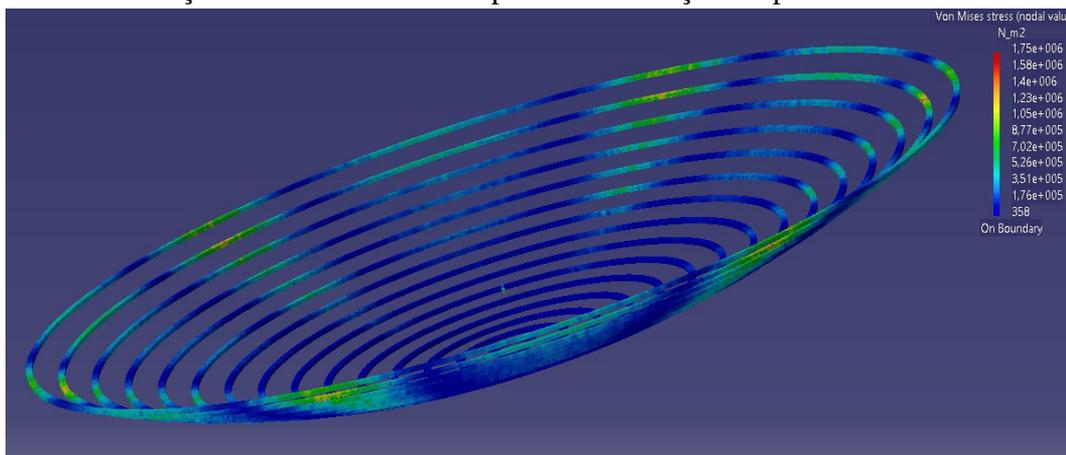
Figura 47 – Malha com anéis de alumínio para a sustentação do prato



Fonte: Elaborado pelo autor

Para este componente foi realizada uma simulação estrutural, na qual, não houve nenhum fator de comprometimento na estrutura da armação da malha, mostrado na Figura 48

Figura 48 – Simulação estrutural da Malha para a sustentação do prato



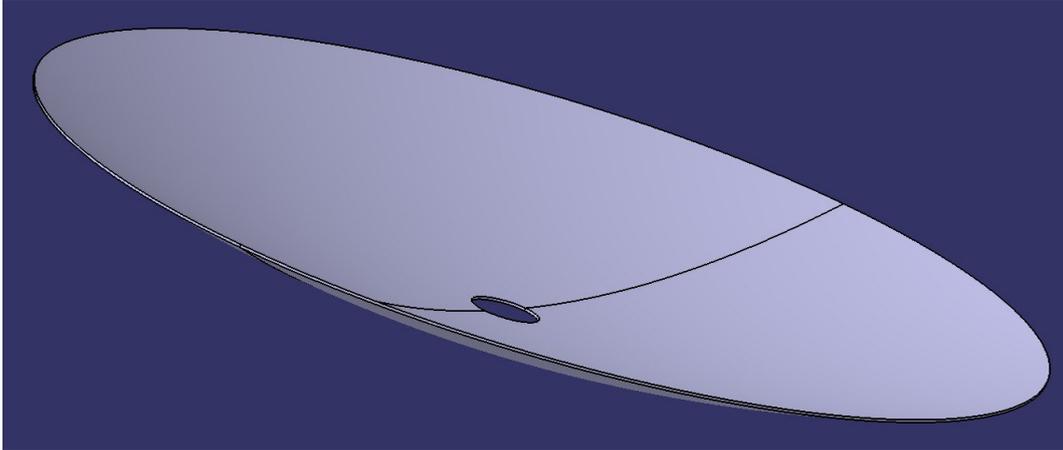
Fonte: Elaborado pelo autor

Para os fins deste trabalho, considerou-se que a estrutura do braço robótico (coluna e braço do concentrador solar) é perfeitamente rígida e indeformável. Por este motivo será considerado apenas a deformação a partir do ponto de união do espelho com este braço. Esta hipótese é confirmada pelos cálculos estruturais do projeto preliminar realizado.

3.2.1.4 Prato parabólico

O prato parabólico foi projetado para ser fabricado em fibra de vidro com diâmetro de 3 m e profundidade de 310,66 mm. A Figura 49 mostra o projeto base do prato parabólico.

Figura 49 – Prato parabólico



Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.1.5 Espelhos do prato parabólico

A refletividade do espelho do prato parabólico é um dos mais importantes elementos para a otimização da eficiência térmica do sistema CSP e preliminarmente foi escolhida a película de alumínio especial com refletividade que pode alcançar até 95% de acordo com o fabricante. Outro ponto importante é a definição da aplicação da película sobre o prato parabólico de forma a preservar a curvatura e a integridade da película mantendo as características de índice de refletividade desejada.

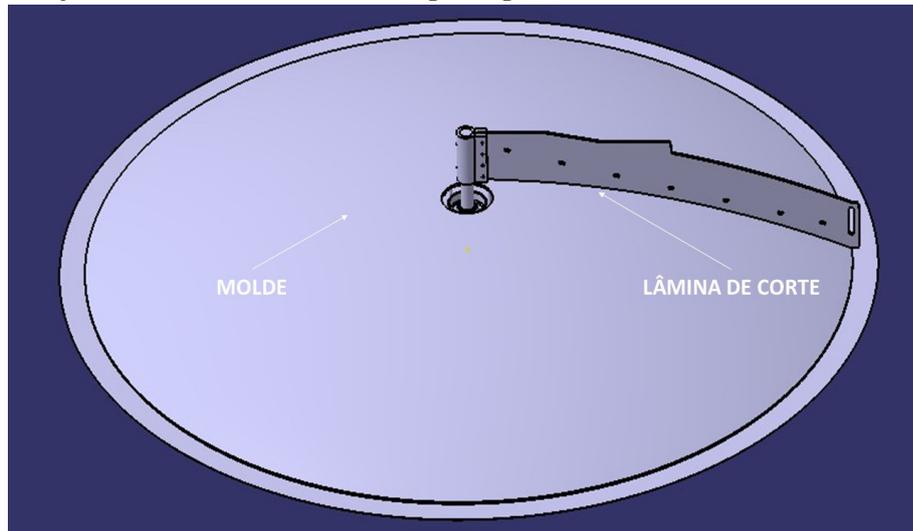
3.2.1.6 Modelagem do prato parabólico

Considerando as rígidas especificações técnicas dimensionais e de desempenho desejadas do prato parabólico, optou-se pela construção de um molde composto de vergalhões, chapas galvanizadas e uma lâmina rotativa para corte e acabamento da abóbada de espuma de poliuretano A + B modeladora para a fabricação do prato parabólico em fibra de vidro.

Esta metodologia de fabricação do molde do prato parabólico foi ancorada no referencial experimental devido a inexistência de qualquer referencial teórico, após exaustivas discussões técnicas da equipe do LHMT quanto ao procedimento de fabricação do molde tendo

em vista alcançar a harmonia, precisão e exatidão dos parâmetros dimensionais calculados no projeto do prato parabólico. A Figura 50 ilustra o projeto do sistema de molde do prato parabólico e a Tabela 3 mostra a sequência lógica da fabricação do molde para confecção do prato parabólico do concentrador solar.

Figura 50 – Projeto do sistema de molde do prato parabólico



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 3 – Fabricação do molde do prato parabólico

ETAPA DE FABRICAÇÃO DO MOLDE	REGISTRO FOTOGRÁFICO
Marcação do molde no piso	
Fixação dos vergalhões	

Continua na próxima página

Tabela 3 – *Fabricação do molde do prato parabólico (Continuação da Tabela)*

ATIVIDADE	REGISTRO FOTOGRÁFICO
Colocação da base da lâmina	
Fixação das chapas (gomo) abóbodas	
Colocação do PU sobre a abóbada	
Instalação da lâmina de corte do PU	

Fonte: Elaborado pelo autor

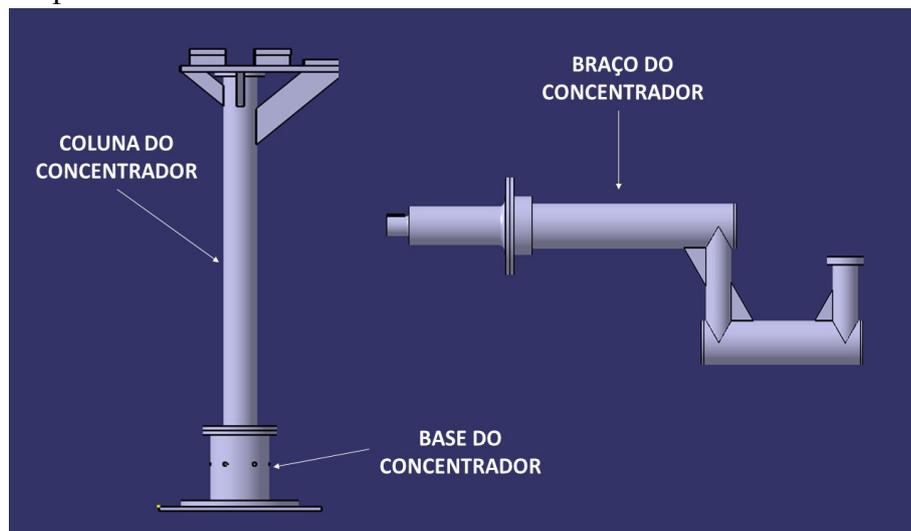
3.2.2 O conjunto do sistema de sustentação e movimentação do concentrador solar

Este conjunto tem como finalidade promover a sustentação do concentrador solar e movimentar o prato parabólico de modo a rastrear a posição e a aparente trajetória do Sol no sentido cardeal leste-oeste. O movimento de seguimento do Sol na direção norte-sul está prevista, porém, ainda passível de seu comissionamento operacional.

3.2.2.1 Coluna, base e braço do prato parabólico

A estrutura do suporte base do concentrador solar foi projetada e fabricada utilizando aço 1020/45 usinado com seus componentes unidos pelo processo de solda e pintados em seu acabamento final. A Figura 51 mostra a estrutura do suporte base do concentrador solar projetado e a Tabela 4 o descritivo das peças componentes do sistema de sustentação do prato parabólico com os respectivos materiais, quantitativos e dimensões geométricas básicas.

Figura 51 – Suporte base do concentrador solar



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 4 – Descritivo dos componentes do suporte base do concentrador solar

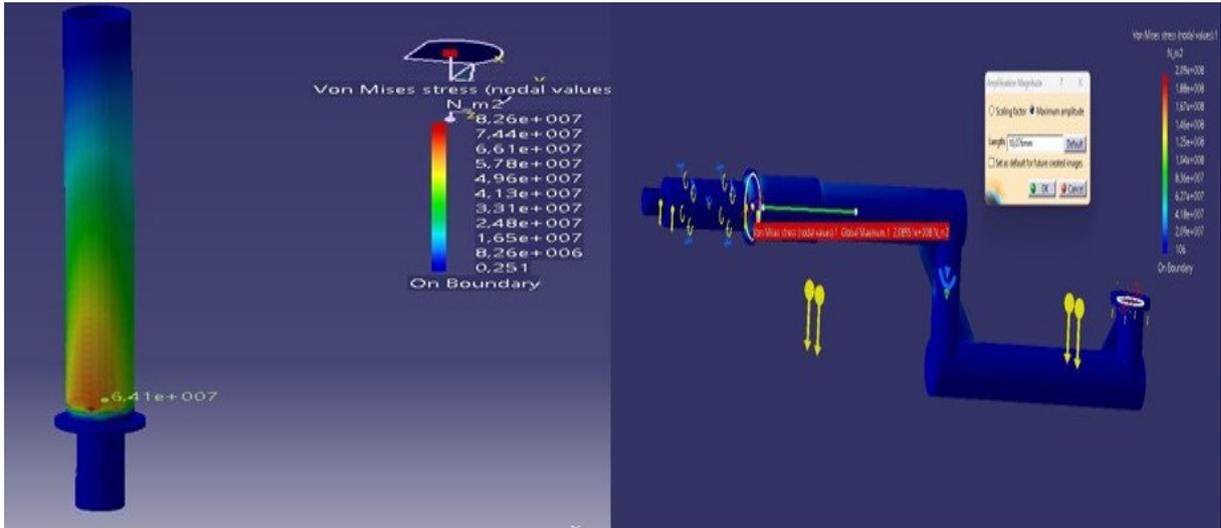
DESCRIÇÃO	MATERIAL	QUANTIDADE	DIMENSÕES
Base	Aço carbono 1020/45	1	$\phi = 199$ mm, h = 320 mm,
Coluna	Aço carbono 1045	1	$\phi = 114,3$ mm, c = 1,48 m,
Braço	Aço carbono 1045	1	$\phi = 114,3$ mm, c = 2,10 m

ϕ - Diâmetro; c - comprimento; h - altura

Fonte: Elaborado pelo autor

A Figura 52 apresenta a simulação estrutural da coluna e do braço do concentrador solar sem qualquer fator de anormalidade ou ponto crítico.

Figura 52 – Simulação estrutural da coluna e do braço do concentrador solar

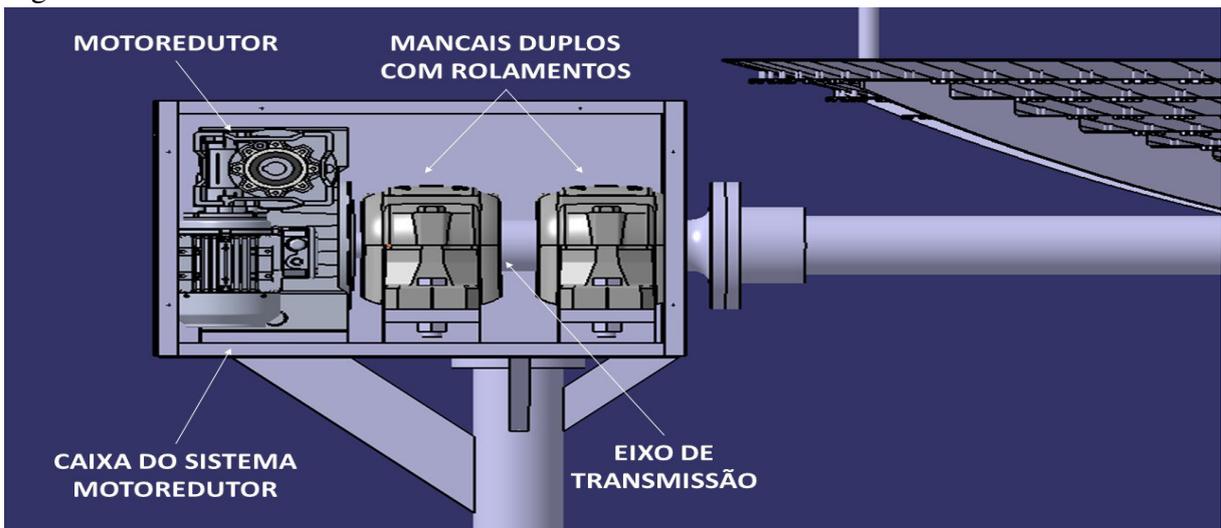


Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.2 Projeto da caixa do sistema motoredutor do concentrador solar

A estrutura da caixa do sistema motoredutor do concentrador solar foi projetada utilizando aço 1045 usinado com seus componentes unidos pelo processo de solda e pintados em seu acabamento final. A Figura 53 mostra a caixa do sistema motoredutor do concentrador solar projetado e a Tabela 5 o descritivo das peças da caixa do sistema motoredutor do concentrador solar com os respectivos materiais, quantitativos e as dimensões geométricas básicas.

Figura 53 – Caixa do sistema motoredutor do concentrador solar



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 5 – Descritivo da caixa do sistema motoredutor do concentrador solar

DESCRIÇÃO	MATERIAL	QUANTIDADE	DIMENSÕES
Caixa	Aço carbono 1045	1	L = 660 mm, c = 606 mm h = 500 mm
Motoredutor	Redução 1:4000	1	-
Mancais	SNC 522 619 vm	2	-
Rolamentos	SKF 22222 GK	2	-

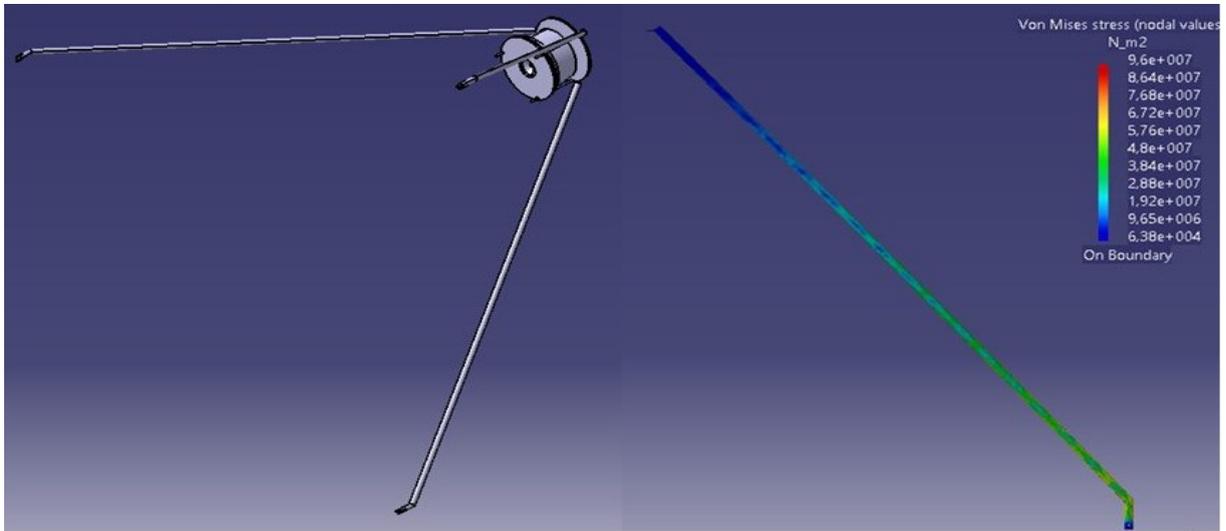
L - largura; c - comprimento; h -altura

Fonte: Elaborado pelo autor

3.2.2.3 Receptor

O receptor é o terceiro conjunto do concentrador solar que tem como finalidade por meio de uma cavidade receber a radiação solar advinda do prato parabólico e através da energia térmica gerada aquecer um fluido para produção de eletricidade ou outra utilidade. A Figura 54 mostra o receptor com os seus suportes e a simulação estrutural do referido conjunto sem qualquer não conformidade ou ponto crítico.

Figura 54 – Receptor e simulação estrutural do suporte



Fonte: Elaborado pelo autor

A fabricação e descritivo de materiais do receptor não foi contemplado por não ser objeto desta pesquisa.

3.3 Procedimento geral das simulações computacionais e análises

Considerando os objetivos delimitados para esta pesquisa, especialmente, a verificação das deformações e deslocamentos dos componentes do conjunto dos seis arcos e da malha de anéis de sustentação do prato parabólico integrados ao receptor, foi realizado o seguinte procedimento técnico da metodologia de elementos finitos para auferir os resultados esperados.

3.3.1 Geração da geometria do concentrador solar

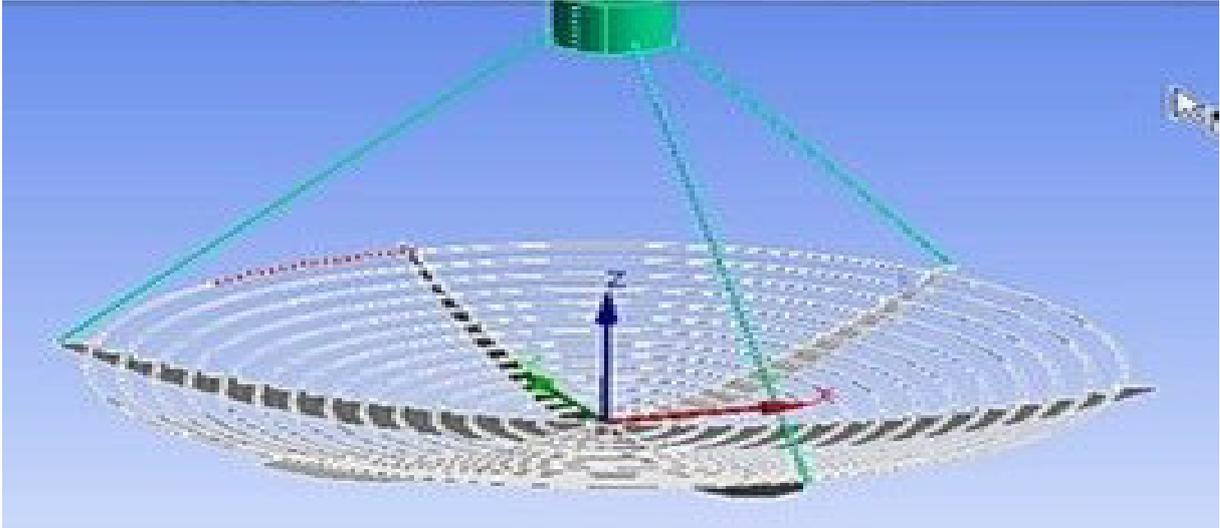
Os desenhos projetados de todos os componentes do concentrador solar foram elaborados no software CATIA versão 8, com a escolha específica do conjunto composto de seis arcos interligados individualmente a um cilindro central, com uma malha de anéis sobreposta, e um receptor com os seus três suportes de apoio, cujos modelos foram importados do CATIA e anexados ao software ANSYS no ícone geometria, segundo o formato idealizado no projeto para a análise das deformações e dos deslocamentos dos pontos e áreas de interesse dos componentes.

Para o sistema de análise do modelo foi estabelecido a análise estrutural linear estática com as respectivas unidades métricas dimensionais com o padrão do Sistema Internacional (mm, kg, etc.). As dimensões dos componentes do concentrador solar foram para o cilindro central 100 mm de diâmetro, com ranhuras de 10 mm de largura e altura de 130 mm. Os seis arcos de sustentação foram definidos cada um com o comprimento de 1531 mm, altura de 110 mm e espessura de 10 mm e a malha de anéis parametrizada com diâmetro máximo de 3.000 mm, e agregados a estes o receptor com diâmetro de 254 mm. A Figura 55 apresenta o conjunto supracitado inserido no sistema computacional.

3.3.2 Definição das propriedades do material

Após a inserção da geometria do objeto de estudo para cada componente foram definidas as propriedades físicas e elásticas dos materiais de acordo com os requisitos obrigatórios do sistema computacional, utilizando os dados da biblioteca de materiais padrão do ANSYS, onde o cilindro central, os arcos de sustentação e a malha de anéis foram parametrizados com o material liga de alumínio e o receptor com os suportes de sustentação em aço estrutural. Para os dados técnicos de interesse dos respectivos materiais a Tabela 6 mostra as propriedades para a liga de alumínio isotrópica, ou seja, com as mesmas propriedades em todas as direções e a Tabela 7 as propriedades do aço estrutural isotrópico.

Figura 55 – Conjunto de arcos, malha e receptor



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 6 – Propriedades da liga de alumínio

PROPRIEDADES	VALOR	UNIDADE
Densidade	$2,77 \cdot 10^{-6}$	$\frac{Kg}{mm^3}$
Resistência máxima a compressão	0,00	MPa
Resistência máxima a tração	310	MPa
Resistência ao escoamento compressivo	280	MPa
Resistência ao escoamento por tração	280	MPa
Módulo de Young	71.000	MPa
Coefficiente de Poisson	0,33	-
Módulo de cisalhamento	26.692	MPa

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 7 – Propriedades do aço estrutural

PROPRIEDADES	VALOR	UNIDADE
Densidade	$7,85 \cdot 10^{-6}$	$\frac{Kg}{mm^3}$
Resistência máxima a compressão	0,00	MPa
Resistência máxima a tração	460	MPa
Resistência ao escoamento compressivo	250	MPa
Resistência ao escoamento por tração	250	MPa
Módulo de Young	$1,67 \cdot 10^6$	MPa
Coefficiente de Poisson	0,30	-
Módulo de cisalhamento	76.923	MPa

Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.3 Elaboração da malha do modelo de elementos finitos

Definidos a geometria do objeto de estudo com as respectivas propriedades físicas e elásticas de seus componentes foi realizada a discretização do domínio em elementos finitos utilizando a configuração de elementos tetraédricos em todo o corpo do conjunto com um

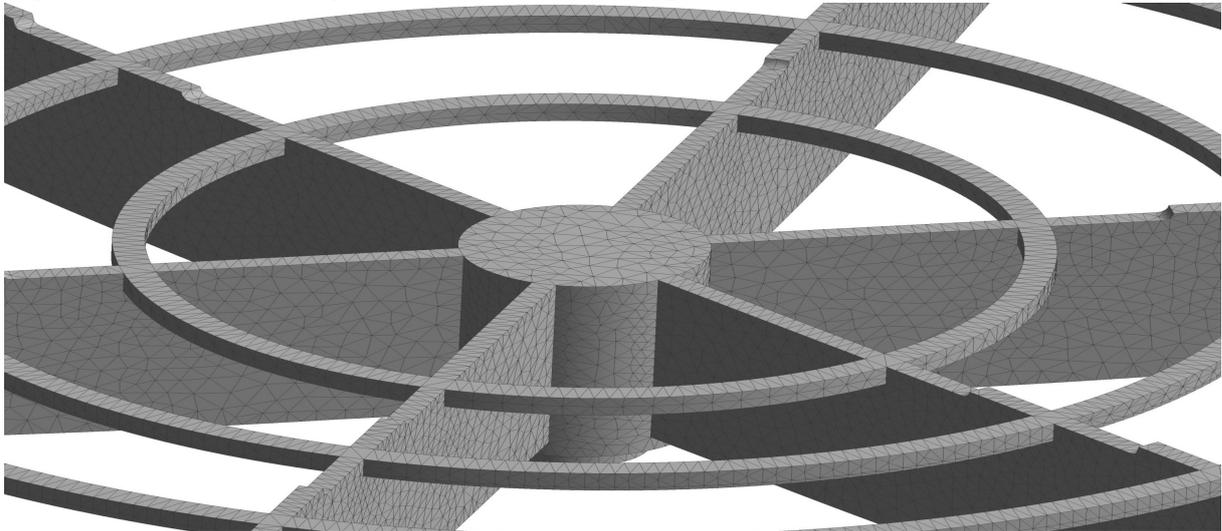
tamanho médio de 6 mm com bordas refinadas para uma maior precisão e melhor qualidade da malha, sendo o modelo mais adequado para o estudo, segundo o que preceitua o método de elementos finitos quanto a segmentação das peças. A Tabela 8 mostra o número de elementos e de nós nos dois conjuntos da geometria e a Figura 56 mostra a imagem da configuração da malha.

Tabela 8 – Discretização da geometria do objeto de pesquisa

CONJUNTO	ARCOS E MALHA DE ANÉIS	RECEPTOR	TOTAL
Nº de nós	591.179	125.453	716.632
Nº de elementos	290.720	67.645	358.365

Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 56 – Malha do conjunto de arcos, malha e suportes do receptor



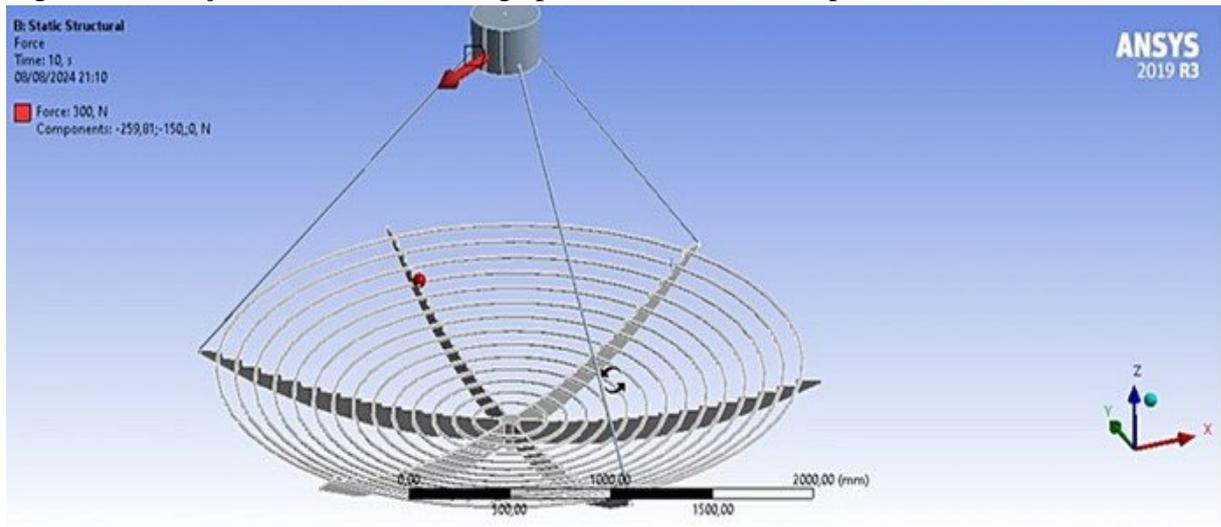
Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.4 Aplicação das cargas e condições de contorno

3.3.4.1 Quanto a aplicação das cargas

Estabelecida a geometria, as propriedades dos materiais e a geração da malha, uma força concentrada de 30 kg (aproximadamente 294,3 N) foi aplicada numa pequena face do receptor numa direção definida, considerando o seu próprio peso segundo a densidade do aço estrutural, conforme ilustrado na Figura 57, excluídas desta consideração a pressão dos ventos e o peso do prato parabólico propriamente dito composto de fibra de vidro.

Figura 57 – Força concentrada de 30 kg aplicada na face do receptor

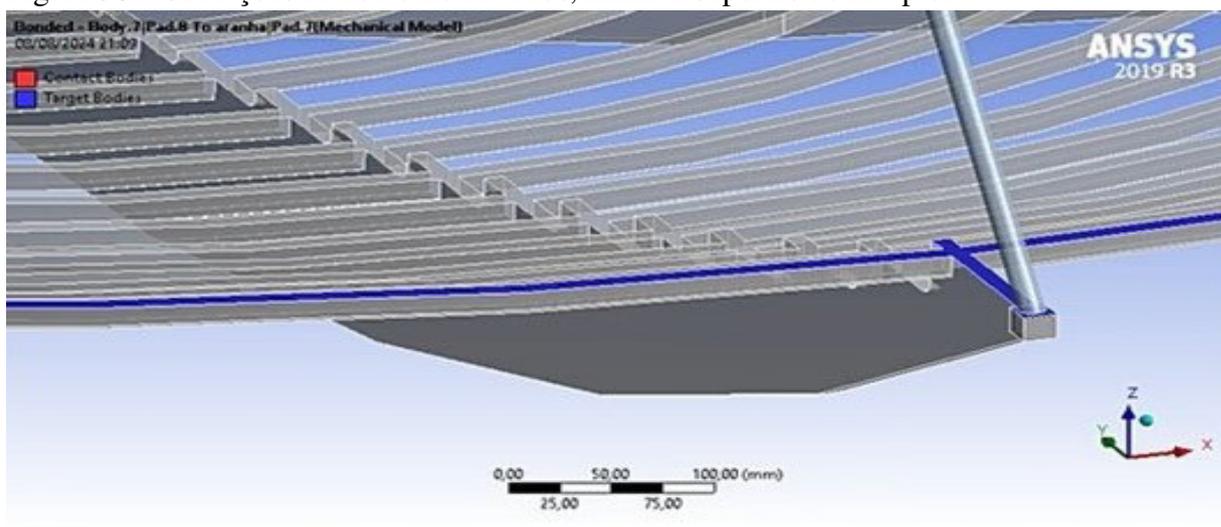


Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.4.2 Quanto as condições de contorno

Como pontos de fixação com restrição, os suportes do receptor, os seis arcos de sustentação do prato parabólico nos pontos de contato em suas extremidades com o cilindro central e a malha de anéis foram interligados pelo comando "Bonded" no ANSYS, caracterizando as faces de superfícies em contato como se estivessem coladas, conforme mostrado na Figura 58, sem permitir entre si deslizamentos ou separação por ocasião da simulação computacional.

Figura 58 – Condições de contorno de arcos, malha e suportes do receptor



Fonte: Elaborado pelo autor

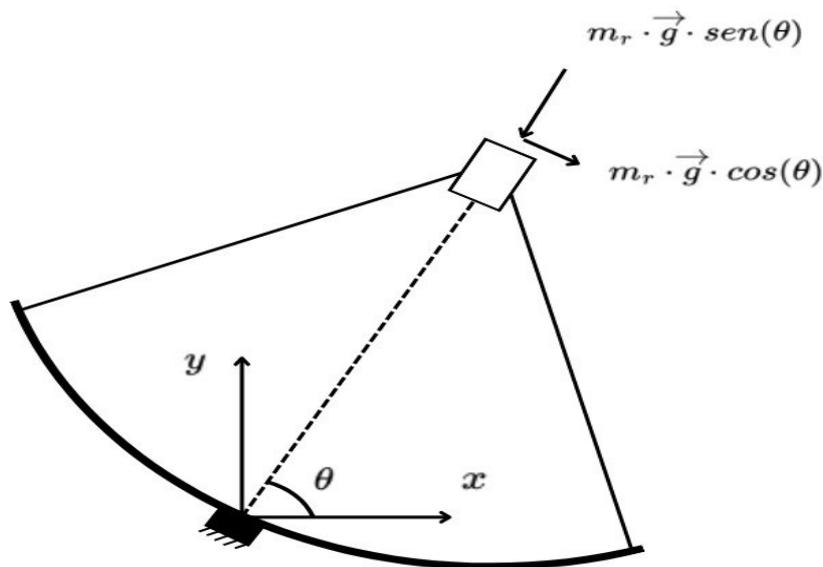
3.3.5 Análise estrutural linear estática do concentrador solar

Preliminarmente, foi considerado o concentrador solar como um modelo isotrópico elástico linear em que as suas propriedades não variam com a direção, ou seja, módulos de elasticidade, coeficiente de Poisson, coeficiente de expansão e condutividade térmica de seus materiais componentes não variam em qualquer direção.

Outra definição foi que a partir das equações governantes para o cálculo das tensões e deformações / deslocamentos ao longo de cada arco de sustentação (braços b1 a b6) desde o ponto de fixação da aresta do arco ao cilindro central até o ponto mais extremo do arco, sob uma carga de 30 kg aplicada numa face do receptor foram realizados cálculos em cada condição situacional de giro da posição do concentrador a 0° , 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° e 180° na direção do eixo Z, observando que acima de 90° o sentido da força aplicada no receptor é oposta ao intervalo angular de 0° a 90° , conforme ilustrado na Figura 62.

A Figura 59 mostra o modelo físico de giro angular do concentrador solar e a decomposição da carga de 30 kg aplicada com as equações governantes para o cálculo da força resultante gravitacional que atua ao longo do plano inclinado de forma a viabilizar os cálculos das deformações dos arcos de sustentação b1 a b6 em função do ângulo θ delineado para cada condição situacional de posição angular pretendida do concentrador solar.

Figura 59 – Modelo físico de giro angular do concentrador



Fonte: Elaborado pelo autor

A partir destas fórmulas foi determinada a força atuante que faz o concentrador solar

deslizar para baixo em cada plano inclinado de 0° a 180° .

$$F_1 = m_r \cdot \vec{g} \cdot \sin \theta \qquad F_2 = m_r \cdot \vec{g} \cdot \cos \theta \qquad (3.8)$$

Onde:

m_r é massa do objeto em kg;

\vec{g} é o vetor g que representa a aceleração da gravidade considerando sua magnitude e direção em m/s^2 na Terra;

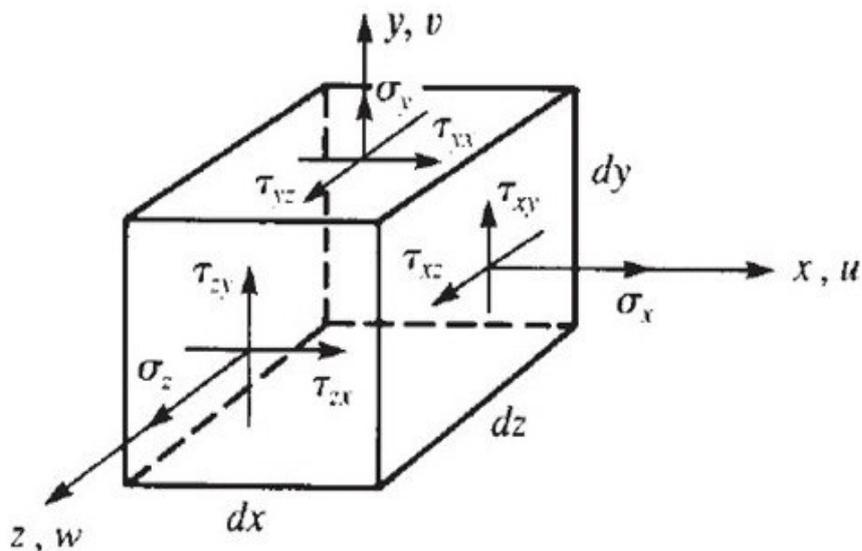
θ é o ângulo entre o plano inclinado e a horizontal em graus.

3.3.5.1 Equações governantes

Considerando a teoria da elasticidade e a mecânica dos sólidos, a análise estrutural estática linear do concentrador solar se realizou utilizando um sistema computacional ANSYS de acordo com os parâmetros teóricos das equações governantes padronizados no próprio *software*.

LOGAN (2021) ilustra em sua obra um corpo tetraédrico tridimensional onde as tensões normais σ_x , σ_y , σ_z e as tensões de cisalhamento estão em uma condição de equilíbrio significando que a soma das forças internas e externas são iguais a zero, sendo que o equilíbrio de momento no elemento tridimensional é expresso matematicamente por $\tau_{xy} = \tau_{yx}$, $\tau_{yz} = \tau_{zy}$ e $\tau_{zx} = \tau_{xz}$. A Figura 60 mostra a geometria das tensões tridimensionais em um elemento.

Figura 60 – Tensões tridimensionais em um elemento



LEE (2021) aponta 15 equações governantes para a análise estrutural estática linear deste elemento no sistema ANSYS:

$$\{u\} = \{u_x, u_y, u_z\} \quad (3.9)$$

$$\{\sigma\} = \{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\} \quad (3.10)$$

$$\{\varepsilon\} = \{\varepsilon_x, \varepsilon_y, \varepsilon_z, \gamma_{xy}, \gamma_{yz}, \gamma_{zx}\} \quad (3.11)$$

A partir destes 3 vetores com 15 quantitativos (incógnitas) se estabelece 15 equações para a solução da análise estrutural da geometria do objeto de pesquisa no que concerne as deformações, deslocamentos, e tensões do ponto de interesse da peça.

3.3.5.2 Equações de equilíbrio

O estado de equilíbrio de um elemento é caracterizado quando o somatório das forças nas direções x, y, z são iguais a zero, representado matematicamente por:

$$\sum F_x = 0, \quad \sum F_y = 0, \quad \sum F_z = 0 \quad (3.12)$$

(LEE, 2021) apresenta para a caracterização da Equação 3.12 num ponto no interior do corpo objeto de estudo as seguintes equações de equilíbrio das tensões representativas utilizadas no ANSYS:

$$\frac{\partial \sigma_x}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial Z} + b_x = 0 \quad (3.13)$$

$$\frac{\partial \tau_{yx}}{\partial X} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial Y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial Z} + b_y = 0 \quad (3.14)$$

$$\frac{\partial \tau_{zx}}{\partial X} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial Y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial Z} + b_z = 0 \quad (3.15)$$

onde b_x , b_y e b_z são as forças distribuídas no corpo do objeto em N/m^2

(LEE, 2021) apresenta para a caracterização da Equação 3.12 num ponto no limite da superfície do corpo objeto de estudo as seguintes equações de equilíbrio das tensões representativas utilizadas no ANSYS:

$$\sigma_x n_x + \tau_{xy} n_y + \tau_{xz} + S_x = 0 \quad (3.16)$$

$$\tau_{yx} n_x + \sigma_y n_y + \tau_{yz} + S_y = 0 \quad (3.17)$$

$$\tau_{zx} n_x + \tau_{zy} n_y + \sigma_z + S_z = 0 \quad (3.18)$$

onde S_x , S_y e S_z são as forças distribuídas na superfície do corpo do objeto em N/m^2 e n_x , n_y e n_z são as componentes do vetor normal a superfície do objeto de estudo.

3.3.5.3 Equações da relação deformação-deslocamento

LEE (2021) indica as 6 equações para a relação deformação-deslocamento divididas em dois conjuntos de 3 equações cada:

$$\varepsilon_x = \frac{\partial u_x}{\partial X}, \quad \varepsilon_y = \frac{\partial u_y}{\partial Y}, \quad \varepsilon_z = \frac{\partial u_z}{\partial Z} \quad (3.19)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\partial u_x}{\partial Y} + \frac{\partial u_y}{\partial X}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\partial u_y}{\partial Z} + \frac{\partial u_z}{\partial Y}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\partial u_z}{\partial X} + \frac{\partial u_x}{\partial Z} \quad (3.20)$$

3.3.5.4 Equações da relação tensão-deformação

LEE (2021) indica mais 6 equações para a relação tensão-deformação divididas em dois conjuntos de 3 equações cada:

$$\varepsilon_x = \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E}, \quad \varepsilon_y = \frac{\sigma_y}{E} - \nu \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E}, \quad \varepsilon_z = \frac{\sigma_z}{E} - \nu \frac{\sigma_x}{E} - \nu \frac{\sigma_y}{E} \quad (3.21)$$

$$\gamma_{xy} = \frac{\tau_{xy}}{G}, \quad \gamma_{yz} = \frac{\tau_{yz}}{G}, \quad \gamma_{zx} = \frac{\tau_{zx}}{G} \quad (3.22)$$

Onde,

E é o módulo de Young, G é módulo de cisalhamento ambos com unidade de medida em Pascal e ν é o coeficiente de Poisson sendo este adimensional. Estes módulos guardam uma relação entre si, sendo calculados, de acordo com a incógnita de interesse pela seguinte equação:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \quad (3.23)$$

3.3.5.5 Matriz constitutiva para um material isotrópico em 3D

LOGAN (2021) apresenta a equação da lei de Hooke como a base para a formatação da matriz constitutiva de cálculos para deformações, deslocamentos e tensões.

$$\{\sigma\} = [D] \cdot \{\varepsilon\} \quad (3.24)$$

Onde:

σ é a matriz vetor tensão normal representada por matriz de coluna;

D é a matriz constitutiva relacionando tensões e deformações representada por matriz de colunas;

ε é matriz vetor deformação representada por matriz de coluna.

Representando as tensões σ e ε respectivamente por uma matriz de uma coluna e D por uma matriz de seis colunas para um material isotrópico em 3d, a lei de Hooke é representada pela Substituindo dos termos da Equação 3.24, sendo esta a forma mais geral representativa das relações tensão-deformação-deslocamento para um material isotrópico em 3D.

$$\begin{bmatrix} \sigma_x \\ \sigma_y \\ \sigma_z \\ \tau_{xy} \\ \tau_{yz} \\ \tau_{zx} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1 - \nu) \cdot (1 - 2 \cdot \nu)} \cdot \begin{bmatrix} 1 - \nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1 - \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1 - \nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2 \cdot \nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2 \cdot \nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1 - 2 \cdot \nu}{2} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \varepsilon_z \\ \gamma_{xy} \\ \gamma_{yz} \\ \gamma_{zx} \end{bmatrix} \quad (3.25)$$

3.3.5.6 Matriz de rigidez do elemento finito

LEE (2021) mostra que as forças aplicadas $\{F\}$ a qualquer estrutura geométrica é determinada pelo produto da matriz de rigidez $[K]$ pelo produto do vetor deslocamentos $\{D\}$, onde assim, pode se determinar como uma estrutura se deforma para uma avaliação de como

estas cargas podem ser suportadas no escopo do projeto.

$$[K] \cdot \{D\} = \{F\} \quad (3.26)$$

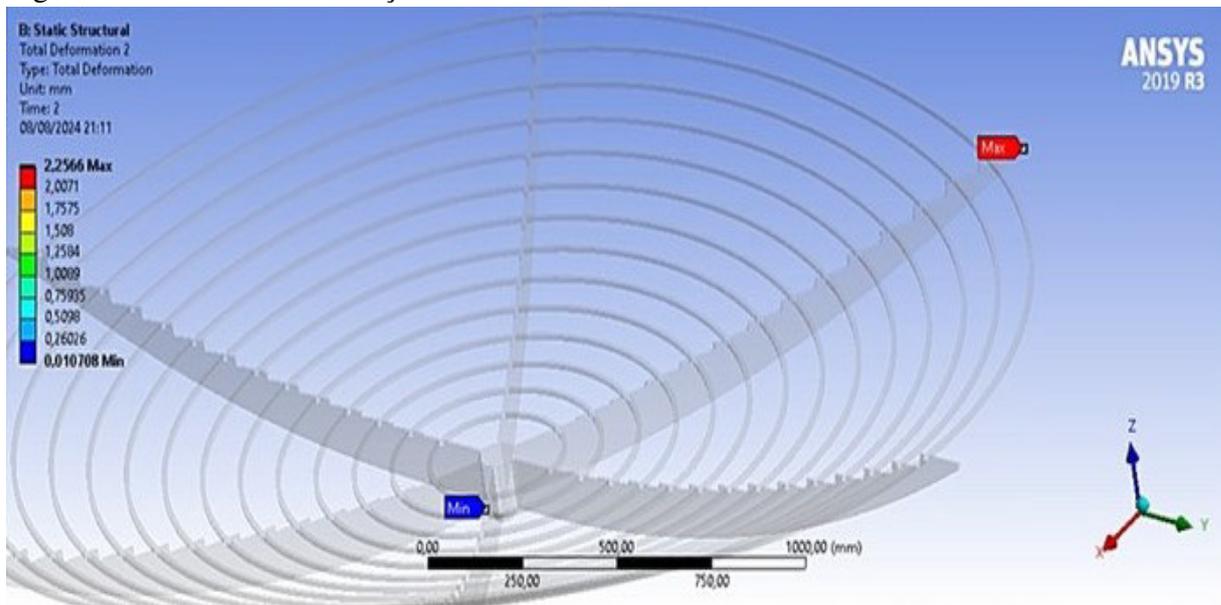
No contexto da Equação 3.26 quando os deslocamentos nodais discretos $\{D\}$ são determinados, sequencialmente os campos de deslocamentos $\{u\}$ são resolvidos por interpolação de forma linear, onde por sua vez os campos de deformação são calculados pelas Equação 3.19 e Equação 3.20 e os campos de tensão podem ser calculados pelas Equação 3.21 e Equação 3.22.

3.3.6 Análise e interpretação dos resultados

Realizada a simulação computacional com a inserção no sistema de todos os parâmetros exigidos, os resultados das deformações foram obtidos para todos os arcos de sustentação (braços b1 a b6) em cada posição angular situacional definida de 0° a 180° conforme registrado na Tabela 10 e Tabela 11 na seção "Resultados e discussões".

A Figura 61 mostra uma simulação computacional para um arco escolhido aleatoriamente com os valor mínimo de deformação na extremidade do arco interligado ao cilindro central e máximo na extremidade do arco.

Figura 61 – Nível de deformação de um arco



Fonte: Elaborado pelo autor

3.3.7 Otimização do projeto

Os resultados obtidos das deformações foram de baixa magnitude ensejando uma avaliação conservadora do projeto com as especificações e parâmetros já estabelecidos sem qualquer mudança de material, geometria do objeto ou especificações, sustentadas estas decisões pela simulação realizada com independência de malha do próprio sistema, onde os resultados se mantiveram constantes e dentro do espectro da normalidade

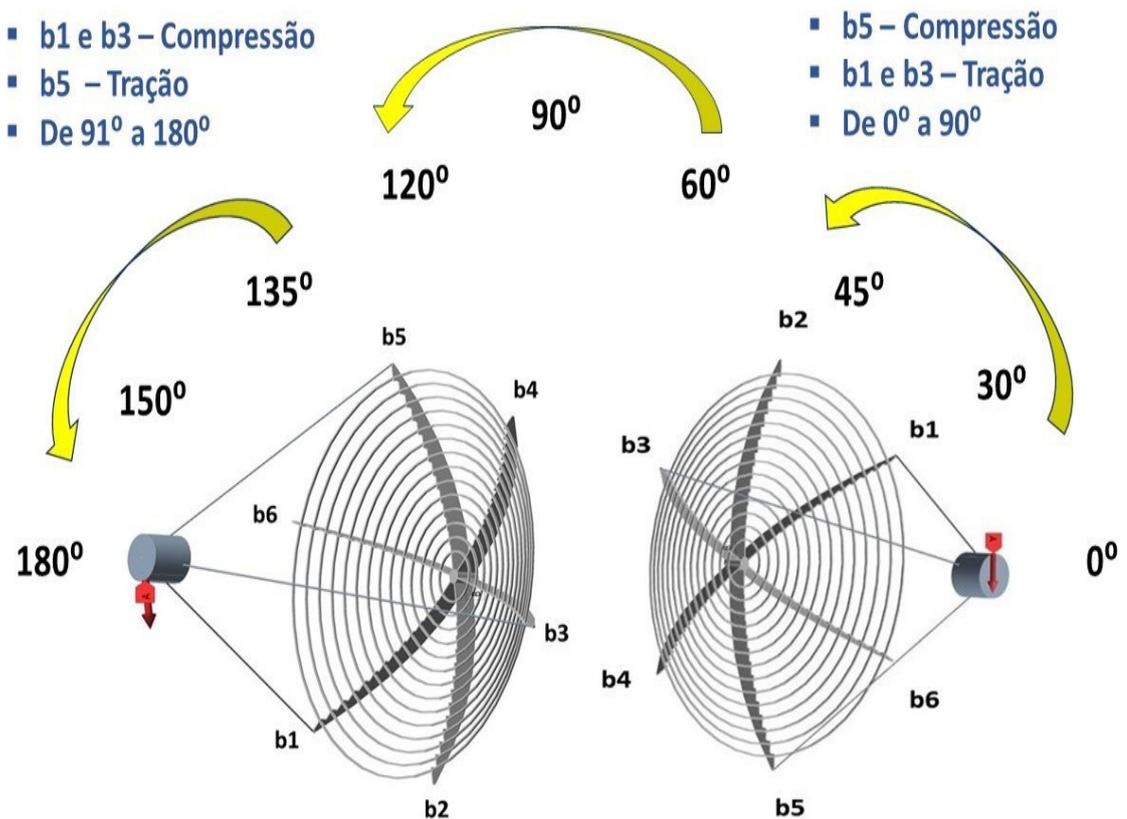
3.3.8 Validação dos resultados

Os resultados obtidos foram validados considerando a normalidade da consecução da simulação computacional, a experiência técnica-operacional dos técnicos, a repetitiva avaliação dos resultados e especialmente as boas práticas de engenharia, culminando com o comissionamento dos sistemas e componentes do objeto de estudo.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

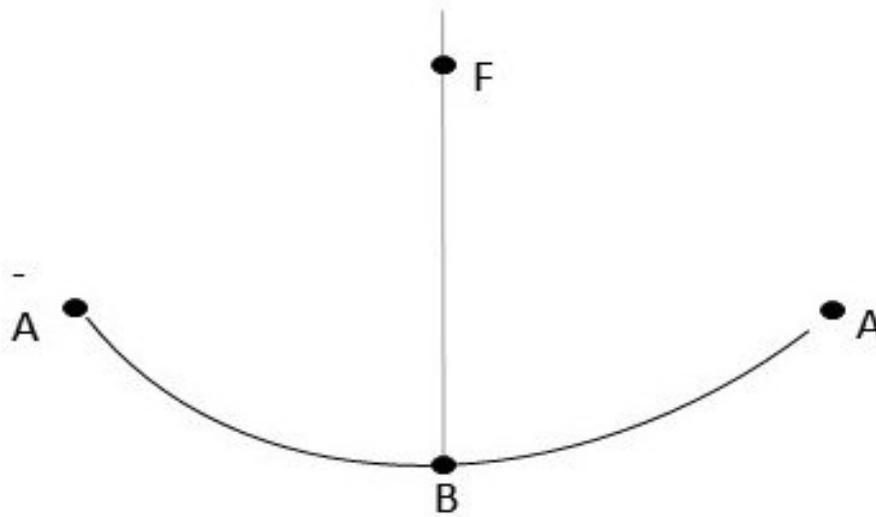
Observados os procedimentos técnicos e de acordo com os ensaios realizados conforme prescritos na seção 3.3 foram determinados os resultados do experimento quanto as deformações e deslocamentos do ponto A (b5,b2), o deslocamento do ponto focal F (foco receptor), a abertura mínima da cavidade do receptor para absorção de todos os raios solares, segundo os ângulos de posição e movimentação do concentrador e o rendimento ótico para desvios de seguimento do Sol de (0,25°, 0,5°, 0,75° e 1°). A Figura 62 ilustra a posição e movimentação do concentrador solar para a simulação, enquanto a Figura 63 mostra a representação esquemática dos pontos A, A' (pontos de deformação), B (vértice) e F(foco) e a Tabela 9 as coordenadas do concentrador sem deformação.

Figura 62 – Posição e movimentação do concentrador



Fonte: Elaborado pelo autor

Figura 63 – Representação Gráfica pontos A, B e F da parábola



Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 9 – Coordenadas do concentrador sem deformação

Referência	X	Y
Ponto A	1500	310,66667
Ponto -A	-1500	310,66667
Ponto B (Vértice)	0	0
F (ponto focal)	0	1.810,6223

Fonte: Elaborado pelo autor

4.1 Deformação máxima vertical do ponto A

Para cada arco (b1, b2, b3, b4, b5 e b6) por simulação no software ANSYS foi determinada a deformação máxima vertical do ponto A para as posições do prato parabólico a (0° , 30° , 45° , 60° , 90° , 120° , 135° , 150° e 180°), obtendo-se os resultados registrados na Tabela 10.

Tabela 10 – Deformação máxima vertical do ponto A

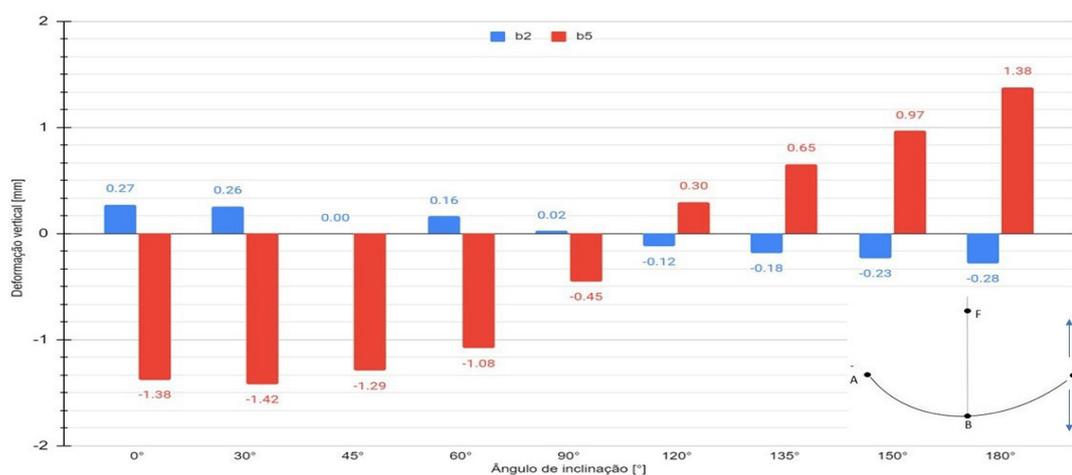
Ângulo	b1	b2	b3	b4	b5	b6
0°	0,69417	0,27314	0,68706	-0,14545	-1,37680	-0,13795
30°	0,37569	0,25718	0,37066	-0,11441	-1,41980	-0,10786
45°	0,17151	0,0000	0,16808	-0,08641	-1,29440	-0,08091
60°	-0,04433	0,16197	-0,04593	-0,05254	-1,08090	-0,04871
90°	-0,45186	0,02336	-0,44960	0,02336	-0,45185	-0,02346
120°	-0,73921	-0,12146	-0,73368	0,09305	0,29734	0,08938
135°	-0,81119	-0,18388	-0,80455	0,11949	0,65470	0,11425
150°	-0,82802	-0,23380	-0,82071	0,13780	0,96753	0,13134
180°	-0,69488	-0,28343	-0,68776	0,14559	1,37820	0,13809

Obs: Para as deformações positivas o ponto A se desloca para cima e negativas para baixo.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que a maior deformação ocorreu no arco b5 sob a condição de compressão na posição angular de 30° com o valor de -1,41980 mm, considerada desprezível em relação a posição original de projeto. A Figura 64 apresenta todas as deformações verticais em b2 e b5 em forma gráfica devido aos esforços atuantes.

Figura 64 – Deformação máxima vertical do ponto A em b2 e b5



Fonte: Elaborado pelo autor

4.2 Deformações horizontais para o ponto A

A partir das deformações verticais foram calculadas as deformações horizontais para o ponto A, para os arcos (b1, b2, b3, b4, b5, e b6) nas posições (0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° e 180°) do prato parabólico, obtendo-se os resultados registrados na Tabela 11 utilizando-se a Equação 4.1.

$$DEF_{H(A)} = \sqrt{L^2 - (-Y_A - DEF_{V(bn)})^2} - X_A \quad (4.1)$$

Onde:

$DEF_{H(A)}$ é a deformação horizontal no ponto A em bn;

L é o comprimento do arco bn igual a 1.531,833469 mm;

Y_A é a profundidade da parábola do ponto A;

X_A é o comprimento do arco no ponto A.

Tabela 11 – Deformação horizontal calculada do ponto A

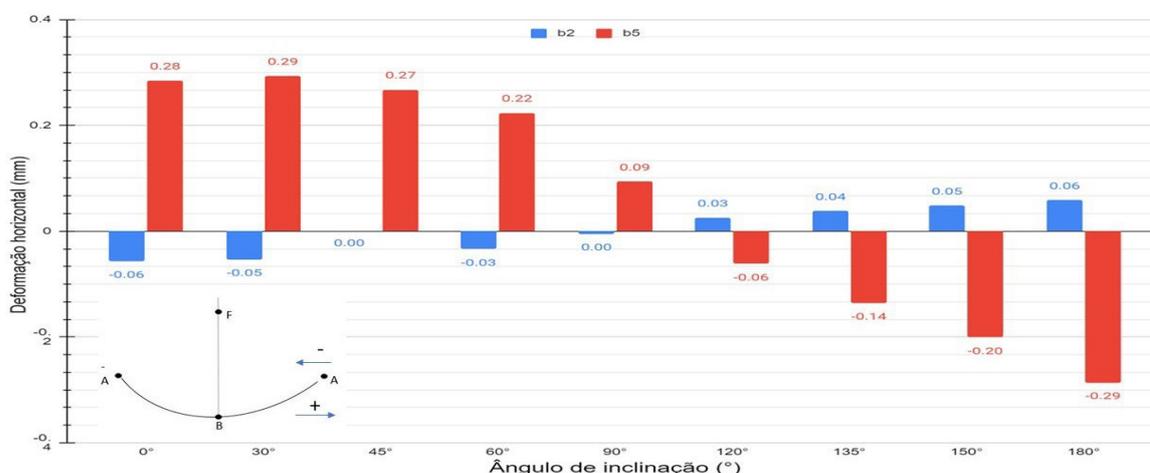
Ângulo	b1	b2	b3	b4	b5	b6
0°	-0,14394	-0,05660	-0,14246	0,03012	0,28449	0,02856
30°	-0,07786	-0,05329	-0,07672	0,02369	0,29336	0,02233
45°	-0,03553	0,00000	-0,03482	0,01789	0,26750	0,01676
60°	0,00918	-0,03354	0,00951	0,01088	0,22346	0,01009
90°	0,09351	-0,00484	0,09305	-0,00484	0,09361	-0,00486
120°	0,15291	0,02515	0,15177	-0,01928	-0,06161	-0,01851
135°	0,16778	0,03807	0,16641	-0,02475	-0,13574	-0,02367
150°	0,17125	0,04840	0,16974	-0,02855	-0,20071	-0,02721
180°	0,14375	0,05867	0,14228	-0,03016	-0,28610	0,02861

Obs: Para as deformações positivas o ponto A se desloca para fora e negativas para dentro.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que a maior deformação horizontal ocorreu no arco b5 na posição angular de 30° com o valor de 0,29336 mm, considerada desprezível em relação a posição original de projeto. Figura 65 apresenta todas as deformações horizontais em b5 e b2 em forma gráfica devido aos esforços atuantes.

Figura 65 – Deformação horizontal do ponto A em b2 e b5



Fonte: Elaborado pelo autor

4.3 Coordenadas x e y do ponto A

Sequencialmente foram calculadas as coordenadas x e y do ponto A para os arcos (b1, b2, b3, b4, b5 e b6) para as posições (0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° e 180°) do prato parabólico, obtendo-se os resultados registrados nas Tabela 12 e Tabela 13.

$$X_{bn} = X_A + DEF_{H(A)} \quad Y_{bn} = Y_{bn} + DEF_{V(A)} \quad (4.2)$$

Tabela 12 – Coordenadas do ponto A para b1, b2 e b3

Ângulo	b1 X	Y	b2 X	Y	b3 X	Y
0°	1.499,85506	311,3604	1.499,94340	310,93981	1.499,85754	311,35373
30°	1.499,92214	311,04236	1.499,94671	310,92385	1.499,92318	311,03733
45°	1.500,96447	310,83818	1.500,0000	310,66667	1.499,96518	310,83475
60°	1.500,0918	310,62234	1.499,96645	310,82864	1.500,00951	310,62074
90°	1.500,09351	310,21481	1.499,995164	310,69003	1.500,09305	310,21707
120°	1.500,15291	309,92746	1.500,03807	310,54521	1.500,15177	309,93299
135°	1.500,16778	309,85548	1.500,03807	310,48279	1.500,16641	309,86212
150°	1.500,17125	309,83865	1.500,04840	310,43287	1.500,16974	309,84596
180°	1.500,14375	309,97179	1.500,05867	310,38324	1.500,14228	309,97891

Fonte: Elaborado pelo autor

Tabela 13 – Coordenadas do ponto A para b4, b5 e b6

Ângulo	b4 X	Y	b5 X	Y	b6 X	Y
0°	1.500,03012	310,52122	1.500,28849	309,28987	1.500,02856	310,52872
30°	1.500,02369	310,55226	1.500,29336	309,24687	1.500,02233	310,55881
45°	1.500,01789	310,58025	1.500,26750	309,37227	1.500,01676	310,58576
60°	1.500,01088	310,61412	1.500,22346	309,58577	1.500,01009	310,61796
90°	1.500,99516	310,69003	1.500,09351	310,21482	1.499,99514	310,69012
120°	1.499,98072	310,75972	1.499,93839	310,96401	1.499,98149	310,75605
135°	1.499,97525	310,78616	1.499,86426	311,32137	1.499,97633	310,78092
150°	1.499,97145	310,80447	1.499,79929	311,63420	1.499,97279	310,79801
180°	1.499,96984	310,81226	1.499,71390	312,04487	1.499,97139	310,80476

Fonte: Elaborado pelo autor

4.4 Deslocamento vertical do ponto focal (F)

Na Tabela 14 estão registrados os cálculos dos deslocamentos para os arcos (b1, b2, b3, b4, b5, e b6) do ponto focal para as posições (0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° e 180°), bem como, a média calculada do deslocamento do ponto focal, utilizando-se a Equação 4.3.

$$DES_{V(foco)} = Y_F - \frac{X_{bn}^2}{4 \cdot Y_{bn}} \quad (4.3)$$

Onde:

$DES_{V(foco)}$ é o deslocamento vertical do ponto do foco;

Y_F é a coordenada y do foco (altura do foco);

X_{bn} é a coordenada x do ponto em bn na parábola com deformação;

Y_{bn} é a coordenada y do ponto A em bn na parábola com deformação.

Tabela 14 – Deslocamento vertical focal do ponto F

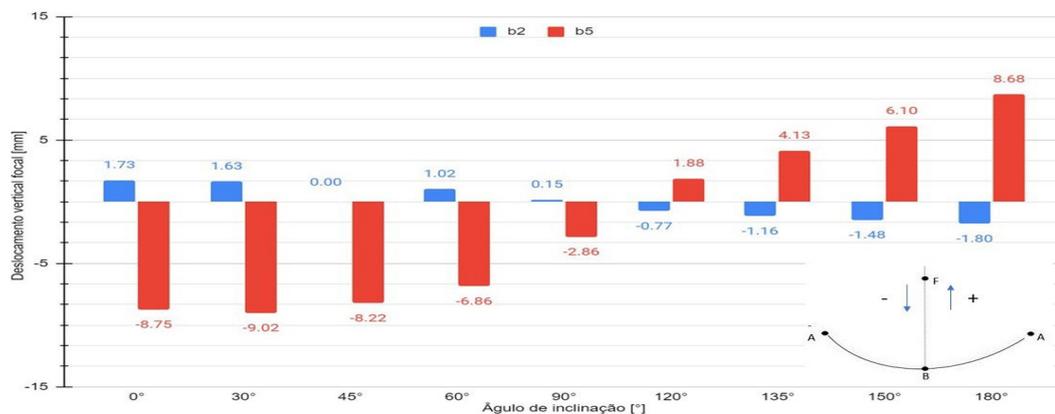
Ângulo	b1	b2	b3	b4	b5	b6	Média
0°	4,383	1,727	4,339	-0,921	-8,750	-0,873	3,499
30°	2,375	1,626	2,343	-0,724	-9,024	-0,683	2,796
45°	1,085	0,000	1,063	-0,547	-8,224	-0,512	1,905
60°	-0,281	1,024	-0,291	-0,333	-6,863	-0,308	1,517
90°	-2,863	0,148	-2,849	0,148	-2,863	0,148	1,503
120°	-4,689	-0,769	-4,653	0,589	1,880	0,565	2,191
135°	-5,146	-1,164	-5,104	0,756	4,135	0,723	2,838
150°	-5,253	-1,481	-5,207	0,872	6,104	0,831	3,291
180°	-4,407	-1,795	-4,362	0,921	8,685	0,873	3,507

Obs: Para deslocamentos positivos o ponto focal se desloca para cima e negativo para baixo.

Fonte: Elaborado pelo autor

Observa-se que o maior deslocamento focal ocorreu no arco b5 sob a condição de compressão na posição angular de 30° com o valor de 9,024 mm, considerada desprezível em relação a posição original de projeto. A Figura 66 apresenta todas as deformações verticais em b5 e b2 em forma gráfica devido aos esforços atuantes.

Figura 66 – Deslocamento vertical do ponto focal (F)



Fonte: Elaborado pelo autor

4.5 Diâmetro mínimo necessário de D do receptor

Por fim, para as posições (0°, 30°, 45°, 60°, 90°, 120°, 135°, 150° e 180°) do prato parabólico foram calculados a abertura mínima necessária da cavidade do receptor considerando cada arco, obtendo-se os resultados registrados na Tabela 15, utilizando-se a Equação 4.4.

$$D_{min(rec)} = \frac{2 \cdot X_{bn} \cdot ABS(DES_V(foco))}{Y_F - DES_V(foco) + Y_{bn}} \quad (4.4)$$

Onde:

$D_{min(rec)}$ é a abertura mínima necessária da cavidade do receptor;

X_{bn} é a coordenada x do ponto bn na parábola com deformação;

$DES_V(foco)$ é o deslocamento do ponto do foco;

Y_F é a coordenada y do foco;

X_{bn} é a coordenada x do ponto A em bn na parábola com deformação;

Y_{bn} é a coordenada y do ponto A em bn na parábola com deformação.

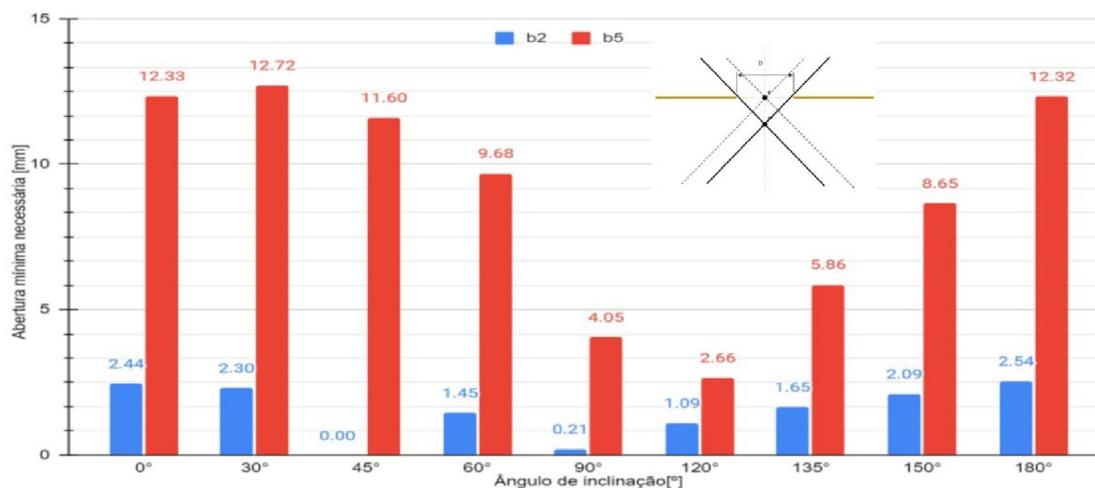
Tabela 15 – Abertura mínima necessária (D)

Ângulo	b1	b2	b3	b4	b5	b6
0°	6,20940	2,44400	6,14583	1,30185	12,33388	1,23471
30°	3,36134	2,30122	3,31635	1,02400	12,71948	0,96537
45°	1,53475	0,00000	1,50406	0,77341	11,59503	0,72416
60°	0,39673	1,44939	0,41102	0,47025	9,68105	0,43591
90°	4,04525	0,20908	4,02501	0,20908	4,04516	0,20993
120°	6,61909	1,08711	6,56955	0,83272	2,66049	0,79988
135°	7,26400	1,64586	7,20450	1,06929	5,85650	1,02240
150°	7,41480	2,09275	7,34930	1,23312	8,65292	1,17532
180°	6,22195	2,53708	6,15817	1,20283	12,32202	1,23572

Fonte: Elaborado pelo autor

O diâmetro mínimo necessário da cavidade do receptor para receber os raios solares é de 12,71948 mm a 30° conforme demonstrado na Figura 67. Note-se que esta medida está aquém dos dados de projeto de 40 mm significando que possivelmente o diâmetro estabelecido originalmente no projeto é suficiente para absorver os raios solares advindos da face espelhada do prato parabólico.

Figura 67 – Diâmetro mínimo da cavidade do receptor

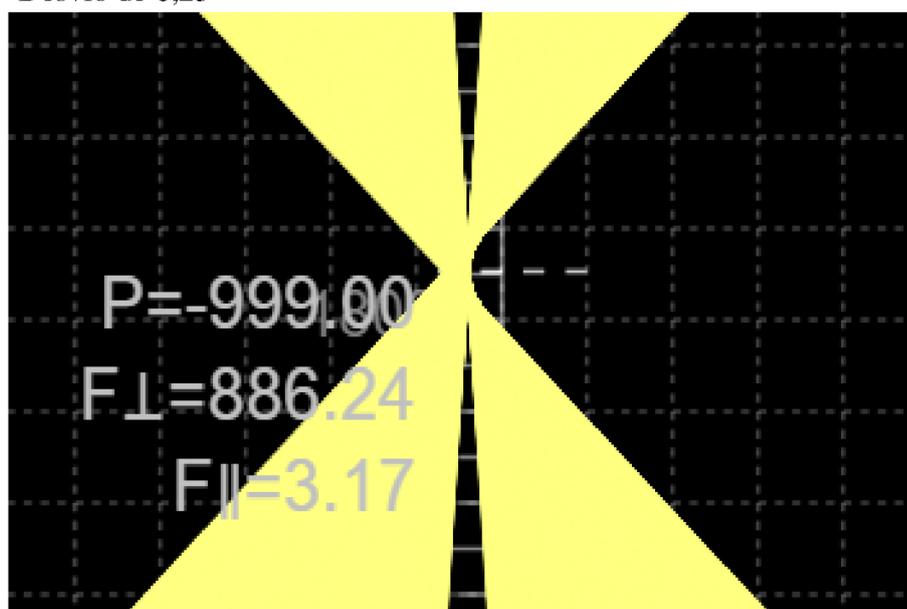


Fonte: Elaborado pelo autor

4.6 Rendimento óptico para erros de rastreamento do Sol

Utilizando o *Software Ray Optics Simulation* foram realizadas simulações com desvio dos raios solares para a base $0,25^\circ$, $0,5$, $0,75$ e $1,0^\circ$.

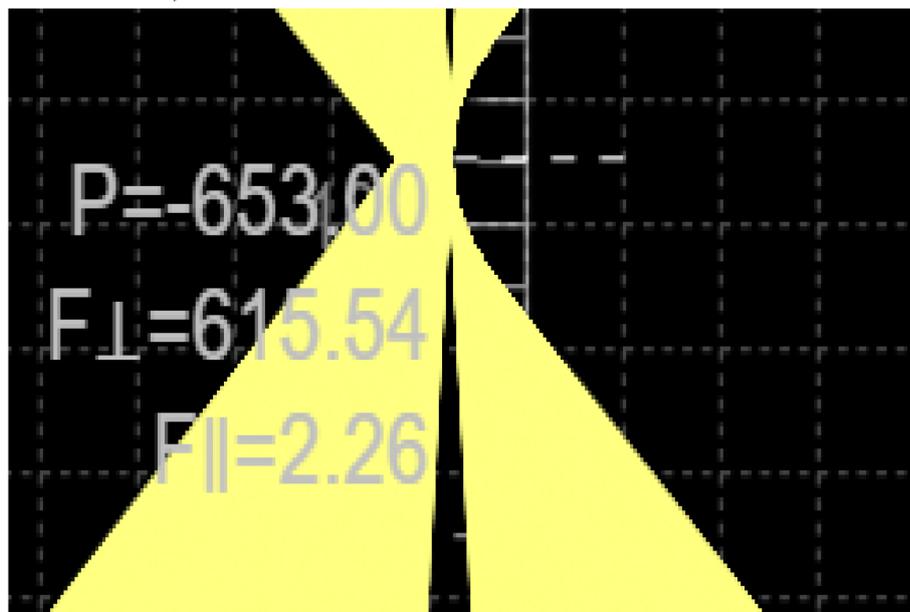
Os resultados apontaram que para um desvio de até $0,25^\circ$ dos raios solares a eficiência ótica é $99,9\%$, portanto, o concentrador com esta tolerância de desvio não tem a sua eficiência ótica prejudicada. A Figura 68 ilustra esta eficiência mencionada.

Figura 68 – Desvio de $0,25^\circ$ 

Fonte: Elaborado pelo autor

A partir de um desvio de $0,50^\circ$ dos raios solares observa-se uma acentuada perda de eficiência ótica declinando para 65,3%, portanto, o concentrador com esta tolerância de desvio tem a sua eficiência ótica comprometida. A Figura 69 mostra esta eficiência considerando o valor 1000 como 100%

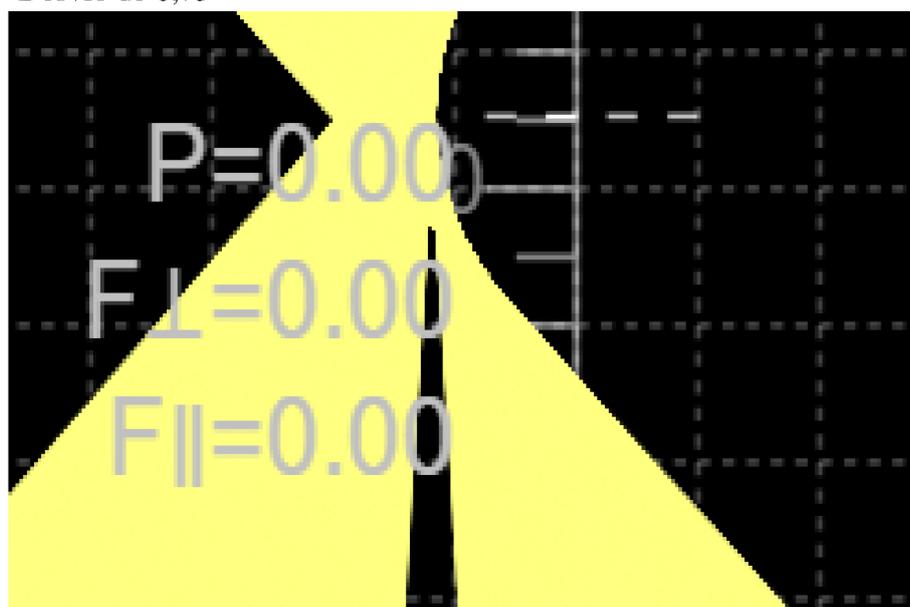
Figura 69 – Desvio de $0,5^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

Para um desvio de $0,75^\circ$ os raios solares não ficam mais circunscritos a cavidade do receptor sendo 0% a eficiência ótica. A Figura 70 aponta esta eficiência citada.

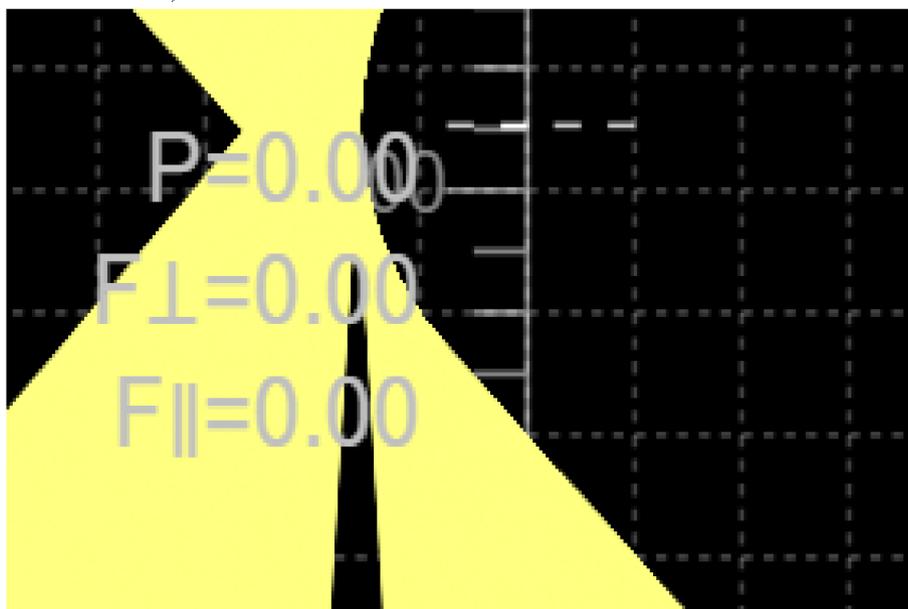
Figura 70 – Desvio de $0,75^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

Para um desvio de 1° os raios solares, além de não ficarem circunscritos a cavidade do receptor, estão mais afastados, sendo 0% a eficiência ótica. A Figura 71 indica esta situação mencionada.

Figura 71 – Desvio de $1,0^\circ$



Fonte: Elaborado pelo autor

Logo, estes resultados mostram que um sistema de rastreamento do Sol para este concentrador deve ser bastante preciso e exato, pois um desvio de $0,5^\circ$ já compromete a eficiência do receptor, e por conseguinte do concentrador.

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Face as simulações realizadas e os resultados coletados depreende-se que o projeto do concentrador solar, em tese, atende os objetivos preliminarmente delineados para alcançar a geração de energia térmica a nível de 800°C no receptor, sendo suficiente para a produção de hidrogênio a partir da reforma a vapor. Para a garantia deste efeito, necessário é projetar um sistema automático de rastreamento do Sol em dois eixos para minimizar perdas de eficiência.

Quanto ao objetivo de projetar, fabricar, montar e operar um concentrador de energia solar do tipo parabólico com diâmetro de 3m, ainda em curso, este objetivo pode ser alcançado em breve espaço de tempo, segundo plano de trabalho elaborado.

No que concerne as simulações estas foram realizadas no âmbito das deformações e deslocamentos dos elementos de sustentação do prato parabólico e das eficiências óticas por sistemas computacionais, onde foi confirmada a consistência material, o desenho geométrico e a integridade estrutural do projeto atendendo a todos os requisitos de funcionalidade. As deformações e deslocamentos dos conjuntos de sustentação do prato parabólico não comprometeram a operacionalidade e a garantia da qualidade do projeto, porém, urge a necessidade de se realizar novas simulações com a influência da velocidade dos ventos sobre o equipamento para a confirmação da capacidade de resistência estrutural do concentrador.

Esta pesquisa não exaure a descoberta das nuances técnicas de projeto, fabricação, montagem e operação do concentrador solar. Novas pesquisas devem ser realizadas no que concerne aos materiais refletivos do prato parabólico, inclusive, sua montagem, como também a descoberta de um avançado sistema de seguimento do Sol de ordem automática com o controle de desvios abaixo de $0,5^{\circ}$, bem como, a metodologia de fabricação do prato parabólico considerando o seu formato e suas dimensões parabólicas.

Por fim, a execução de simulações em sistemas computacionais para a consecução de futuros projetos é imprescindível, especialmente, no que concerne a multigeração de utilidades de pequenas usinas utilizando-se de um conjunto de unidades de concentradores solares do tipo prato parabólico para produção de aquecimento, refrigeração, dessalinização, hidrogênio verde, etc. em uma só unidade que parece ser neste momento a vanguarda das pesquisas em curso no mundo.

REFERÊNCIAS

- ALAMI, A. H.; OLABI, A. G.; MDALLALL, A.; REZK, A.; RADWAN, A.; RAHMAN, S. M. A.; ABDELKAREEM, M. A. Concentrating solar power (csp) technologies: Status and analysis. **International Journal of Thermofluids**, Elsevier, USA, v. 18, p. 100340, mar. 2023.
- ALMEIDA Francisco J. **Método dos elementos finitos**. Piracicaba: Prof. Francisco José de Almeida, 2020. Disponível em: https://www.youtube.com/watch?v=hCHpgULC6uc&list=PL5FJ7ECjW6_mphSKxp7t6gYvFGmNyQp4W. Acesso em: 01 ago. 2024.
- ARMIJO, K. M.; SHINDE, S. L. **Heat Transfer Phenomena in Concentrating Solar Power Systems**. Albuquerque, NM (United States), 2016.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10899**: Energia solar fotovoltaica: terminologia. Rio de Janeiro: ABNT, 2020.
- BARBOSA, F. V. **Desenvolvimento de um Concentrador Solar com Sistema de Seguimento**. Dissertação (Mestrado) – Engenharia Mecânica, Universidade do Minho, Escola de Engenharia, Minho, Portugal, Novembro 2015.
- BASEM, A.; MOAWED, M.; ABBOOD, M. H.; EL-MAGHLANY, W. M. The design of a hybrid parabolic solar dish–steam power plant: An experimental study. **Energy Reports**, ELSEVIER, USA, v. 8, p. 1949–1965, nov. 2022.
- BLANCO, M. **Advances in concentrating solar thermal research and technology**. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2016.
- BRASIL, A. S. D. **Banco de dados solarimétricos**. Recife, 2000.
- BRITO–CRESESB, C. de Referencia para Energia Solar e Eólica Sergio de S. **Energia Solar: Princípios e aplicações**. Rio de Janeiro, 2006.
- BUSCEMI, A.; BRANO, V. L.; CHIARUZZI, C.; CIULLA, G.; KALOGERI, C. A. A validated energy model of a solar dish-stirling system considering the cleanliness of mirrors. **Applied Energy**, ELSEVIER, USA, v. 260, p. 114378, feb. 2020.
- COSTA, I. F. d.; MAROJA, A. d. M. Astronomia diurna: medida da abertura angular do sol e da latitude local. **Revista brasileira de Ensino de Física**, SCIELO, Brasil, v. 40, n. 1, p. e1501, maio. 2018.
- DUFFIE, J. A.; BECKMAN, W. A. **Solar engineering of thermal processes**. 4. ed. Hoboken, New Jersey: WILEY, 1980.
- EBRAHIMI, A.; SAHARKHIZ, M. H. M.; GHORBANI, B. Thermodynamic investigation of a novel hydrogen liquefaction process using thermo-electrochemical water splitting cycle and solar collectors. **Energy Conversion and Management**, ELSEVIER, USA, v. 242, p. 114318, aug. 2021.
- EL, Q.; AHMED, R.; SALAH, M. B.; ASKRI, F.; NASRALLAH, S. B.; ALOUI, F. Experimental study of a parabolic solar concentrator. **Journal of Renewable Energies**, WILEY, England, v. 12, n. 3, p. 395–404, sep. 2009.
- GHOLAMALIZADEH, E.; CHUNG, J. D. Design of the collector of a solar dish-stirling system: a case study. **IEEE Access**, IEEE, USA, v. 5, p. 20754–20762, oct. 2017.

GHORBANI, B.; MEHRPOOYA, M.; M., A.; NIASAR, M. Hydrogen liquefaction process using solar energy and organic rankine cycle power system. **Journal of cleaner production**, ELSEVIER, USA, v. 235, p. 1465–1482, oct. 2019.

GIL, F. A. **Diseño y evaluación de un concentrador solar parabólico para la producción de hidrógeno**. Dissertação (Mestrado) – Licenciatura in Ingeniería Mecánica, Universidad Autonoma Metropolitana, ciudad de México, Enero 2019.

GOSWAMI, D. Y. **Principles of solar engineering**. 3. ed. Boca Raton, Flórida: CRC press, 2015.

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, USA, v. 29, p. e 00307, sep. 2021.

IQBAL, M. **An introduction to solar radiation**. 1. ed. Ontario, Canada: Academic Press, 1983.

JAGER, K.-D.; ISABELLA, O.; SMETS, A. H.; SWAAIL, R. A. V.; ZEMAN, M. . **Solar energy: fundamentals, technology and systems**. 1. ed. Cambridge, England: UIT Cambridge, 2016.

KALOGIROU, S. A. **Solar energy engineering: processes and systems**. 1. ed. San Diego, Califórnia: ELSEVIER, 2009.

KULAL, S. D.; PATIL, P. S. R. Performance analysis of parabolic solar dish collector for various reflecting materials. **International Research Journal of Engineering and Technology**, IRJET, Índia, v. 3, n. 11, p. 326–329, nov. 2016.

LEE, H.; CALVIN, K.; DASGUPTA, D.; KRINNER, G.; MUKHERLLI, A.; THORNE, P.; PARK, Y. **IPCC, 2023: Climate Change 2023: Synthesis Report, Summary for Policymakers. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]**. 6. ed. Geneva, Switzerland, 2023.

LEE, H.-H. **Finite element simulations with ANSYS Workbench**. 1. ed. Tainan, Taiwan: SDC publications, 2021.

LOGAN, D. L. **A first course in the finite element method**. 6. ed. Boston, USA: CENGAGE, 2021.

LOVEGROVE, K.; STEIN, W. E. **Concentrating solar power technology: principles, developments and applications**. 1. ed. Cambridge, England: Woodhead Publishing, 2012.

MALIK, M. Z.; SHAIKH, P. H.; ZHANG, S.; LASHARI, A. A.; LEGHARI, Z. H.; BALOCH, M. H.; CAIMING, C. A review on design parameters and specifications of parabolic solar dish stirling systems and their applications. **Energy Reports**, ELSEVIER, USA, v. 8, p. 4128–4154, nov. 2022.

MALISKA, C. R. **Transferência de calor e mecânica dos fluidos computacional**. 2. ed. Rio de Janeiro, RJ: Grupo Gen-LTC, 2017.

MASTROPASQUA, L.; PECENATI, I.; GIOSTRI, A.; CAMPANARI, S. Solar hydrogen production: Techno-economic analysis of a parabolic dish-supported high-temperature electrolysis system. **Applied Energy**, ELSEVIER, USA, v. 261, p. 114392, mar. 2020.

MEDEIROS, C. A. G.; MARTINS, A. M. Geometria sol-terra: revisão didática com ênfase no hemisfério sul e direcionada pela abnt nbr 10899: 2013. **In: Congresso Brasileiro de Energia Solar - CBENS**, Brasil, 2020.

MEHRPOOYA, M.; GHORBANI, B.; HOSSEINI, S. S. Thermodynamic and economic evaluation of a novel concentrated solar power system integrated with absorption refrigeration and desalination cycles. **Energy Conversion and Management**, ELSEVIER, USA, v. 175, p. 337–356, nov. 2018.

MOAVENI, S. **Finite element analysis theory and application with ANSYS**. 4. ed. Harlow, England: Pearson Education, 2015.

MOHAMED, F. M.; JASSIM, A. S.; MAHMOOD, Y. H.; AHMED, M. A. Design and study of portable solar dish concentrator. **International Journal of Recent Research and Review**, Galore Knowledge Publication Pvt. Ltd., Índia, v. 3, p. 52–59, sep. 2012.

NUWAYHID, R. Y.; MRAD, F.; E., A.-S. R. J. R. The realization of a simple solar tracking concentrator for university research applications. **Renewable Energy**, ELSEVIER, USA, v. 24, n. 2, p. 207–222, oct. 2001.

ONU, P. **Adoption of the Paris Agreement**. **In: United Nations Climate Change Secretariat (UNFCCC)**. New York, USA, 2015.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de Engenharia para sistemas Fotovoltaicos. Grupo de Trabalho de Energia Solar–GTES, CEPEL–CRESESB, edição revisada e atualizada**. Rio de Janeiro, 2014.

QUASCHNING, V. **Understanding renewable energy systems**. 1. ed. London, England: Routledge, 2014.

SAHU, S. K.; K, A. S.; NATARAJAN, S. K. Design and development of a low-cost solar parabolic dish concentrator system with manual dual-axis tracking. **International Journal of Energy Research**, WILEY, England, v. 45, n. 4, p. 6446–6456, oct. 2021.

SALEH, I. M.; KHALIFA, K.; BUGHAZEM, M.; ALGHARBI, N. Developments in parabolic solar dish concentrator for enhanced system efficiency of steam generation. **Sirte University Scientific Journal**, v. 7, n. 1, p. 79–94, jun. 2017.

SANDOVAL, O. R.; CAETANO, B. C.; BORGES, M. U.; GARCIA, J. J.; VALLE, R. M. Modelling, simulation and thermal analysis of a solar dish/stirling system: a case study in natal, brazil. **Energy Conversion and Management**, ELSEVIER, USA, v. 181, p. 189–201, feb. 2019.

SONI, N.; REDDY, K. S. Techno-economic assessment of concentrated solar power technologies integrated with thermal energy storage system for green hydrogen production. **International Journal of Hydrogen Energy**, ELSEVIER, USA, v. 72, p. 1184–1203, jun. 2024.

THAKKAR, V.; DOSHI, A.; RANA, A. Performance analysis methodology for parabolic dish solar concentrators for process heating using thermic fluid. **IOSR Journal of Mechanical and Civil Engineering**, IOSR-JMCE, USA, v. 12, n. 1, p. 101–114, jan-feb. 2015.

UZAIR, M.; ANDERSON, T. N.; J., N. R. The impact of the parabolic dish concentrator on the wind induced heat loss from its receiver. **Solar Energy**, ELSEVIER, USA, v. 151, p. 95–101, jul. 2017.

VICHI, F. M.; MANSOR, M. T. C. Energy, environment and economy: Brazil in the world context. **Química Nova**, SciELO Brasil, Brasil, v. 32, n. 3, p. 757–767, apr. 2009.

WMO. **Provisional State of the Global climate 2023**. Geneva, Switzerland, 2023.

XIAO, L.; GUO, F. W.; WU, S. Y.; CHEN, Z. L. A comprehensive simulation on optical and thermal performance of a cylindrical cavity receiver in a parabolic dish collector system. **Renewable Energy**, ELSEVIER, USA, v. 145, p. 878–892, jan. 2020.

YILMAZ, F.; OZTURK, M. Thermodynamic and economic investigation of an innovative multigeneration plant integrated with the solar collector and combustion chamber. **International journal of hydrogen energy**, ELSEVIER, USA, v. 47, n. 74, p. 31786–31805, aug. 2022.

YILMAZ, F.; OZTURK, M.; SELBAS, R. Energy and exergy performance assessment of a novel solar-based integrated system with hydrogen production. **International journal of hydrogen energy**, ELSEVIER, USA, v. 44, n. 34, p. 18732–18743, nov. 2019.

ZAYED, M. E.; ZHAO, J.; LI, W.; ELSHEIKH, A. H.; ZHAO, Z.; KHALILI, A.; LI, H. Performance prediction and techno-economic analysis of solar dish/stirling system for electricity generation. **Applied Thermal Engineering**, ELSEVIER, USA, v. 164, p. 114427, jan. 2020.

ZHANG, C.; LI, N.; GUANGQI, A. Review of concentrated solar power technology applications in photocatalytic water purification and energy conversion: Overview, challenges and future directions. **Energies**, MDPI, Switzerland, v. 17, n. 2, p. 463, jan. 2024.

6 ANEXO A

Tabela 16 – Projetos CSP instalados no mundo

Usina elétrica	Local	(MW)	Tecnologia	Status	Ano
ISCC Hassi M'ei	Argélia	20	Calha parabólica	Operacional	2011
Jemalong	Austrália	1,1	Torre solar	Operacional	2017
Lake Cargellio	Austrália	3	Torre solar	Não operacional	2011
Liddell	Austrália	3	Linear Fresnel	Não operacional	2012
SolarHeat and Power Lidell	Austrália	1	Linear Fresnel	Não operacional	2004
Sundrop	Austrália	1,5	Torre solar	Operacional	2016
City of Medicine Heat	Canadá	1,1	Calha parabólica	Operacional	2014
Atacama I Cerro Dominador	Chile	110	Torre solar	Operacional	2021
Badaling Dahan	China	1	Torre solar	Operacional	2012
CEEC Hami	China	50	Torre solar	Operacional	2019
CEIC Dunhang	China	100	Linear Fresnel	Em construção	2023
CGN Delingha	China	50	Calha parabólica	Operacional	2018
CSNP Urat	China	100	Calha parabólica	Operacional	2020
Huaquiang Terasolar	China	15	Linear Fresnel	Operacional	2018
Huidong	China	110	Torre feixe baixo	Em construção	2023
Jinta Zhongguang	China	100	Torre solar	Em construção	2023
Lanzhou Dacheng Dunhuang	China	10	Linear Fresnel	Operacional	2016
Lanzhou Dacheng Dunhuang	China	50	Linear Fresnel	Operacional	2019
Luneng Haixi	China	50	Torre solar	Operacional	2019
PowerChina Qinghai Gonghe	China	50	Torre solar	Operacional	2020

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Projetos CSP instalados no mundo (Continuação da Tabela)*

Usina elétrica	Local	(MW)	Tecnologia	Status	Ano
Shouhang Dunhuang Phase I	China	10	Torre solar	Operacional	2016
Shouhang Dunhuang Phase II	China	100	Torre solar	Operacional	2018
SUPCON Delingha	China	10	Torre solar	Operacional	2013
SUPCOM Delingha	China	50	Torre solar	Operacional	2018
Yumen Xinneng / Xinchen	China	50	Torre feixe baixo	Operacional	2021
Aaborg Brenderslev	Dinamarca	5,5	Calha parabólica	Operacional	2016
ISCC Kuraymat	Egito	20	Calha parabólica	Operacional	2011
Augustin	França	0,3	Linear Fresnel	Operacional	2012
Ello	França	9	Linear Fresnel	Operacional	2019
Julich	Alemanha	1,5	Torre solar	Operacional	2008
Acme	Índia	2,5	Torre solar	Operacional	2011
Dadri ISCC	Índia	14	Linear Fresnel	Operacional	2019
Dhursar	Índia	125	Linear Fresnel	Operacional	2014
Godwari	Índia	50	Calha parabólica	Operacional	2013
Kvk Energy solar	Índia	100	Calha parabólica	Não operacional	2013
Megha	Índia	50	Calha parabólica	Operacional	2014
National Solar Thermal Power	Índia	1	Calha parabólica	Operacional	2012
Ashalim Plot A	Israel	110	Calha parabólica	Operacional	2019
Ashalim Plot B	Israel	121	Torre solar	Operacional	2019
SEDC	Israel	6	Torre solar	Operacional	2006
Archimede	Itália	4,7	Calha parabólica	Operacional	2010
ASE Demo Plant	Itália	0,4	Calha parabólica	Operacional	2013
Partana MS-LFR	Itália	4,26	Linear Fresnel	Em construção	2022
Rende	Itália	1	Linear Fresnel	Operacional	2014

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Projetos CSP instalados no mundo (Continuação da Tabela)*

Usina elétrica	Local	(MW)	Tecnologia	Status	Ano
Stromboli	Itália	4	Linear Fresnel	Em construção	-
Shagaya	Kwaiy	50	Calha parabólica	Operacional	2019
Água Prieta II	México	12	Calha parabólica	Operacional	2017
Airlight Energy Ait-Baba	Marrocos	3	Calha parabólica	Operacional	2014
ISCC Ain Beni Mathar	Marrocos	20	Calha parabólica	Operacional	2011
NOOR I	Marrocos	160	Calha parabólica	Operacional	2015
NOOR II	Marrocos	200	Calha parabólica	Operacional	2018
NOOR III	Marrocos	150	Torre solar	Operacional	2018
ISCC Duba I	Arábia Saudita	43	Calha parabólica	Operacional	2023
ISCC Wand Al Shamai	Arábia Saudita	50	Calha parabólica	Operacional	2018
Ilanga I	África do Sul	100	Calha parabólica	Operacional	2018
Kathu Solar Park	África do Sul	100	Calha parabólica	Operacional	2019
Bokpoort	África do Sul	50	Calha parabólica	Operacional	2016
Kaxu Solar One	África do Sul	100	Calha parabólica	Operacional	2015
Khi Solar One	África do Sul	50	Torre solar	Operacional	2016
Redstone	África do Sul	100	Torre solar	Em construção	2023
Xina One	África do Sul	100	Calha parabólica	Operacional	2018
Andasol I	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2008

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Projetos CSP instalados no mundo (Continuação da Tabela)*

Usina elétrica	Local	(MW)	Tecnologia	Status	Ano
Andasol 2	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2009
Andasol 3	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
Arcosol 50	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
Arenales	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2013
Aste 1A	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Aste 1B	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Astexol II	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Borges Termosolar	Espanha	22,5	Calha parabólica	Operacional	2012
Casablanca	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2013
CRS	Espanha	5	Torre solar	Operacional	2012
Enerstar	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2013
Extresol 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2010
Extresol 2	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2010
Extresol 3	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Gemasolar	Espanha	20	Torre solar	Operacional	2011
Guzman	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Helioenergy 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
Helioenergy 2	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Helios I	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Helios II	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Ibersol Ciudad Real	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2009
La& Aficana	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
La Dehesa	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
La Florida	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2010
La Risca	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2009
Lebrija 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
Majadas I	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2010
Manchasol 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
Manchasol 2	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Projetos CSP instalados no mundo (Continuação da Tabela)*

Usina elétrica	Local	(MW)	Tecnologia	Status	Ano
Morón	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Olivenza 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Orellana	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Palma Del Rio I	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
Palma Del Rio II	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2010
Planta solar 10	Espanha	11	Torre solar	Operacional	2007
Planta Solar 20	Espanha	20	Torre solar	Operacional	2009
Puerto Errado 1	Espanha	1,4	Linear Fresnel	Operacional	2009
Puerto Errado 2	Espanha	30	Linear Fresnel	Operacional	2012
Solaben 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2013
Solaben 2	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Solaben 3	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Solaben 6	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2013
Solacor 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Solacor 2	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2012
Solnova 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2009
Solnova 3	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2009
Solnova 4	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2009
Termesol 50	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2011
Termesol 1	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2013
Termesol 2	Espanha	50	Calha parabólica	Operacional	2013
Thai Solar Energy 1	Tailândia	5	Calha parabólica	Operacional	2012
Greenway CSP	Turquia	1,4	Torre solar	Operacional	2012
Noor Energy 1	Emirados Árabe	100	Torre solar	Em construção	2022
Noor Energy 1	Emirados Árabe	600	Calha parabólica	Em construção	2022
Shams 1	Emirados Árabe	100	Calha parabólica	Operacional	2013

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Projetos CSP instalados no mundo (Continuação da Tabela)*

Usina elétrica	Local	(MW)	Tecnologia	Status	Ano
Crescent Dunes	EUA	110	Torre solar	Operacional	2015
Genesis	EUA	250	Calha parabólica	Operacional	2014
Holaniku	EUA	2	Calha parabólica	Não operacional	2009
Ivanpah	EUA	377	Torre solar	Operacional	2014
Kimberlina	EUA	5	Linear Fresnel	Não operacional	2008
Maricopa	EUA	1,5	Prato parabólico	Não operacional	2010
Martin Next Generation	EUA	75	Calha parabólica	Operacional	2010
Mojave	EUA	280	Calha parabólica	Operacional	2014
Ntional Solar Thermal Test	EUA	5	Torre solar	Operacional	1976
Nevada Solar One	EUA	72	Calha parabólica	Operacional	2007
Saguaro	EUA	1	Calha parabólica	Não operacional	2006
Sierra Suntower	EUA	5	Torre solar	Não operacional	_
Solana	EUA	250	Calha parabólica	Operacional	2013
Solar Electric Generating SI	EUA	13,8	Calha parabólica	Descomissionado	1984
Solar Electric Generating SII	EUA	30	Calha parabólica	Descomissionado	1985
Solar Electric Generating SIII	EUA	30	Calha parabólica	Descomissionado	1985
Solar Electric Generating SIV	EUA	30	Calha parabólica	Descomissionado	1985
Solar Electric Generating SIX	EUA	80	Calha parabólica	Operacional	1990
Solar Electric Generating SV	EUA	30	Calha parabólica	Descomissionado	1989
Solar Electric Generating SVI	EUA	30	Calha parabólica	Descomissionado	1989

Continua na próxima página

Tabela 16 – *Projetos CSP instalados no mundo (Continuação da Tabela)*

Usina elétrica	Local	(MW)	Tecnologia	Status	Ano
Solar Electric Generating SVII	EUA	30	Calha parabólica	Descomissionado	1989
Solar Electric Generating SVIII	EUA	80	Calha parabólica	Descomissionado	1989
Solar one	EUA	10	Torre solar	Descomissionado	1982
Solar two	EUA	10	Torre solar	Descomissionado	1995
Stillwater Geosolar	EUA	2	Calha parabólica	Operacional	2015
Toele Army Depot	EUA	1,5	Prato parabólico	Não operacional	–

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