

UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIA E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA DE ENERGIA

RODRIGO DE SOUZA PEREIRA

**ENERGIA SOLAR ANUAL ABSORVIDA POR CONCENTRADORES
LINEARES DO TIPO FRESNEL APLANÁTICO EM MACEIÓ-AL**

MACEIÓ-AL

2023

RODRIGO DE SOUZA PEREIRA

**ENERGIA SOLAR ANUAL ABSORVIDA POR CONCENTRADORES
LINEARES DO TIPO FRESNEL APLANÁTICO EM MACEIÓ-AL**

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito para
obtenção do título de Engenheiro
de Energia pela Universidade
Federal de Alagoas.

Orientador: Prof. Dr. Leonardo
Faustino Lacerda de Souza

MACEIÓ-AL
2023

Catálogo na fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca do Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecária Responsável: Myrtes Vieira do Nascimento

P436e Pereira, Rodrigo de Souza

Energia solar anual absorvida por concentradores lineares do tipo Fresnel Aplanático em Maceió-AL. / Rodrigo de Souza Pereira – 2023. 66f.; il.

Monografia de Graduação em Engenharia de Energia (Trabalho de Conclusão de Curso) – Universidade Federal de Alagoas, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias. Rio Largo, 2023.

Orientação: Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza

Inclui bibliografia

1. Energia heliotérmica. 2. Concentração solar. 3. Coletor solar.
I. Título.

CDU: 620.91

Folha de Aprovação

RODRIGO DE SOUZA PEREIRA

Energia solar anual absorvida por concentradores lineares do tipo Fresnel aplanático em
Maceió-AL

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado como requisito parcial
para a obtenção do título de
Engenheiro de Energia pela
Universidade Federal de Alagoas.
Aprovado em 5 de maio de 2023.



Documento assinado digitalmente
LEONARDO FAUSTINO LACERDA DE SOUZA
Data: 08/05/2023 11:26:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leonardo Faustino Lacerda de Souza, CECA/UFAL (Orientador)

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
RICARDO ARAUJO FERREIRA JUNIOR
Data: 08/05/2023 12:26:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Ricardo Araujo Ferreira Junior, CECA/UFAL (1º Avaliador)



Documento assinado digitalmente
IGOR CAVALCANTE TORRES
Data: 08/05/2023 14:24:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Igor Cavalcante Torres, CECA/UFAL (2º Avaliador)

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço aos meus pais, José da Silva Pereira e Ana Valéria Bezerra de Souza Pereira e minha irmã Magda Valéria Bezerra de Souza Pereira, por ter me dado forças para nunca desistir e sempre seguir em busca dos meus sonhos, em especial este, que é me tornar um profissional de engenharia.

Agradeço ao meu orientador Leonardo Faustino pela amizade, paciência, ensinamentos e sua disposição a todo momento que foi fundamental para a realização desse trabalho.

Agradeço aos meus amigos de UFAL, Joyce, Ikaro, Marcella, Vitória por me acompanharem durante toda essa jornada, tornando os dias mais leves.

A Hugo, Raquel, Renata e Francisco, meus parceiros de vida que sempre me apoiaram incondicional em todos os momentos necessários nessa caminhada, estes que sempre acreditaram em mim.

Finalmente agradeço a todas as pessoas que me deram suporte, seja no decorrer da graduação, seja na vida pessoal.

RESUMO

Entre as possibilidades para a redução do uso de combustíveis fósseis está a substituição desses por fontes alternativas de energia. O sol é uma excelente fonte de energia renovável, sua radiação é amplamente disponível em todo o planeta e pode ser utilizada para a captação de calor. Dessa maneira, tecnologias de concentração solar vêm sendo utilizadas, para processos domésticos e industriais que tenham necessidade de aquecimento de fluidos ou geração de energia elétrica. Os coletores concentradores do tipo Fresnel linear se mostram como uma opção interessante para geração de vapor saturado a temperaturas de até 200°C em sistemas de pequeno e médio porte devido principalmente à sua maior simplicidade e menores custos, quando comparado com outros sistemas de concentração solar, em especial ao cilindro parabólico. Dessa forma, o presente trabalho destaca uma estimativa de absorção energética anual na cidade de Maceió pelo concentrador Linear Fresnel aplanático (CLFA), que se mostrou capaz de atingir altas temperaturas para geração de vapor em sistemas concentradores de radiação, com o propósito de converter energia térmica em elétrica com elevada eficiência. Com semiângulo total de 9 mrad e dada uma distribuição de brilho Gaussiana, a modelagem analítica das perdas validadas através de traçado de raios permitiu a estimativa de energia anual absorvida por concentradores lineares Fresnel aplanático: CLFA {-1; -0,1} com $C = 50$ e $\gamma(0,0) = 0,72$, e CLFA {-2,2; -0,03} com $C = 35$ e $\gamma(0,0) = 0,84$, tendo o último alcançando a maior quantidade de energia anual absorvida.

Palavras-chaves: Energia heliotérmica, concentração solar, coletor solar.

ABSTRACT

Among the possibilities for reducing the use of fossil fuels is replacing them with alternative energy sources. The sun is our biggest source of renewable energy, its radiation is widely available across the planet and can be used to capture heat. In this way, solar concentration technologies are being used, more and more, for domestic and industrial processes that need to heat fluids or generate electricity. Linear Fresnel concentrator collectors are an interesting option for generating saturated steam at temperatures of up to 200°C in small and medium-sized systems, mainly due to their greater simplicity and lower costs, when compared to other solar concentration systems, especially the parabolic cylinder. Thus, this work highlights an estimate of annual energy absorption in the city of Maceió by the aplanatic Linear Fresnel concentrator (CFLA), which proved to be capable of reaching high temperatures for steam generation in radiation concentrator systems, with the purpose of converting thermal energy into electric with high efficiency. With a total half-angle of 9 mrad and given a Gaussian brightness distribution, the analytical modeling of the losses validated through ray tracing allowed the estimation of the annual energy absorbed by aplanatic Fresnel linear concentrators: CLFA {-1; -0.1} with $C = 50$ and $\gamma(0.0) = 0.72$, and CLFA {-2.2; -0.03} with $C = 35$ and $\gamma(0.0) = 0.84$, with the latter achieving the highest amount of annual energy absorbed.

Keywords: Heliothermal energy, solar concentration, solar collector.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Matriz Elétrica Mundial 2020	13
Figura 2 – Total diário da irradiação direta normal	15
Figura 3 – Planta de bombeamento de água do rio Nilo (Egito, 1913)	19
Figura 4 – Distribuição percentual de radiação solar incidente	20
Figura 5 – Espectro Eletromagnético	22
Figura 6 – Concentrador parabólico de John Ericsson (1870)	24
Figura 7 – Coletor parabólico – SEGS 1 (Paris, 1882)	25
Figura 8 – Tecnologias CSP: (a) Disco parabólico; (b) Torre central; (c) Calha parabólica; (d) Concentrador linear Fresnel.....	27
Figura 9 – Rastreamento solar dos CSP.....	28
Figura 10 – Comparação de lentes	30
Figura 11 – Primeiro protótipo de coletor linear Fresnel.....	31
Figura 12 – Esquema de concentrador solar Fresnel Linear	32
Figura 13 – Esquema de concentrador solar Fresnel Linear	33
Figura 14 – Geometrias para o concentrador secundário	34
Figura 15 – Representação do turbo absorvedor de um sistema LFR	35
Figura 16 – Exemplificação dos ângulos de elevação e azimute.....	36
Figura 17 – Espelho curvo	37
Figura 18 – Altura do receptor	37
Figura 19 – Geometrias para o concentrador secundário	38
Figura 20 – Perdas por sobreposição entre espelhos adjacentes	39
Figura 21 – Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes	39
Figura 22 – Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes	40
Figura 23 – Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes	41
Figura 24 – Geometria aplanática dos parâmetros s e K	42
Figura 25 – Mapa com índice de irradiação da região Nordeste	45
Figura 26 – Região analisada	46
Figura 27: Comparação de irradiação solar em Maceió dos programas LABREN e COPERNICUS.....	48
Figura 28 – Ângulo de altitude solar	51
Figura 29 - Projeção transversal e longitudinal do ângulo de incidência.	52

Figura 30 – CFLA com parâmetros $\{-1; -0,1\}$ e $C = 50$	55
Figura 31 – CFLA com parâmetros $\{-2,25; -0,03\}$ e $C = 35$	56
Figura 32 – Irradiação direta normal média mensal em Maceió no ano de 2022 pelo Copernicus.....	57
Figura 33 – Altitude Solar.....	58
Figura 34 – Ângulo de azimute solar em Maceió.....	59
Figura 35 – Ângulo de incidência da cidade de Maceió – Alagoas.....	60
Figura 36 – Energia anual absorvida pelos concentradores	61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Projetos heliótermicos no Brasil	44
Tabela 2 – Radiação Global Média brasileira	45
Tabela 3 – Média de irradiação solar da cidade de Maceió	48
Tabela 4 – Fenômenos astronômicos de 2022	57
Tabela 5 – Resultados de energia anual absorvida e radiação direta em 2022	61

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CLFA	Concentrador linear Fresnel aplanático
CSP	Concentrated solar power (energia solar concentrada)
DNI	Direct normal irradiance (irradiação direta normal)
LFR	Linear Fresnel reflector (concentrador linear Fresnel)
PTC	Parabolic trough (concentrador parabólico)
PV	Photovoltaic cell (células fotovoltaicas)

LISTA DE SÍMBOLOS

A_{ab}	área de abertura primária
A_{abs}	área do tubo absorvedor
C	concentração geométrica
R_{abs}	raio absorvedor
η_{th}	eficiência térmica
η_{opt}	eficiência óptica
θ_s	semiângulo de abertura total do feixe de radiação
Q_{abs}	energia absorvida pelo absorvedor
ρ	refletividade
α	absortividade
τ	transmissividade
L	comprimento do conjunto de espelhos primários
γ	fator de interceptação
θ	ângulo de incidência
θ_t	projeção transversal do ângulo de incidência
θ_L	projeção longitudinal do ângulo de incidência
γ_t	fator de interceptação transversal
γ_L	fator de interceptação longitudinal
φ	ângulo de saída do raio refletido pelo secundário
s	distância entre os vértices do primário e do secundário
K	distância entre o vértice do espelho secundário e o foco do sistema
μ	ângulo entre o raio refletido e a bissetriz do espelho
β	diferença angular entre um ponto no espelho cilíndrico e seu ponto
ω	inclinação do espelho
Y_l	reta que passa pela borda direita do espelho
Y_s	reta que passa pela borda esquerda do espelho

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	13
1.2 JUSTIFICATIVA	16
1.3 OBJETIVOS	17
1.3.1 OBJETIVO GERAL	17
1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	17
2 REFERENCIAL TEÓRICO	18
2.1 ENERGIA SOLAR	18
2.2 RADIAÇÃO SOLAR	19
2.3 RADIAÇÃO TÉRMICA	21
2.4 ESPECTRO SOLAR	22
2.5 GERAÇÃO HELIOTÉRMICA	24
2.5.1 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA HELIOTÉRMICA	24
2.5.2 COLETORES CONCENTRADORES	26
2.5.3 CONCENTRADORES LINEARES	29
2.6 COLETOR SOLAR LINEAR FRESNEL	30
2.7 COMPONENTES DOS CONCENTRADORES LINEARES FRESNEL	32
2.7.2 CONCENTRADOR SECUNDÁRIO	33
2.7.3 TUBO ABSORVEDOR	34
2.7.4 ASPECTOS PRÁTICOS E PERDAS ÓPTICAS	35
2.8 CONCENTRADOR SOLAR APLANÁTICO	41
2.9 TECNOLOGIA CSP NO BRASIL	43
2.9.1 POTENCIAL DO NORDESTE PARA TECNOLOGIA CSP	44
3 MATERIAS E MÉTODOS	46
3.1 DADOS DE IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL	46
3.2 CÁLCULO DOS ÂNGULO DE INTERESSE	49
3.3 CONCENTRAÇÃO GEOMÉTRICA	52
3.4 CONCENTRADORES LINEAR FRESNEL APLANÁTICO CONSIDERADOS	55
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES	57
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	63
REFERÊNCIAS	64

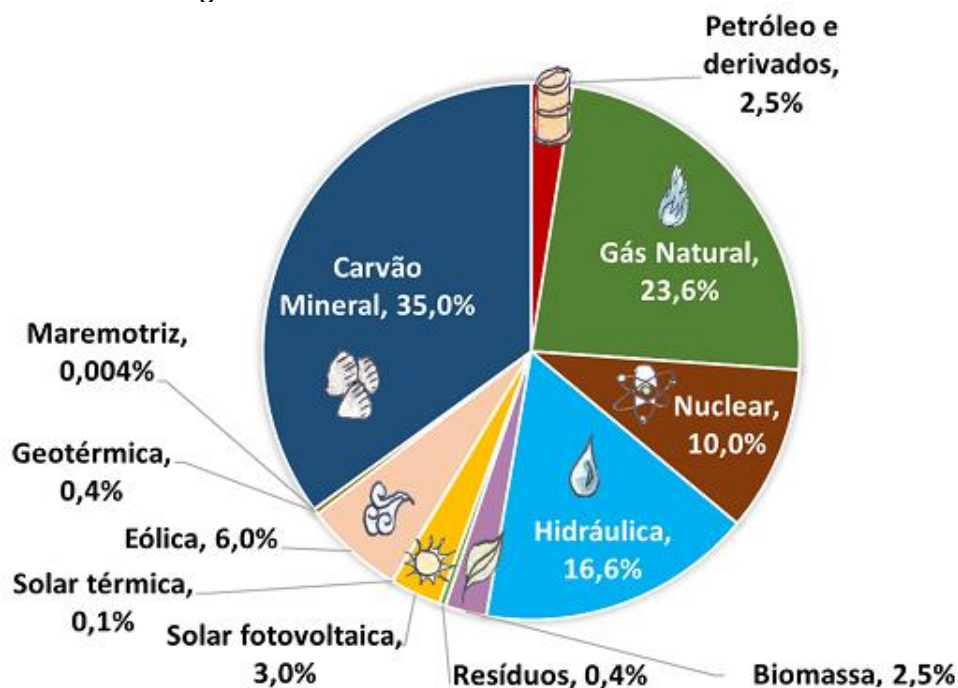
1 INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

A matriz energética é a capacidade total oficial de produção de energia que um determinado país ou região possui, incluindo todas as fontes de produção atualmente descobertas e ativas que garantem segurança energética e atendem à demanda local. A matriz elétrica exprime o quadro de geração e consumo de energia. É instrumento utilizado para o Planejamento Energético do País e fundamental para se estabelecer políticas que promovam a competitividade (BUENO, 2013).

No cenário atual, tem-se uma matriz elétrica mundial ainda dominada por fontes não renováveis (IEA, 2022) como mostrado na Figura 1. É buscado, porém, de forma ostensiva, a substituição dessas fontes por outras que estão sendo descobertas desde o século passado, menos poluentes.

Figura 1 – Matriz Elétrica Mundial 2020



Fonte: (IEA, 2022)

O ano de 2022 foi marcado pelo avanço da energia renovável no Brasil. O país ultrapassou o marco de 92% de participação de usinas hidrelétricas, eólicas, solares e de biomassa no total gerado pelo Sistema Interligado Nacional – SIN, o maior percentual dos últimos 10 anos. No entanto, desse percentual, 65,2 % foram provenientes das usinas hidrelétricas, que demandam reservatórios com, pelo menos, 10 % da capacidade para operarem, deixando claro a necessidade da diversificação da matriz energética nacional (QUINTELLA,2019).

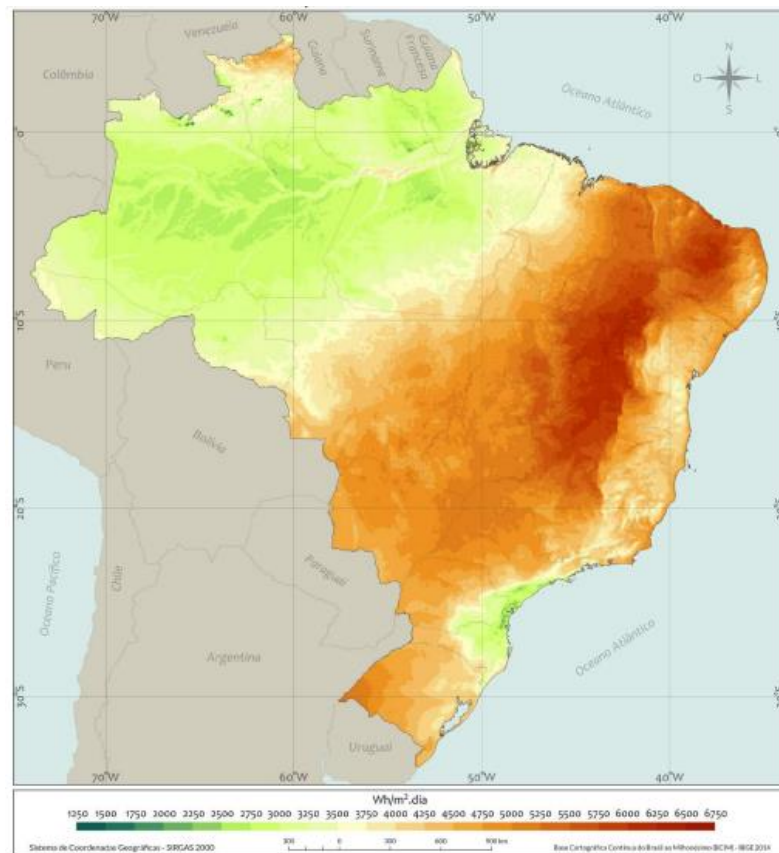
Nesse contexto, a energia solar se apresenta como uma das alternativas mais promissoras, por conta de sua fonte praticamente inesgotável na escala de tempo humana, baixa emissão de poluentes, baixo custo de manutenção e possibilidade de aplicação em lugares onde não há grande disponibilidade de outras fontes energéticas.

Os processos mais utilizados para aproveitamento da energia solar para geração de eletricidade e de calor são: o aproveitamento fotovoltaico (FV), que converte a energia solar em energia elétrica; utilizando uma tecnologia baseada no efeito fotovoltaico, a geração heliotérmica (do inglês, Concentrating Solar Power (CSP), que pode produzir energia elétrica ou produzir calor para uso direto; e o aproveitamento por coletores, que realizam o aquecimento direto de líquidos e/ou de ambientes a partir da luz solar. Nesse sistema, a irradiância solar direta (em inglês, Direct Normal Irradiance – DNI) é convertida em energia térmica (LOVEGROVE; STEIN, 2012).

O Brasil possui privilegiadas condições climáticas para o aproveitamento de energia solar. Em destaque temos a região Nordeste do Brasil que apresenta os maiores índices de irradiação solar e a menor variabilidade anual, como podemos analisar na Figura 2. O motivo para tal potencial se deve ao fato do Nordeste ser uma região próxima da linha do Equador.

A concentração da energia solar só acontece com a irradiação solar direta. Em geral, locais com uma disponibilidade de irradiação solar anual acima de 2000 kWh/m² e baixa nebulosidade apresentam potencial para geração heliotérmica.

Figura 2 – Total diário da irradiação direta normal



Fonte: PEREIRA, E. B., 2017

De acordo com o Atlas Brasileiro de Energia Solar, a irradiação solar direta normal em algumas regiões do Brasil pode atingir um total diário de 5 kWh.m², sendo a região da Bahia e Minas Gerais as áreas que possuem grande destaque.

1.2 JUSTIFICATIVA

O foco do trabalho é baseado no aproveitamento das fontes de energias renováveis, uma vez que essas fontes estão ganhando cada vez mais destaque no cenário mundial. Nesse sentido, a aplicação do concentrador Fresnel aplanático, como uma alternativa para o desenvolvimento da geração CSP. A tecnologia pode ser usada na produção de aquecimento, resfriamento, dessalinização, calor industrial, processos químicos e a geração de energia elétrica, caracterizando uma versatilidade que, caso explorada a contento, pode contribuir para a transição energética em curso no planeta.

Dentre as diversas técnicas, a tecnologia de espelhos concentradores Fresnel com foco linear se destaca por ser versatilidade.

Dessa forma, a elaboração deste trabalho justifica-se para o aproveitamento da radiação solar anual da cidade de Maceió, utilizando o concentrador linear Fresnel aplanático, como uma alternativa de baixo custo e alta eficiência óptica.

1.3 OBJETIVOS

1.3.1 OBJETIVO GERAL

Obter uma estimativa para a quantidade de energia absorvida por concentradores linear Fresnel aplanático localizados na cidade de Maceió, no estado de Alagoas.

1.3.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Propor um modelo para estimativa da irradiação direta anual absorvida por concentradores lineares de dupla reflexão;
- Estimar a energia absorvida por dois diferentes concentradores lineares Fresnel aplanático na cidade de Maceió;
- Comparar a energia absorvida entre dois concentradores solares Fresnel aplanático.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ENERGIA SOLAR

Hémery et al. (1993) estimam que os primeiros relatos referentes ao aproveitamento da energia solar para fins de iluminação, deu-se no período Paleolítico. Por possuir hábitos diurnos por natureza, desde os primórdios, houve uma preocupação com a obtenção de uma forma de luz artificial, sendo que foi no domínio da produção do fogo nesse período, com o uso de um ramo de vegetal resinoso, que o homem deu seu primeiro passo para alcançar esse objetivo (Farias & Selitto, 2011).

A humanidade está ligada à energia solar desde muitos séculos, quando se utilizava o sol para secar peles e alimentos, achados históricos de arqueólogos comprovam que, já no século VII A.C se utilizavam simples lentes de vidro para concentrar a luz do sol e desta forma queimar pequenos pedaços de madeira e assim obter fogo (SOUZA, 2005).

A evolução da tecnologia proporcionou grande aumento no uso de energia, após a Revolução Industrial, resultando no aprimoramento da qualidade de vida nos países em desenvolvimento (GOLDEMBERG; VILLANUEVA, 2003 apud MELIN; CAMIOTO, 2019). Para Santos (2009, p. 12) “com o crescente desenvolvimento das civilizações, cada vez mais pesquisas foram orientadas para aproveitamento da energia solar, principalmente na sua utilização térmica”.

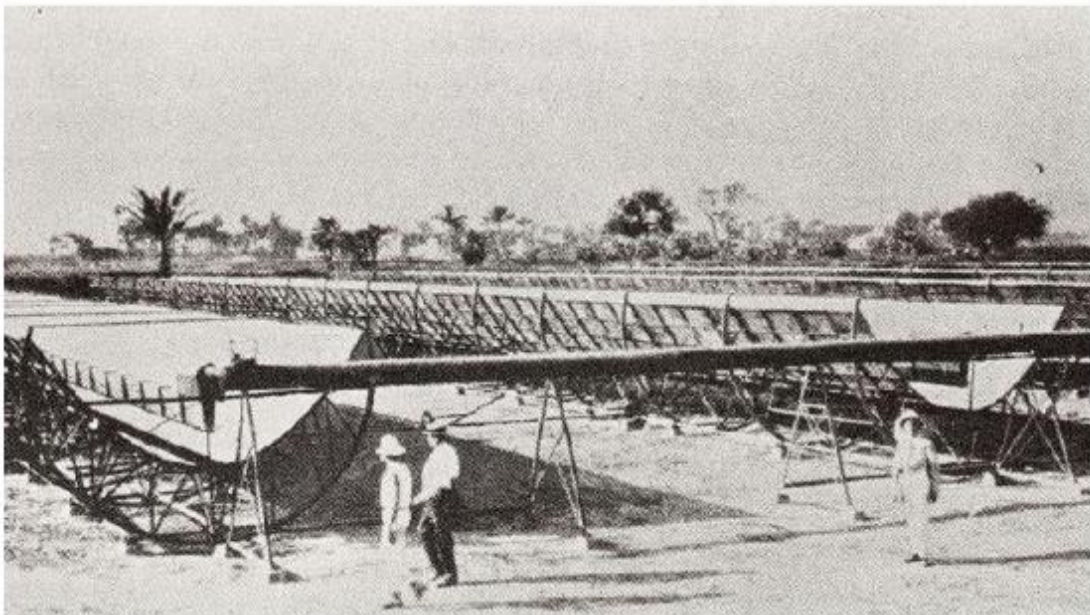
Segundo Kalogirou (2009) citado por Lodi (2011), fornos solares para fusão de metais foram desenvolvidos na Europa e no Oriente Médio no século XVIII. No mesmo século, o químico Lavoisier desenvolveu um forno solar que atingia uma temperatura de aproximadamente 1750 °C com lentes de 1,32 m (KALOGIROU, 2009).

No século seguinte, várias tentativas foram feitas para converter a radiação solar em energia térmica na forma de vapor de baixa pressão para que os motores a vapor pudessem ser usados. No entanto, somente no final do século que o foi desenvolvido nos Estados Unidos, o primeiro motor a vapor que funcionava diretamente com energia solar, o sistema incluía cilindros parabólicos

que usavam água e ar como fluídos de trabalho (KALOGIROU, 2009;LODI, 2011).

No século XX, o desenvolvimento da tecnologia de energia solar continuou, no início do século um campo solar com uma área de cerca de 1200 m² foi construído no Egito (Figura 3). Consistia em cilindros parabólicos, onde a água era aquecida até virar vapor diretamente nos receptores, que tinha como finalidade a operação de uma bomba, para bombeamento de água do rio Nilo (MALAGUETA, 2012).

Figura 3 – Planta de bombeamento de água do rio Nilo (Egito, 1913)



Fonte: RAGHEB (2011)

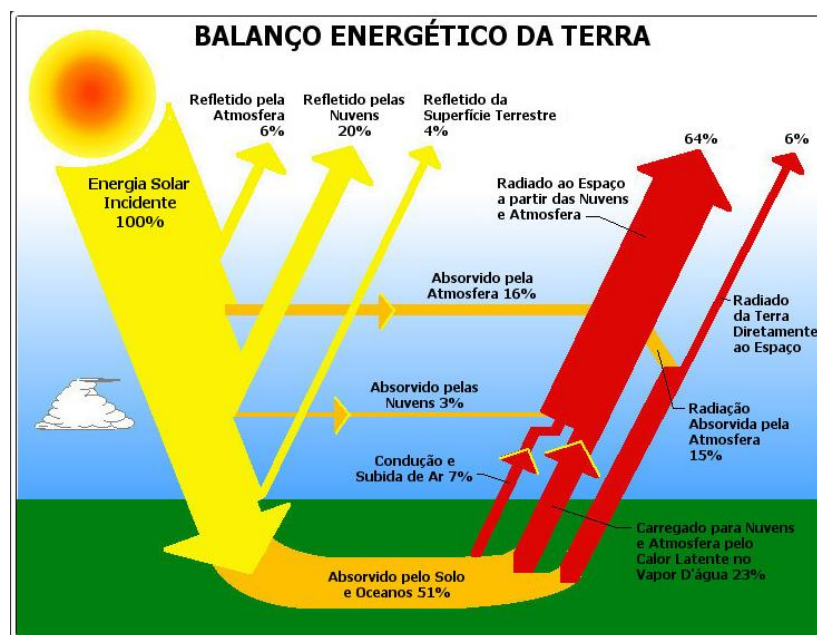
2.2 RADIAÇÃO SOLAR

O que entendemos por radiação solar é a energia emitida pelo sol, especialmente a energia transmitida na forma de radiação eletromagnética. Essa energia é dividida em energia da luz visível, tem uma frequência mais alta, outra é uma frequência mais baixa próximas ao infravermelho e a radiação ultravioleta.

O Sol é um enorme reator de fusão nuclear formado por uma esfera de matéria gasosa quente de 1,39 milhões de quilômetros de diâmetro, irradiando continuamente 3,8 x 10²³ kW de energia, com a Terra interceptando cerca de

$1,7 \times 10^{23}$ kW. Desta radiação recebida pela Terra, 30% (Figura 4) é refletida de volta ao espaço, 47% é absorvida pela atmosfera, oceanos e terra para manter a temperatura ambiente, e o restante é usado para manter a convecção atmosférica e o ciclo hidrológico. A densidade média anual do fluxo energético proveniente dessa radiação solar, quando é medida em um plano perpendicular à direção da propagação dos raios solares no topo da atmosfera terrestre, denomina-se “constante solar” e equivale ao valor de 1.367 W/m^2 (FILHO, 2014).

Figura 4 – Distribuição percentual de radiação solar incidente



Fonte: RecursoSolar, 2022

A radiação sofre variações a partir do momento em que ela entra na atmosfera até chegar à superfície terrestre, pois há a influência de diversos fatores como ar atmosférico, nuvens e da poluição. A radiação que atinge o solo, chamada de radiação solar global, vem de todas as direções pois ao entrar na atmosfera ela encontra obstáculos como vapor e se espalha mudando de direção.

A radiação solar global é a soma da radiação direta e da radiação difusa. A radiação direta corresponde aos raios solares que chegam diretamente do Sol em linha reta e incidem sobre o plano horizontal com uma inclinação que

depende do ângulo zenital do Sol. A radiação difusa corresponde aos raios solares que chegam indiretamente ao plano. É resultado da difração na atmosfera e da reflexão da luz na poeira, nas nuvens e em outros objetos.

Mesmo num dia ensolarado, pelo menos 20% da radiação que atinge a superfície é difusa, já em um dia totalmente com nuvens, não há radiação direta e 100% da radiação é difusa.

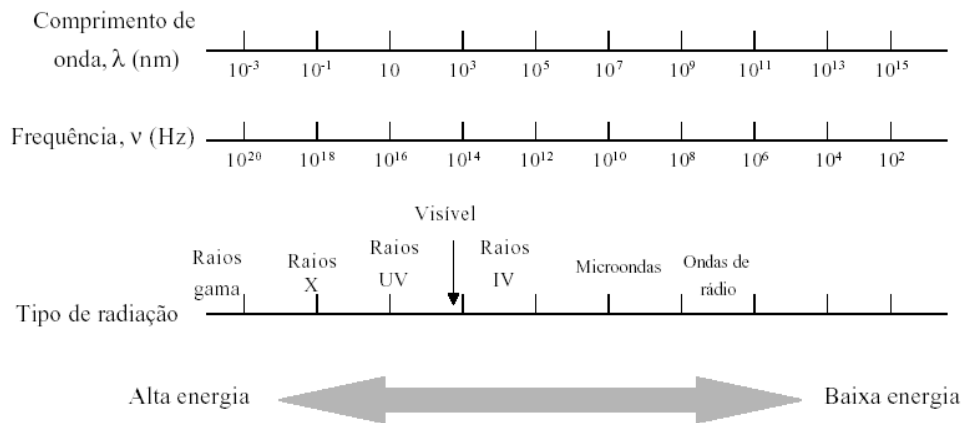
A única componente da radiação solar que pode ser concentrada é a irradiância direta normal, portanto, quando o assunto for energia heliotérmica, essa componente será a mais evidente.

2.3 RADIAÇÃO TÉRMICA

O conceito de calor está relacionado ao conceito de energia. Em certo sentido, o calor pode ser entendido como um fluxo de energia, ou seja, como energia em transição. Quando o calor transporta energia, pode ser pensado como uma onda. Uma onda é um tipo de movimento que consiste em um pulso ou uma série de pulsos que transporta apenas energia e pode se propagar no vácuo ou em um material. No caso do calor, essa energia é transportada na forma de ondas eletromagnéticas na frequência infravermelha (BONJORNO, 2004).

A radiação possui uma ampla faixa de comprimentos de onda que variam de valores menores que 10^{-10} μm a valores maiores que 10^{10} μm . A Figura 5 demonstra o espectro eletromagnético, que inclui a ordem crescente de comprimento de onda, raios gama (γ), os raios cósmicos, raios X, radiação ultravioleta, radiação infravermelha, micro-ondas, luz visível e ondas de rádio.

Figura 5 – Espectro Eletromagnético



Fonte: PETOLAS (2022)

A partir de $0,40 \mu\text{m}$ e até $0,76 \mu\text{m}$ temos o espectro visível, que é a luz visível. Ela é responsável pela percepção de cores no olho humano, e o Sol é a principal fonte de luz da Terra, e a radiação solar compreende de $0,3 \mu\text{m}$ à $3 \mu\text{m}$, ou seja, quase 50% da radiação solar é basicamente luz.

Todos os corpos emitem radiação. Corpos à temperatura ambiente emitem essa radiação no espectro infravermelho, que cobre a faixa de $0,76 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$. Para que um objeto à temperatura ambiente emita no espectro visível, o objeto deve ser aquecido a uma temperatura de pelo menos 800 K ($1073,15^\circ\text{C}$). Dois exemplos clássicos desse fenômeno são o aço em temperaturas acima de 1773,15 K (1500°C) e o filamento de tungstênio de uma lâmpada, que deve estar acima de 2000 K ($1726,85^\circ\text{C}$) para emitir a radiação no espectro visível (ÇENGEL, 2009).

2.4 ESPECTRO SOLAR

A energia radiante vem em muitas formas, que são agrupadas no espectro eletromagnético, que consiste na faixa de todas as frequências possíveis de radiação eletromagnética. A energia radiante, também chamada de energia luminosa, consiste em partículas chamadas fótons que viajam em ondas na

velocidade da luz, cada partícula tendo um comprimento de onda de λ e uma quantidade de energia e relacionada à constante de Planck.

Em seu caminho para a superfície terrestre, a radiação solar é enfraquecida ao passar pela atmosfera devido aos processos de absorção causados pela camada de ozônio, vapor d'água e dióxido de carbono, e dispersão, fenômeno também chamado de *Scattering*, no qual a interação entre as partículas em “suspensão” desvia a radiação.

Com diferentes mudanças direcionais da radiação do sol, é possível que a radiação seja dividida em partes. A primeira parte é a radiação solar difusa (G_d), que atinge a superfície da Terra sem uma trajetória definida. A segunda parte é a radiação solar direta, que atinge a superfície por um caminho bem definido e tem característica vetorial, beneficiando-se geralmente em dias ensolarados e sem nuvens. Em dias nublados, a radiação solar direta (G_b) é quase zero. A última fração é radiação refletida (G_r), que atinge o solo após ser refletida de uma determinada superfície.

A soma das três frações de radiação forma a radiação global (G) de acordo com a equação abaixo:

$$G = G_b + G_d + G_r \quad (1)$$

2.5 GERAÇÃO HELIOTÉRMICA

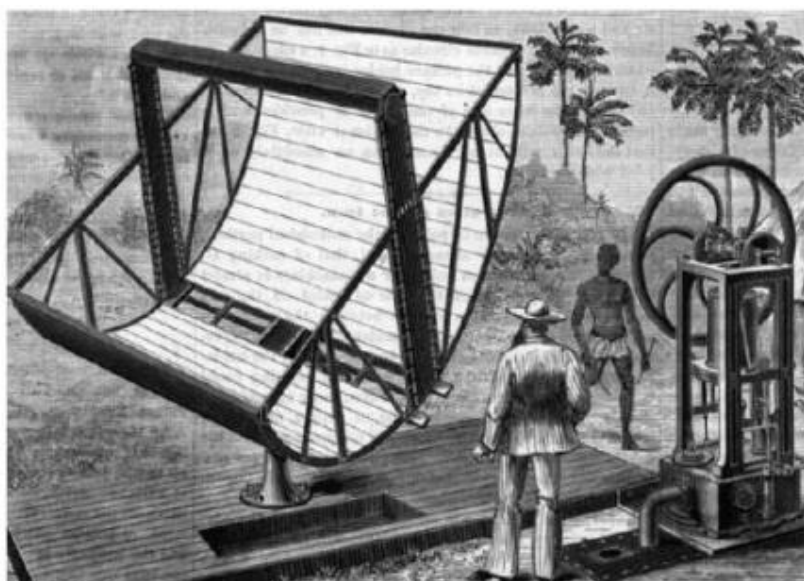
2.5.1 HISTÓRICO DA TECNOLOGIA HELIOTÉRMICA

A tecnologia heliotérmica é relativamente nova em todo o mundo. Na década de 70 ocorreu a primeira grande crise do petróleo, que de alguma forma aumentou os incentivos e a demanda por fontes alternativas de energia para gerar eletricidade.

No século XIX, foram feitas as primeiras tentativas de produzir vapor (a baixa pressão) a partir da radiação solar. Os primeiros motores a vapor movidos a energia solar foram construídos por Augusto Moucho entre 1864 e 1878 na Europa e no norte da África.

O desenvolvimento de novos sistemas continuou em nos Estados Unidos, segundo JORDAN e IBELE (1956) citado por KALOGIROU (2009), onde o engenheiro Capitão John Ericsson construiu o primeiro motor a vapor movido a energia solar direta (Figura 6). O engenheiro desenvolveu um total de oito sistemas de aquecimento direto de água, ou seja, ar como fluido de operação em cilindros parabólicos.

Figura 6 – Concentrador parabólico de John Ericsson (1870)

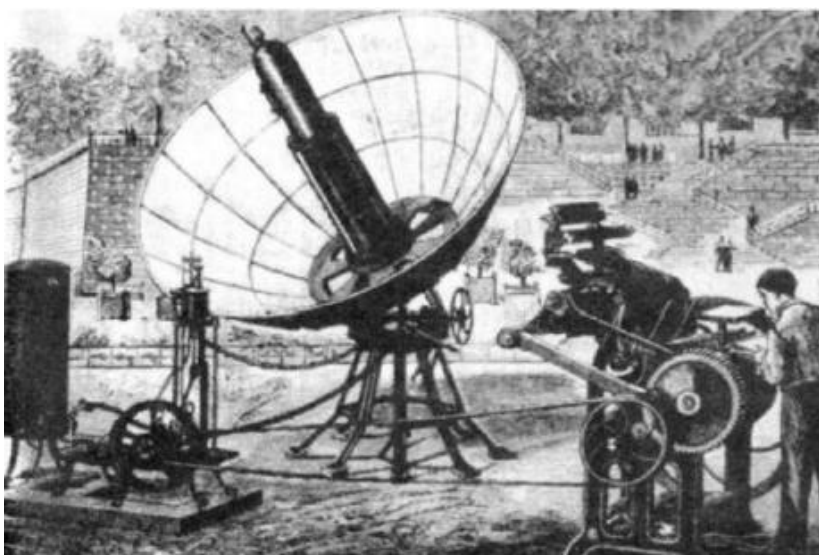


Fonte: RAGHED (2011)

Assim, em 1979, foi instalada no Novo México pelo laboratório Sandia (*Sandia National Laboratory*) a primeira planta solar comercial, composta por coletores cilindros parabólicos que atingiam temperaturas de até 500° C e era utilizada para calor de processos industriais. (RAGHEB, 2011 apud LODI, 2011)

Em 1882, a primeira fonte heliotérmica comercial a partir da radiação solar foi desenvolvida com os primeiros coletores solares cilindro parabólicos, chamada de SEGS 1 (Figura 7), instalada no estado da Califórnia nos Estados Unidos, com capacidade de geração de 14 MW de potência (LODI, 2011).

Figura 7 – Coletor parabólico – SEGS 1 (Paris, 1882)



Fonte: KALOGIROU (2009)

Um marco da área de solar no mundo foi a Lei de Incentivos Espanhola, introduzida em 1998 pelo Real Decreto D.R. 2.818/1998, que submeteu procedimentos administrativos e condições para incentivar plantas e fontes alternativas de energia renovável, estimuladas por tarifas diferenciadas acima do valor de mercado como forma de estímulo.

O conhecimento, melhorias tecnológicas e incentivos financeiros obtidos ao longo dos anos contribuíram para que os Estados Unidos e a Espanha sejam hoje os países de referência para a energia solar térmica de alta potência.

2.5.2 COLETORES CONCENTRADORES

A eletricidade pode ser produzida a partir do sol tanto indiretamente quanto diretamente. A forma indireta converte a energia solar em energia térmica, em seguida em energia elétrica. Já a forma direta utiliza o sistema fotovoltaico.

O princípio de funcionamento de qualquer sistema de aquecimento solar térmico é o mesmo, a radiação solar é captada e utilizada para aquecer o fluido de trabalho. Nesse contexto, destacam-se os sistemas solares ativos, que utilizam coletores solares para captar energia solar, aquecendo um fluido de trabalho que circula no interior dos coletores solares e transferindo sua energia para o destino final por meio de um permutador.

O mais importante sobre os sistemas solares térmicos é que eles têm impacto quase zero no meio ambiente. Outro ponto importante é que a energia solar está presente em praticamente todas as regiões do mundo, permitindo assim, um grande potencial.

Outra vantagem do sistema de aquecimento solar é que o custo é previsível, ou seja, de forma que o montante principal está atrelado ao investimento inicial e não é afetado por mudanças ou flutuações no mercado de custos de combustível.

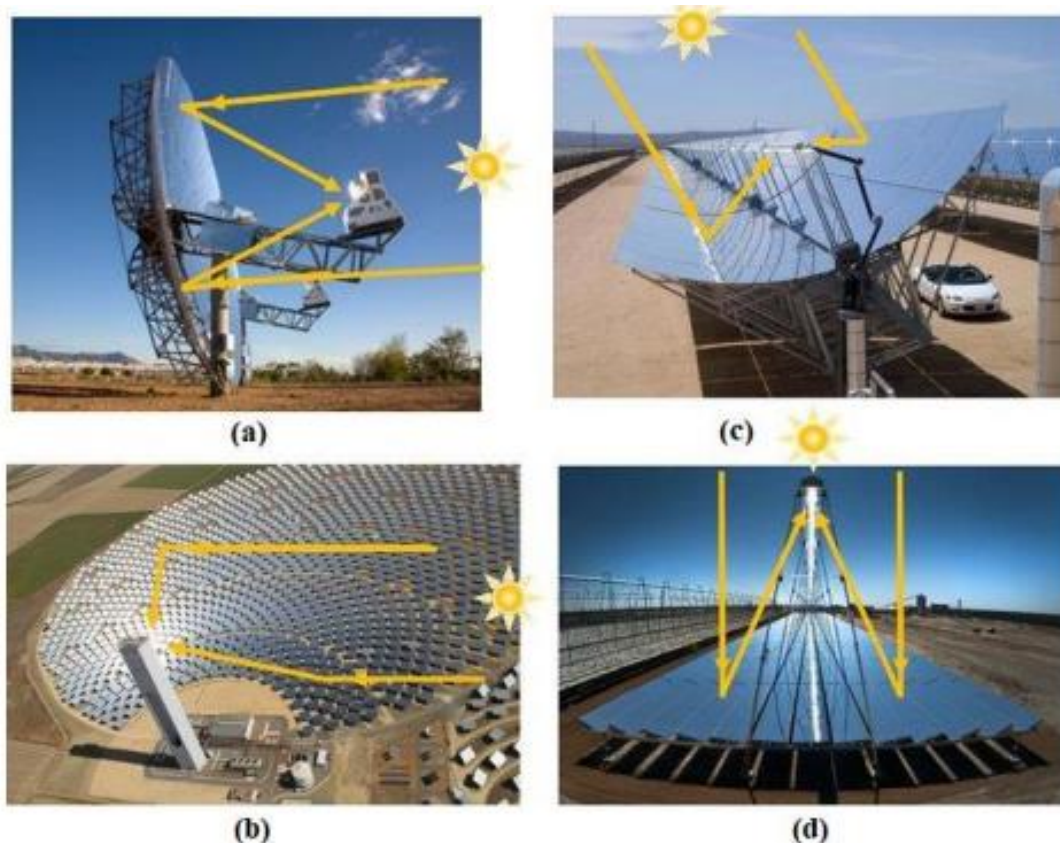
Os coletores solares são trocadores de calor que convertem a radiação solar em calor. O coletor recolhe a radiação solar, transforma-a em calor e transfere esse calor para fluidos (ar, água ou óleo em geral). As tecnologias CSP podem converter de 21 % da radiação solar em eletricidade, enquanto que os PV possuem eficiência de 20 % (Islam et al., 2017).

Os concentradores solares são uma opção muito importante no uso da energia solar e direcionam o máximo de luz solar possível para um receptor que coleta e transfere a energia para um fluido de transferência de calor. Este processo de captura e transferência de energia deve ser ininterrupto para melhor eficiência do sistema e, portanto, grandes instalações CSP podem contar com sistemas de armazenamento térmico para garantir a operação contínua à noite ou quando a radiação é menor, como em dias nublados.

As termossolares baseiam-se em quatro componentes básicos: (1) concentrador e o (2) receptor, que formam o sistema coletor, ou em inglês Solar Collector Assembly (SCA), (3) transporte-armazenamento, e (4) conversor de potência. O concentrador é composto por espelhos que seguem o movimento do sol e direcionam a radiação solar para o receptor, onde convertem a energia solar em térmica. Neste receptor, um fluido de transferência de calor - HTF (Heat Transfer Fluid) é responsável pela troca de calor com o receptor e concede-lo para o foco quente de um ciclo de potência. (KALOGIROU, 2009).

Existem 4 tipos principais de CSP (Figura 8), sendo eles: a Calha Parabólica (CP), Torre Solar (TS), Disco Solar (DS) e Refletor Fresnel (RF).

Figura 8 – Tecnologias CSP: (a) Disco parabólico; (b) Torre central; (c) Calha parabólica; (d) Concentrador linear Fresnel.

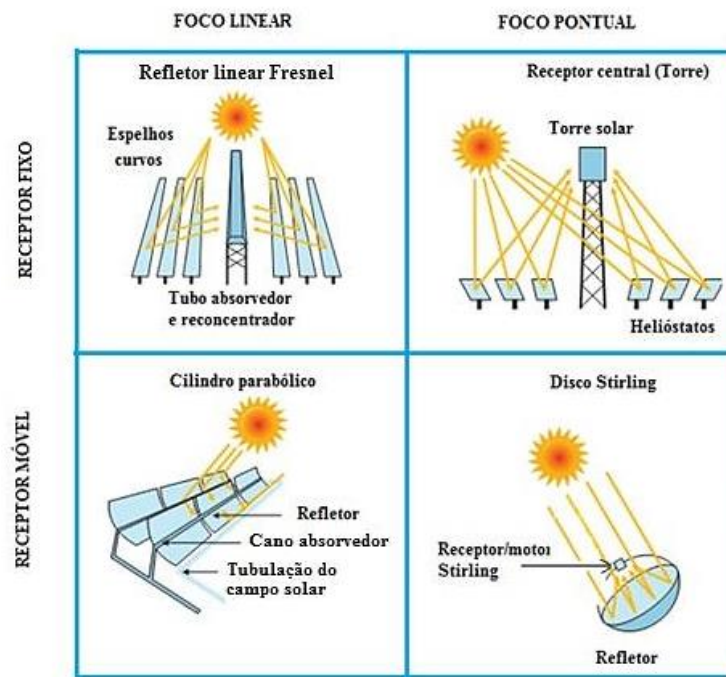


Fonte: Eusébio, 2017

Entretanto, existem diferenças em relação ao tipo de rastreamento solar e ao tipo de receptor (Figura 9). No caso das tecnologias Calha Parabólica (CP) e

Refletor Fresnel (RF), eles concentram os raios do sol em uma linha focal, atingindo uma temperatura operacional de 300-550°C e normalmente rastreiam a luz solar em um eixo. Enquanto, as tecnologias Disco Solar (DS) e Torre Solar (TS) direcionam a luz do sol para um único foco, alcançando temperaturas mais elevadas e com rastreamento solar em dois eixos.

Figura 9 – Rastreamento solar dos CSP.



Fonte: IEA, 2010

. Na maioria dos projetos mundiais, os concentradores lineares, que são compostos por um concentrador e absorvedor linear são os mais utilizados, podendo ser divididos em concentrador parabólico (PTC) e refletor linear Fresnel (LFR).

As vantagens do PTC consistem em uma tecnologia mais estudada, possui uma alta eficiência, seu concentrado é contínuo e por isso as cargas de ventos são ótimas para o PTC. Enquanto o LFR é uma engenharia ainda em evolução, o sistema de rastreamento é mais simples porque os espelhos primários são girados próximos ao solo e não há grandes movimentos de todo o sistema, além de possuírem a vantagem de baixo custo de investimento e fácil instalação. Todos são comercializados com sistemas acoplados a motores solares Stirling.

2.5.3 CONCENTRADORES LINEARES

As tecnologias LFR e PTC são de concentração linear. Gharbi et al. (2011) listam algumas vantagens do uso de concentradores lineares sobre os pontuais: os lineares têm sistema de rastreamento solar mais simples, que precisam apenas de um eixo para rastrear o sol; os coletores são alinhados na direção Norte-Sul e seguem o sol na direção Leste-Oeste (SOUZA, 2022).

A comparação entre as duas é relacionada a energia gerada e do custo de implantação. As semelhanças desses coletores são baseadas na linearidade característica de seus concentradores. Seus absorvedores são lineares e, em muitos casos, os absorvedores do PTC (tubos evacuados) podem ser usados em configurações de LFR. O fator de concentração de ambas as tecnologias está na faixa de 10 a 50 e, geralmente, a temperatura de operação pode alcançar de 400 a 500 °C (Bellos, 2019). Os fluidos de trabalho são semelhantes e eles podem ser água/vapor, óleos térmicos e sais fundidos.

A tecnologia mais madura e mais empregada pelo mundo é a calha parabólica (PTC), em 2016 uma estimativa feita foi 4,16 GW em operação no mundo (Qader e Stückrad, 2016). Enquanto, a estimativa mundial da tecnologia LFR é apenas de 0,2 GW (Qader e Stückrad, 2016), no entanto, ele apresenta algumas vantagens práticas em relação ao PTC pois:

1. O primário LFR é segmentado, enquanto o PTC é contínuo. Desta forma, as cargas de vento são menores no LFR (MONTES et al., 2017; MORIN et al., 2015);
2. O sistema de rastreamento do LFR é mais simples pois os espelhos primários rotacionam à mesma altura, com mesma velocidade, não havendo grandes movimentos do sistema (OLIVEIRA, 2015);
3. O absorvedor PTC se move durante sua operação enquanto o LFR permanece estático, simplificando as conexões e reduzindo o risco de vazamento de fluido térmico;

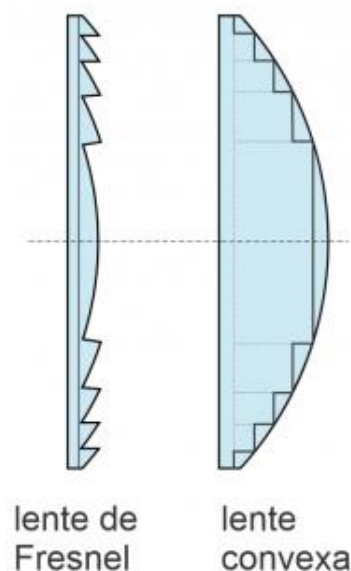
Segundo Souza (2022) as desvantagens do LFR são: (a) introdução de sombreamento e perdas por bloqueio entre os espelhos primários, (b) perda de parte da irradiação solar incidente que não atinge nenhum espelho primário e é

perdida para o solo diretamente (NIXON et al., 2013; HONGN et al., 2015), (c) necessidade de um espelho secundário para aumentar a eficiência óptica que incorre em maiores perdas por absorção devido à segunda reflexão e (d) perda de grande quantidade dos raios refletidos que não atingem o absorvedor diretamente ou não entram na abertura do secundário (dispersão).

2.6 COLETOR SOLAR LINEAR FRESNEL

O concentrador solar Fresnel Linear recebeu esse nome em função da lente de Fresnel, desenvolvida para o uso em faróis costeiros, substituindo as lentes tradicionais utilizadas na época, o inventor foi o físico francês Augustin-Jean Fresnel, no século XVIII. A característica das lentes de Fresnel (Figura 10) é o recorte da superfície contínua de uma lente padrão em um conjunto de superfícies descontínuas entre elas, de modo que a espessura da lente seja reduzida e por consequência, seu peso e volume.

Figura 10 – Comparação de lentes



Fonte: Wikipedia (2022)

Aberração esférica é um fenômeno da óptica geométrica em que os raios de luz incidentes próximos à borda das lentes são muito mais refratados do que os

raios que incidem próximos ao eixo óptico e os raios de luz incidentes próximo das bordas dos espelhos são refletidos além do foco, isso ocorre nas lentes esféricas comuns, mas na Lente Fresnel é projetada de forma a eliminar tais aberrações, de forma que todos os raios que cruzam sua superfície passam pelo mesmo ponto.

As lentes Fresnel Linear possuem efeito bastante semelhante ao das calhas parabólicas, contudo, possuem um preço mais reduzido, devido ao menor volume e peso dos elementos de reflexão, tornando uma tecnologia bastante atrativa para determinadas aplicações.

O primeiro protótipo que hoje é chamado de Lentes Fresnel foi criado em 1964, Giovanni Francia levou o princípio geral das lentes para refletores, sendo testado na estação solar em Marseille, com suporte do governo francês e da Cooperação Mediterrânea de Energia Solar (Figura 11).

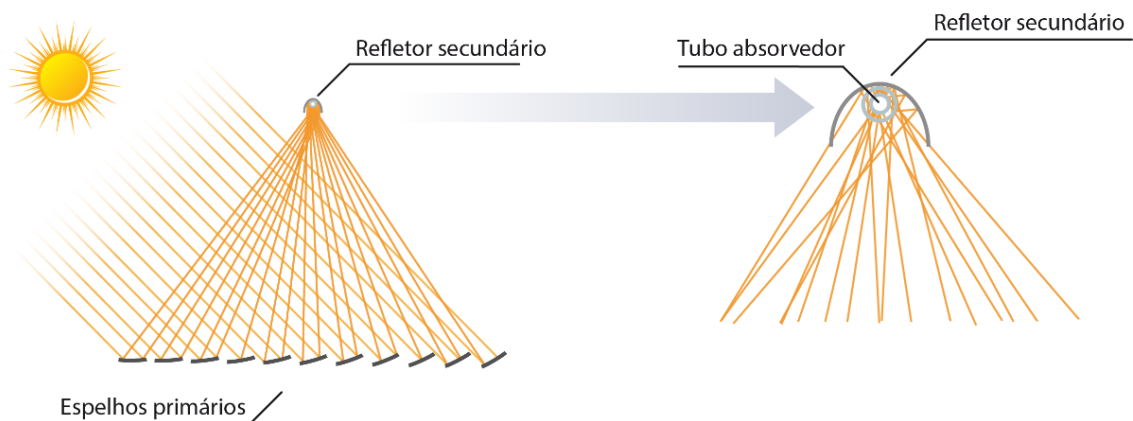
Figura 11 – Primeiro protótipo de coletor linear Fresnel



Fonte: Unisinos (2017)

Os concentradores solares atuais da linha Fresnel foram projetados para focalizar o máximo de luz solar possível nos refletores primários de forma que eles reflitam a luz em uma linha focal onde um tubo absorvedor (receptor) é colocado, que é permeado por algum tipo de fluido, e ainda temos um refletor secundário que reduz as perdas ópticas e reflete os raios solares que não atingiram o tubo absorvedor. O sistema também pode ter um rastreador solar para rastrear o sol conforme ele se move no céu, aumentando a eficiência óptica em comparação com o sistema sem rastreamento. A Figura 12 demonstra configuração do LFR.

Figura 12 – Esquema de concentrador solar Fresnel Linear



Fonte: Industrial Solar GmbH (2023)

2.7 COMPONENTES DOS CONCENTRADORES LINEARES FRESNEL

2.7.1 REFLETOR PRIMÁRIO

A entrada de energia solar no sistema ocorre através dos refletores primários (Figura 13) que consistem em espelhos de vidro plano ou levemente curvos recozido com tratamento de superfície para obter as propriedades altamente reflexivas.

Figura 13 – Esquema de concentrador solar Fresnel Linear



Fonte: AREVA (2015)

Esses espelhos utilizados atualmente para o Concentrador Linear Fresnel são baratos e sustentáveis. A vantagem é que os espelhos são colocados perto do solo diminuindo o efeito do vento e granizo, evitando desgaste e ajudando na rentabilidade do projeto.

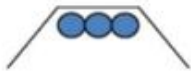
2.7.2 CONCENTRADOR SECUNDÁRIO

A função de aumentar o fator de interceptação longitudinal e transversal dos raios solares, consequentemente, aumentar as taxas de concentração é a atribuição dos refletores secundários. Tal arranjo é necessário devido ao movimento transversal do sol em relação à localização dos refletores primários, o que impossibilita o direcionamento de todos os raios incidentes ao longo do dia, para o tubo absorvedor.

No tubo absorvedor incidem os raios refletidos e é por onde escoar o fluido de trabalho. O concentrador secundário pode apresentar diversas geometrias (Figura 14), sendo assim, os formatos mais utilizados são o trapezoidal e o calha cilindro parabólica (CPC). No conjunto concentrador-absorvedor se observam

os principais fenômenos térmicos envolvidos no processo de conversão da radiação solar em energia térmica.

Figura 14 – Geometrias para o concentrador secundário

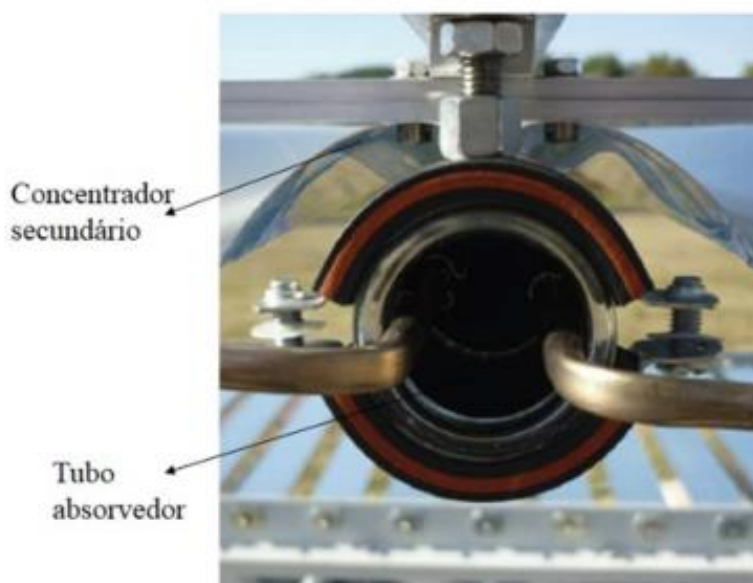
Geometria	Descrição
	Trapézio
	CPC
	Tipo M
	Tipo Pico

Fonte: Walker (2013)

2.7.3 TUBO ABSORVEDOR

O tubo absorvedor (Figura 15) se encontra posicionado na linha focal do concentrador Fresnel Linear, sendo, portanto, a irradiação solar direta normal é concentrada no tubo absorvedor evacuado posicionado no foco do sistema óptico por onde passa óleo térmico, água/vapor, ar ou sais fundidos. Estes tubos são fabricados com materiais com alta absortividade e baixa emissividade, de modo a aumentar a eficiência térmica do sistema.

Figura 15 – Representação do turbo absorvedor de um sistema LFR



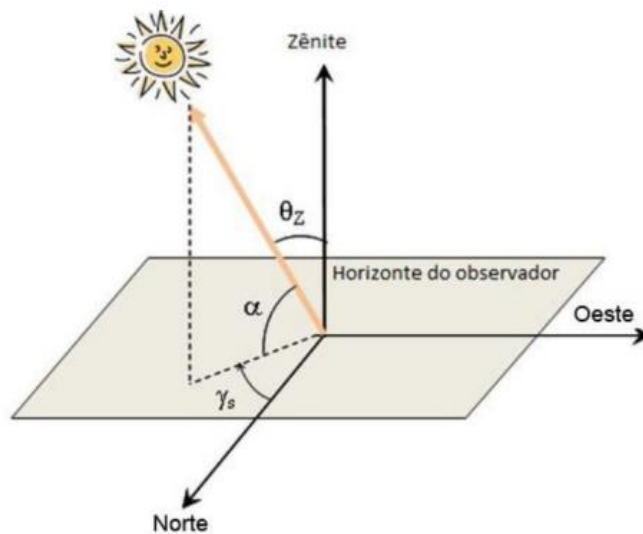
Fonte: Adaptado de Delatorre et al. (2014)

2.7.4 ASPECTOS PRÁTICOS E PERDAS ÓPTICAS

Os rastreadores solares fazem parte de um conjunto de motores utilizados para movimentar os refletores primários de acordo com a posição do Sol, feito em um único eixo para maximizar a exposição de espelhos à luz solar e concentrar a radiação solar no tubo absorvedor. Sabendo disso, a posição solar em relação ao concentrador varia constantemente de acordo com os ângulos de elevação (α) e azimute solar (γ_s) como pode-se analisar na Figura 16.

Existem três tipos principais de rastreadores solares de eixo único: o rastreador de eixo horizontal, no qual o eixo de rastreamento permanece paralelo à superfície da Terra e é sempre orientado na direção Leste-Oeste ou Norte-Sul; o rastreador de eixo vertical, no qual o eixo de rastreamento é colinear com o eixo zenital; e o rastreador de eixo inclinado, no qual o eixo de rastreamento é inclinado em relação ao horizonte por um ângulo orientado na direção Norte-Sul.

Figura 16 – Exemplificação dos ângulos de elevação e azimute



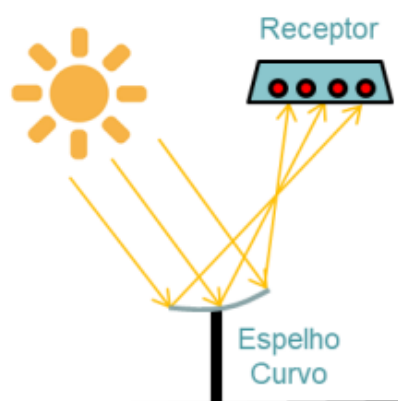
Fonte: Cavalcante, 2016

Alguns aspectos influenciam de modo direto a eficiência e custo da implantação da tecnologia, e são discutidos nas próximas seções.

- **Curvatura dos espelhos**

Quanto à curvatura dos espelhos, existem os espelhos planos ou ligeiramente curvos (Figura 17). Os planos são baratos e de fabricação fácil, mas a potência óptica é reduzida pelo fenômeno nomeado do inglês como *spillage*. A solução para este problema é aumentar a largura do refletor primário, porém há uma redução na captação solar no refletor secundário. Outra saída é reduzir a altura do tubo absorvedor em relação ao campo do espelho, o que causa um aumento no sombreamento e bloqueio de raios. Portanto, as duas soluções possuem desvantagens, o que torna mais viável o investimento em espelhos curvos, que são mais complexos e caros que o plano, mas sem perda de eficiência.

Figura 17 – Espelho curvo

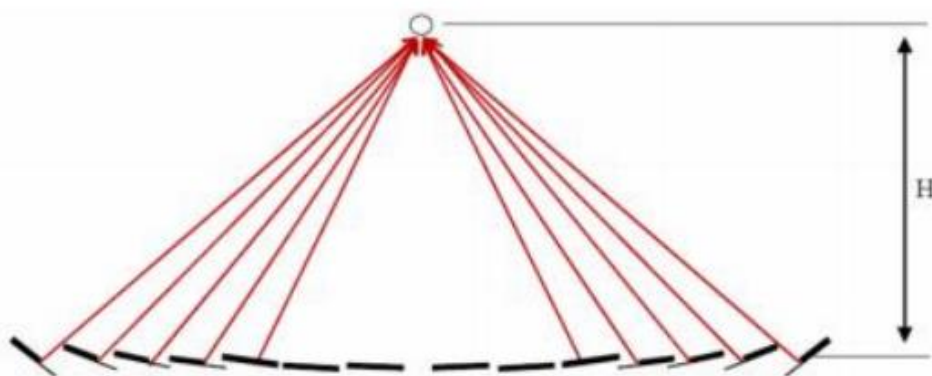


Fonte: Unisinos (2017)

- **Altura do tubo absorvedor**

É necessário encontrar uma altura ótima que vise reduzir perdas ópticas, considerando que quanto maior a distância, menores as perdas por sombreamento e bloqueio, no entanto, há uma menor contribuição dos espelhos mais afastados (Figura 18). Quando a distância dos espelhos para o receptor for menor, haverá maior a participação dos espelhos mais externos e maiores as perdas por sombreamento e bloqueio.

Figura 18 – Altura do receptor



Fonte: Unisinos (2017)

- **Distância entre espelhos**

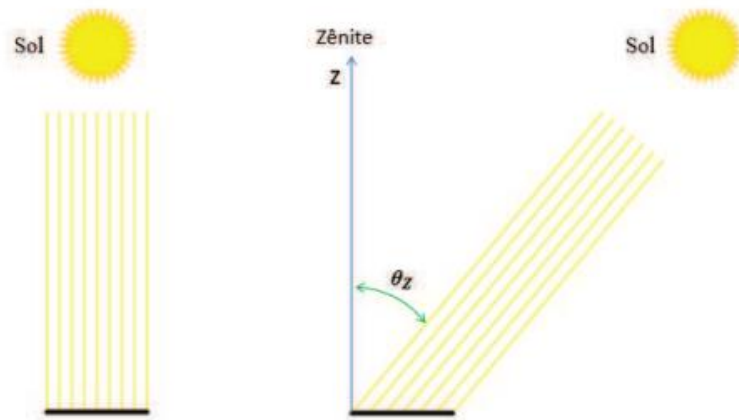
Já em relação a folga entre os espelhos, podemos fazer uma análise semelhante à da altura, quanto maior a folga para um mesmo número de espelhos, maior a largura total do refletor primário e menores as perdas para o sombreamento e bloqueio, e vice e versa.

Em relação às perdas óticas, algumas são discutidas nas próximas seções.

- **Efeito Cosseno**

Quando a superfície reflexiva for perpendicular à direção da radiação solar, a irradiância refletida será máxima. No entanto, se a superfície não estiver perpendicular à direção da radiação solar, a irradiância será reduzida pelo cosseno do ângulo entre a normal da superfície e a direção da radiação solar (Figura 19).

Figura 19 – Geometrias para o concentrador secundário

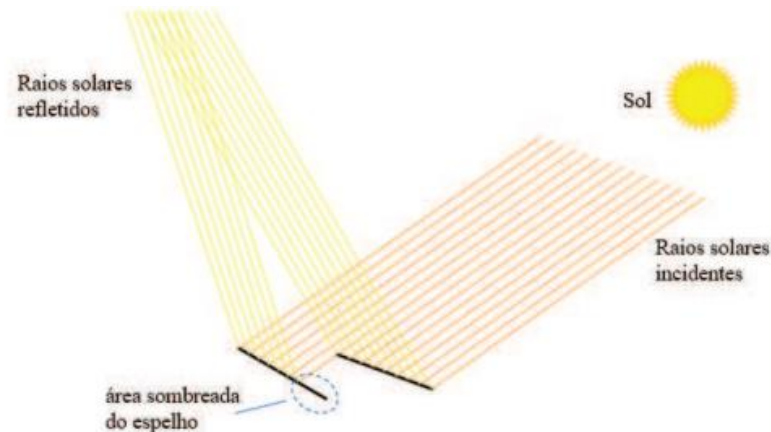


Fonte: Weber (2019)

- **Perdas por sombreamento e bloqueio**

Devido a criação de sombra por espelhos adjacentes, ocorre a perda de energia solar incidente, pois parte da luz não atinge os espelhos. Na figura 20, partes de um espelho ficam escondidas atrás de outro espelho, originando as perdas por sombreamento.

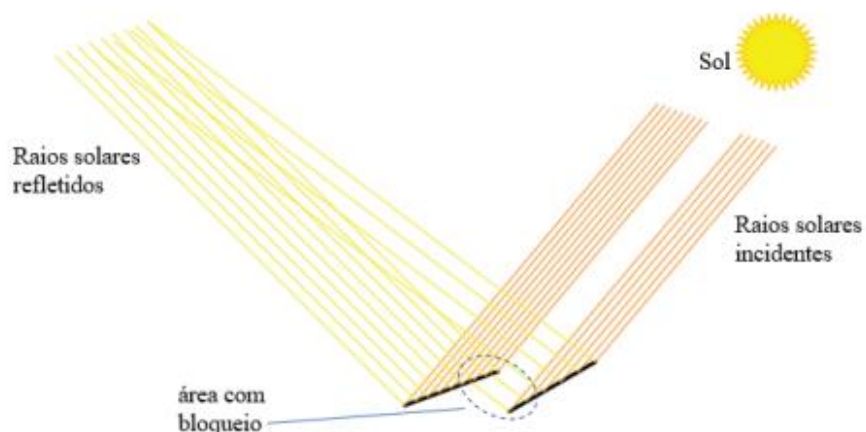
Figura 20 – Perdas por sombreamento entre espelhos adjacentes



Fonte: Weber (2019)

O bloqueio pode ocorrer quando os raios solares são refletidos na parte inferior do espelho adjacente, causando a perda por bloqueio (Figura 21).

Figura 21 – Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes

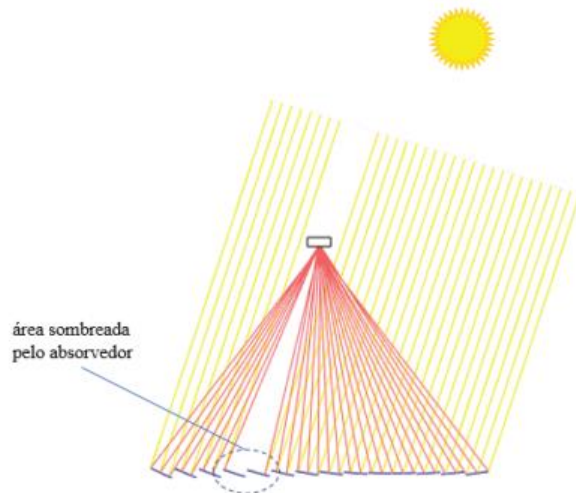


Fonte: Weber (2019)

- **Perdas por sombreamento de absorvedor**

O sombreamento causado pelo absorvedor sobre os campos de espelho causa grande perdas de potencial para os LFR. A superfície superior do absorvedor é normalmente composta por isolante térmico, para evitar a perda de calor, tornando a radiação incidente nesta área inútil.

Figura 22 – Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes



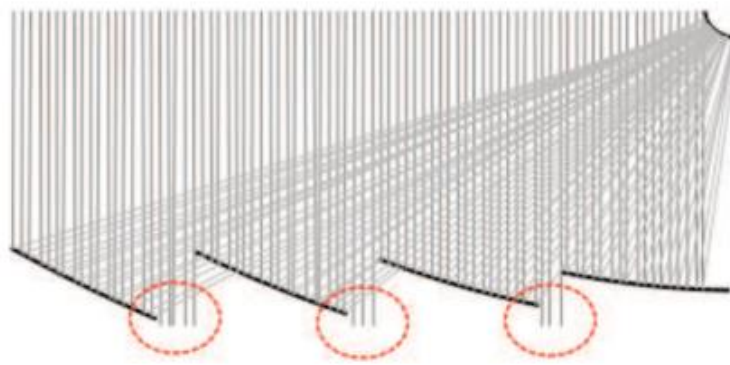
Fonte: Weber (2019)

- **Perdas entre espelhos**

Devido a movimentação dos espelhos, a área projetada dos espelhos, perpendicular à direção da radiação, sofre uma redução, possibilitando que parte da radiação passe por entre os espelhos, não sendo refletida para o absorvedor.

Este efeito é ampliado pelo espaçamento entre espelhos, que é necessário para que não ocorram interferências entre eles durante o movimento de giro dos espelhos. A Figura 23 demonstra a representação de perdas entre os espelhos.

Figura 23 – Perdas por bloqueio entre espelhos adjacentes



Fonte: MERTINS (2009)

2.8 CONCENTRADOR SOLAR APLANÁTICO

O concentrador solar aplanático é um tipo de tecnologia de concentração solar que utiliza lentes aplanáticas para concentrar a luz solar em um ponto focal. Ao contrário de outros tipos de concentradores solares, como os concentradores parabólicos, os concentradores aplanáticos não possuem uma forma curva e não sofrem de aberração esférica.

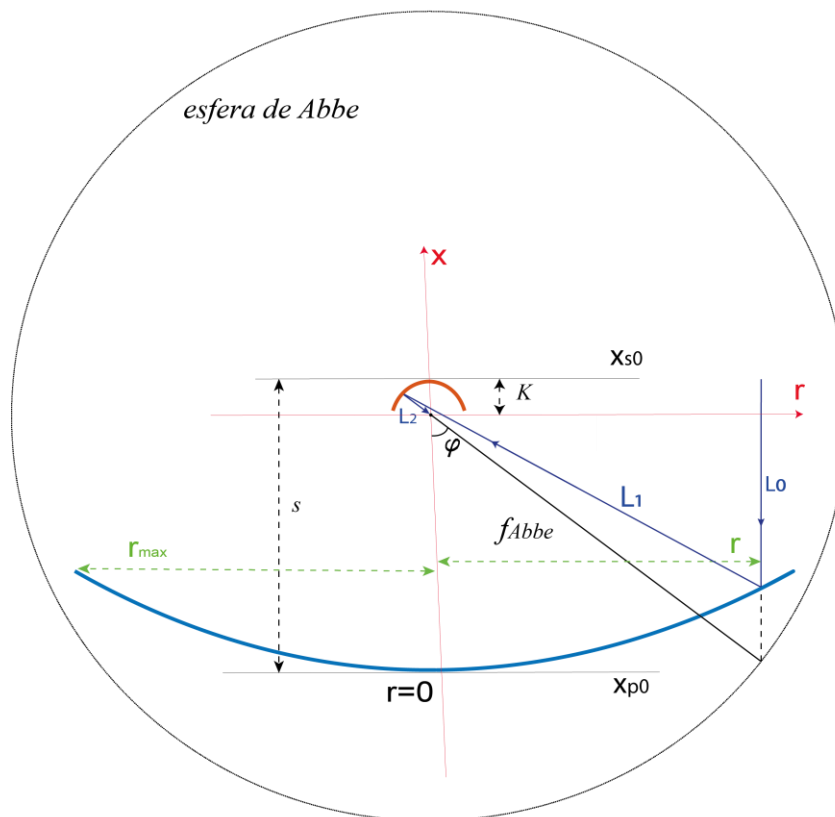
Esses concentradores podem ser divididos em duas categorias: concentradores aplanáticos de lente simples e concentradores aplanáticos compostos. O concentrador aplanático de lente simples é composto por uma única lente aplanática, enquanto o concentrador aplanático composto é formado por um sistema de lentes aplanáticas que trabalham em conjunto para concentrar a luz solar.

O concentrador aplanático é frequentemente utilizado em aplicações de energia solar, como em sistemas de aquecimento solar de água, geradores termossolares e sistemas de energia solar concentrada. A principal vantagem do concentrador aplanático em relação a outros tipos de concentradores solares é a sua capacidade de gerar altas temperaturas em um ponto focal com alta eficiência óptica, o que pode resultar em um melhor desempenho em aplicações que exigem altas temperaturas.

A metodologia utilizada e os resultados obtidos a partir da substituição do primário do concentrador aplanático de foco linear discutido por GOMES et al. (2019) por espelhos segmentados, caracterizando o Concentrador Linear Fresnel Aplanático (CLFA). Dois cenários de projeto foram considerados: (a) espelhos acompanhando a geometria primária, e (b) nivelados à mesma altura, próximo ao solo. Deduziu-se, ainda, uma solução analítica para cálculo de curvaturas cilíndricas dos espelhos primários, o que possibilita a redução do número de espelhos, mantendo alto fator de interceptação. O desempenho do CLFA em termos das componentes transversal e longitudinal do fator de interceptação também é apresentado.

A solução analítica das equações que definem o aplanático baseia-se na definição dos parâmetros s e K (Figura 24), que relacionam a posição dos vértices do primário e secundário. O parâmetro s tem valor adimensional e determina a distância que separa os vértices dos dois espelhos.

Figura 24 – Geometria aplanática dos parâmetros s e K



Fonte: Souza, 2022

Considerando $f_{\text{Abbe}} = 1$, seu valor é obtido através das ordenadas dos vértices do secundário (X_{s0}) e do primário (X_{p0}), fazendo:

$$S = \frac{X_{p0} - X_{s0}}{f_{\text{Abbe}}} \quad (2)$$

De modo semelhante, o parâmetro K também é adimensional, sendo a distância entre o foco do sistema e o vértice do secundário:

$$K = \frac{-X_{s0}}{f_{\text{Abbe}}} \quad (3)$$

Os valores de s e K podem ser variados de forma a obter aplanáticos com diferentes formatos para a dupla de espelhos. Estes valores, então, influenciam diretamente no desempenho do aplanático como concentrador solar. Influenciam também na conversão do concentrador para sua versão Fresnel. Destaca-se que a variação do parâmetro K influencia na abertura do secundário, podendo reduzir ou aumentar as perdas por sombreamento do concentrador secundário. A variação de s define a distância entre os vértices do primário e secundário, e também é proporcional à profundidade do primário. Primários com menor profundidade favorecem a conversão para a versão Fresnel do sistema, pois resultam em menores perdas para o solo (SOUZA, 2022).

2.9 TECNOLOGIA CSP NO BRASIL

A diversidade de biomas espalhados pelo território brasileiro, aliado às suas condições climáticas, fazem com que o Brasil se torne um local adequado para pesquisas e desenvolvimento de projetos de usinas heliotérmicas, visto que a quantidade de radiação direta é alta, principalmente em locais com baixa umidade e que possuem climas semiáridos. De acordo com Staley et.al (2009) junto a Lodi (2011), a quantidade mínima de energia solar concentrada para produzir eletricidade em uma usina CSP comercial é de 2000 kWh/m²/ano de DNI. Sabendo disso, uma vantagem de utilização da energia heliotérmica no Brasil é o reaproveitamento de territórios inférteis ou que não exercem função econômico-social, onde as usinas podem ser instaladas gerando

desenvolvimento da região e empregos, além de diversificar as formas de geração do setor energético.

O Brasil segue as tendências mundiais e tem a maioria de seus projetos pela tecnologia de calha parabólica. A Tabela 1 lista os projetos em tecnologia de concentração solar em seus respectivos municípios brasileiros.

Tabela 1 – Projetos heli térmicos no Brasil

Região	Tecnologia	Potência de Projeto (kW)	Estágio
Belo Horizonte (MG)	Calha Parabólica	50	Concluído
Petrolina (PE)	Calha Parabólica	1 000	Em desenvolvimento
Pirassununga (SP)	Torre central	100	Em desenvolvimento
Caiçara do Rio do Vento (RN)	Torre central	100	Em desenvolvimento
Itajubá (MG)	Disco Parabólico	2	Concluído
Itajubá (MG)	Calha Parabólica	5	Concluído
Vale do Açu (RN)	Torre central	3 000	Em desenvolvimento

Fonte: (Silva, 2016; Oliveira Filho, 2014; Solinova, 2018; Projeto energia heli térmica, 2018).

2.9.1 POTENCIAL DO NORDESTE PARA TECNOLOGIA CSP

A Região Nordeste do Brasil possui uma área territorial de 1.558.196 km², correspondendo a 18% do território nacional. Segundo (KAYANO; ANDREOLI, 2009), a região costuma ser dividida em três climas principais, com precipitações anuais variando entre 300 e 2000 mm: clima litorâneo úmido, estendendo-se do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte, clima tropical, em áreas dos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí, e clima tropical semiárido, em todo o sertão nordestino.

Entre todas as regiões brasileiras, o Nordeste é o local que possui a temperatura mais alta do país, que variam de 20 a 28 °C, ou seja, o ambiente considerado perfeito para realização da captura de raios solares para a geração de energia. Tal região recebe luz solar em praticamente todos os dias do ano. Nesse sentido, potencial não é o problema na região, Costa (2015), afirma que

somente o Nordeste apresenta uma incidência tão alta que por si só colocaria o Brasil em destaque global.

O motivo para tal potencial se deve ao fato do Nordeste ser uma região próxima da linha do Equador, o que faz o local receber maior incidência solar que as demais regiões brasileiras, como podemos observar na tabela 2.

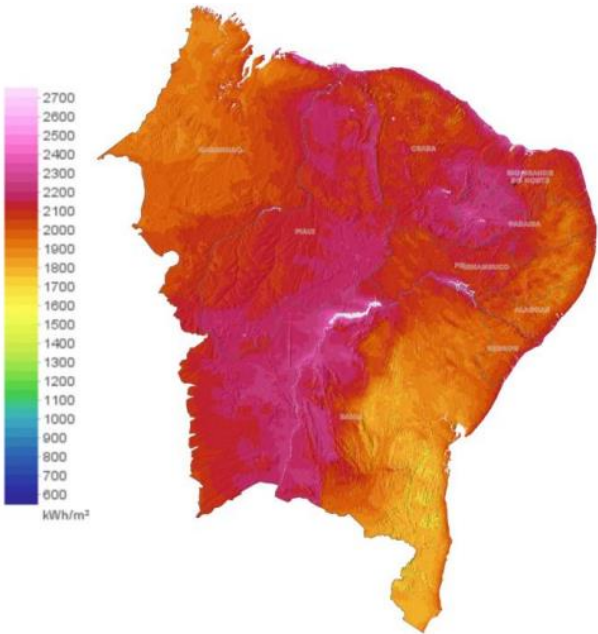
Tabela 2 – Radiação Global Média brasileira

Região	Radiação Global Média (em kWh/m²)
Nordeste	5,9
Centro-Oeste	5,7
Sudeste	5,6
Norte	5,5
Sul	5,0

Fonte: Atlas, 2018

Diante disso, considerando a irradiação como principal parâmetro para avaliação do potencial de produção de energia solar, torna-se essencial analisar as características referentes à irradiação da região Nordeste.

Figura 25 – Mapa com índice de irradiação da região Nordeste



Fonte: Global Solar Atlas, 2022

Como podemos observar na Figura 25, as áreas localizadas no Nordeste do Brasil, têm valores da irradiação solar diária, média anual comparáveis às melhores regiões do mundo. Além disso, a grande vantagem são as variações sazonais são menores para essa região, o que poderá resultar em importantes vantagens técnicas e econômicas dos sistemas solares instalados.

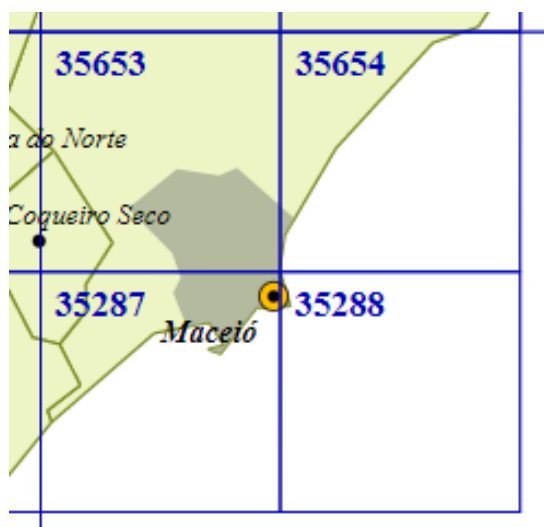
3 MATERIAS E MÉTODOS

Este capítulo apresenta um modelo matemático para estimativa da energia anual absorvida por um concentrador solar Fresnel Linear, de maneira a apresentar equações e softwares utilizados referentes a análise óptica.

3.1 DADOS DE IRRADIAÇÃO DIRETA NORMAL

A análise e o tratamento adequado dos dados são fatores primordiais para a obtenção de resultados consistentes utilizando o modelo computacional. São apresentadas a seguir as etapas de desenvolvimento deste estudo, para a obtenção de resultados de previsão. A região analisada corresponde a numeração 35653 e 35287 na Figura 26, onde o site LABren disponibiliza a latitude e longitude do local.

Figura 26 – Região analisada



Fonte: Labren, 2023

Para fazer a estimativa da energia anual coletada por concentradores solar Fresnel aplanático na cidade de Maceió em 2022, a base de dados histórica escolhida para radiação foi a da Copernicus Atmosphere Monitoring Service (CAMS Radiation Service), programa de observação da Terra por satélite e dados in situ (não espaciais). O objetivo do site é atender às necessidades de desenvolvimento de políticas públicas para que haja o planejamento, monitoramento, melhorias de eficiência e integração de sistemas de energia solar em redes de fornecimento de energia.

O COPERNICUS utiliza o Sentinel-4 que é um espectrômetro de 3 bandas (ultravioleta, visível, e próximo do infravermelho) que está incorporado nos satélites Meteosat Third Generation Sounder, ele faz uso de dados do instrumento infravermelho, do gerador flexível de imagens combinadas, e gerador de imagens de relâmpagos, todos transportados nos satélites geradores de imagens Meteosat Terceira Geração. De órbita geoestacionária, o Sentinel-4 fornece dados a cada hora sobre o ozono e a radiação solar para a previsão de UV, e contribui para a monitorização do tempo.

Com a finalidade de comparação de informação entre diferentes fontes, foram utilizados os dados obtidos através do Sistema de Organização Nacional de Dados Ambientais (rede SONDA) operado pelo Laboratório de Modelagem e Estudos de Recursos Renováveis de Energia (LABREN) pertencente ao Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CCST) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). A base de dados do Atlas Brasileiro de Energia Solar é composta por estimativas fornecidas pelo modelo computacional BRASIL-SR baseadas em 17 anos de imagens de satélite (1999 a 2015). Essas estimativas foram validadas por dados coletados em estações solarimétricas da rede SONDA, de estações privadas e de estações meteorológicas automáticas operadas pelo INMET, totalizando 503 estações de superfície com qualidade adequada para participar do processo de validação. Os testes de qualidade dos dados observados incluíram critérios para identificar valores superiores aos limites físicos e presença de variabilidade temporal, intercomparação de observações com sensores distintos e comparação com modelos numéricos de céu claro (do inglês, clear sky), para eliminar tanto quanto possível os registros suspeitos.

Para a validação de dados utilizados nesse presente trabalho do COPERNICUS do ano de 2022, foram calculados as médias de irradiação solar direta normal na região de Maceió retiradas de diferentes programas, primeiro, o LABREN entre os anos de 1999 e 2015 e em seguida a média mês a mês de irradiação solar direta informada pelo COPERNICUS dos anos de 2021 e 2022. A Tabela 3 demonstra os resultados obtidos:

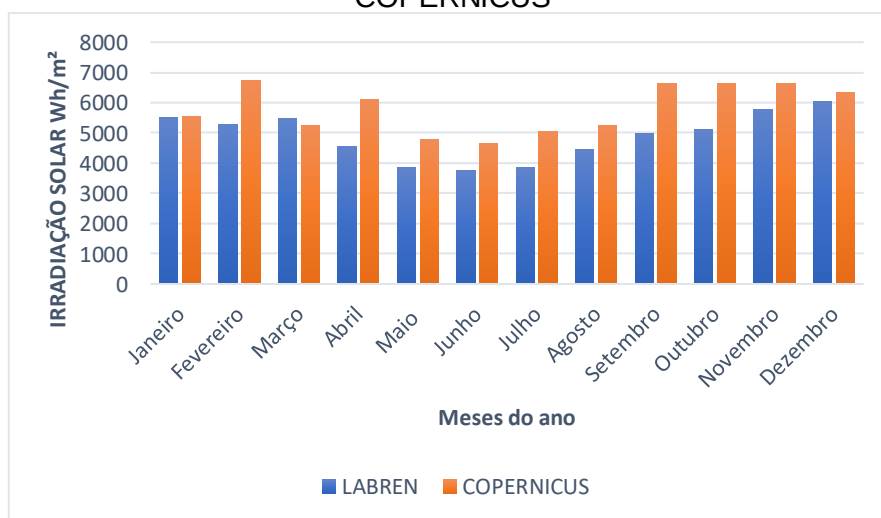
Tabela 3 – Média de irradiação solar direta da cidade de Maceió em Wh/m²

	LABREN	COPERNICUS
ANOS	(1999-2015)	(2021-2022)
Janeiro	5499	5548.06
Fevereiro	5290	6728.805
Março	5488.5	5242.68
Abril	4553	6095.5275
Maio	3850.5	4765.7675
Junho	3746	4661.7725
Julho	3865	5039.4725
Agosto	4444	5249.485
Setembro	4985.5	6643.74
Outubro	5122	6631.71
Novembro	5784.5	6641.66
Dezembro	6034.5	6342.455

Fonte: Autor (2023)

A Figura 27 demonstra um comparativo dos valores:

Figura 27: Comparação de irradiação solar em Maceió dos programas LABREN e COPERNICUS



Fonte: Autor, 2023

Foi calculado o erro médio somando todos os erros absolutos e dividindo-os pelo número de erros calculados, em percentual a diferença resultou num total de 17% de variação média. Com isso, foi possível validar os dados do COPERNICUS de radiação solar do ano de 2022.

É importante ressaltar que a validação dos dados do COPERNICUS exige uma quantidade maior de anos considerados. O ideal é fazer uma média dos valores disponíveis para todos os anos que constam no COPERNICUS. Por questões de tempo e como a validação destes dados não é o foco deste trabalho, esta é uma tarefa que fica para estudos futuros.

As informações obtidas são correspondentes aos dias 1 de janeiro de 2022 à 31 de dezembro de 2022. Os requisitos escolhidos foram condições meteorológica reais e sem nuvens, em relação ao referencial do tempo, a opção hora solar verdadeira foi a utilizada. Os dados foram coletados de hora em hora, no período de 365 dias, o que totalizou o resultado de 8760 variações de irradiação solar direta na região analisada.

3.2 CÁLCULO DOS ÂNGULO DE INTERESSE

Para a maioria das aplicações de energia solar, são necessárias previsões razoavelmente precisas acerca do local onde o sol surgirá no céu num determinado momento do dia e do ano. Segundo estudos de Ptolomeu, o Sol é limitado para mover-se com 2 graus de latitude na esfera celeste; portanto, a sua posição em relação a um observador na Terra pode ser totalmente descrita mediante dois ângulos astronômicos, altitude solar (a) e azimuth solar (z). Antes de calcular as equações de altitude solar e de ângulos de azimuth, a declinação solar e o ângulo horário precisaram ser definidos. A seguir, uma descrição de cada ângulo, em conjunto com a formulação associada.

- **ÂNGULO HORÁRIO**

O ângulo horário, h , de um ponto na superfície da Terra é definido como o ângulo através do qual a Terra giraria para trazer o meridiano ao ponto

diretamente sob o Sol. O ângulo horário ao meio-dia solar local é igual a zero, com cada 360/24 ou 15° de longitude equivalente a 1 h, os horários vespertinos foram designados como positivos. O ângulo horário em graus corresponde a:

$$h = \pm 0,25 \quad (4)$$

- **DECLINAÇÃO SOLAR**

O plano da eclíptica é o plano da órbita da Terra em torno do Sol. À medida que a Terra gira em torno do Sol, é como se o eixo polar estivesse se movendo em relação ao Sol. A declinação solar é a distância angular dos raios do Sol ao norte (ou sul) do equador – a declinação norte é designada como positiva. O eixo de rotação da Terra (eixo polar) está sempre inclinado a um ângulo de 23,45° a partir do eixo elíptico, que é normal para o plano elíptico. A declinação solar, δ , em graus para qualquer dia do ano (N) foi calculada aproximadamente pela equação:

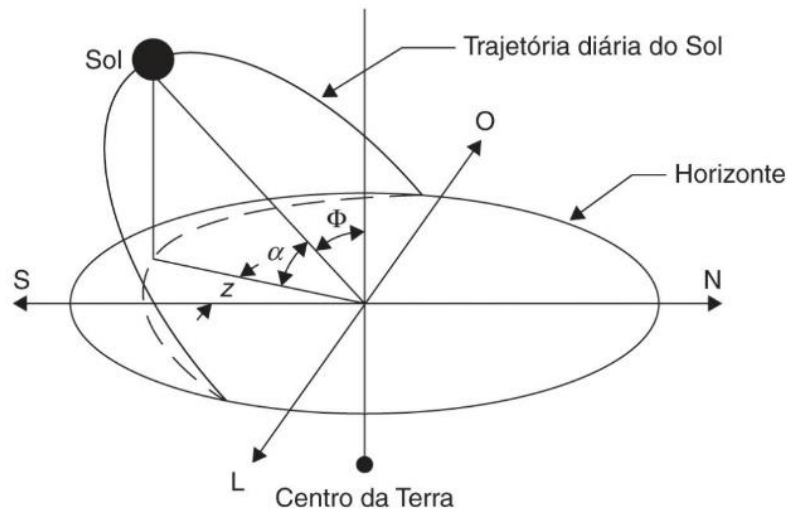
$$\delta = 23,45 \operatorname{sen} \left[\frac{360}{365} (284 + N) \right] \quad (5)$$

- **ÂNGULO DE ALTITUDE SOLAR, α**

O ângulo da altitude solar (Figura 28) é o ângulo entre os raios solares e o plano horizontal, ele está relacionado ao ângulo zenital, Φ , que é o ângulo entre os raios solares e a vertical. Portanto,

$$\Phi = \alpha = \pi/2 = 90^\circ \quad (6)$$

Figura 28 – Ângulo de altitude solar



Fonte: Soteris, 2016

A expressão matemática para o ângulo da altitude solar utilizada foi:

$$\text{sen}(\alpha) = \cos(\Phi) - \text{sen}(L) \text{sen}(\delta) + \cos(L) \cos(\delta) \cos(h) \quad (7)$$

- **ÂNGULO DE AZIMUTE SOLAR**

O ângulo solar azimutal, z , é o ângulo dos raios do sol, medido no plano horizontal a partir do sul (sul verdadeiro) para o Hemisfério Norte ou do norte para o Hemisfério Sul; já o oeste se designa como positivo. A expressão matemática para o ângulo de azimute solar foi:

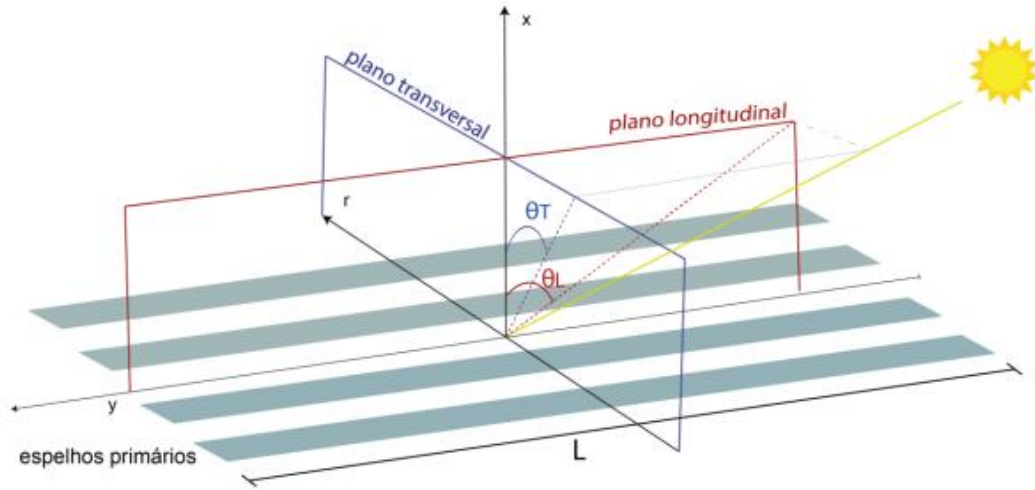
$$\text{Sen}(z) = \frac{\cos(\delta) \cos(h)}{\cos(\alpha)} \quad (8)$$

- **ÂNGULO DE INCIDÊNCIA**

O ângulo de incidência, θ , é o ângulo entre o feixe de luz que incide sobre a abertura e a normal, e pode ser decomposto em dois ângulos: transversal (θ_t)

e longitudinal (θ_l) (McIntire, 1982), que definem a orientação dos raios incidentes na abertura do concentrador, como mostrado na Figura 29.

Figura 29 - Projeção transversal e longitudinal do ângulo de incidência.



Fonte: Souza, 2022

A eficiência óptica varia com a posição do sol e pode ser calculada em função das componentes do ângulo de incidência (McIntire, 1982; Zhu, 2013):

$$\eta_{opt}(\theta_t, \theta_l) = \rho \tau \alpha \gamma(\theta_t, \theta_l) \quad (9)$$

na qual, ρ é a refletividade dos espelhos primários e secundários, τ é a transmissividade da envoltória de vidro do tubo absorvedor, α é a absortividade do revestimento seletivo do tubo absorvedor e γ é o fator de interceptação total.

3.3 CONCENTRAÇÃO GEOMÉTRICA

Após o cálculo de todos os ângulos necessários com a ajuda do Microsoft Excel para a estimativa da concentração geométrica. Todos os cálculos a seguir foram realizados pelo SolTrace, que é uma ferramenta de software desenvolvida no Laboratório Nacional de Energia Renovável (NREL) para modelar sistemas de energia solar concentrada (CSP) e analisar seu desempenho óptico. O usuário seleciona um determinado número de raios a serem rastreados. Cada raio é rastreado através do sistema enquanto encontra várias interações ópticas. Algumas dessas interações são de natureza probabilística (por exemplo,

seleção do ângulo do sol a partir da distribuição da intensidade angular do sol), enquanto outras são determinísticas (por exemplo, cálculo da interseção do raio com uma superfície descrita analiticamente e redirecionamento resultante). Por replicar interações reais de fótons, o código pode fornecer resultados precisos para sistemas complexos que não podem ser modelados de outra forma. A precisão aumenta com o número de raios rastreados, mas números maiores de raios significam mais tempo de processamento.

Concentrar a quantidade máxima de irradiância direta normal em um foco geométrico é o objetivo de todas as tecnologias CSP. Dessa forma, a concentração geométrica é um importante métrica para avaliação dos CPS e é calculado através da equação:

$$C = \frac{A_{ab}}{A_{abs}} \quad (10)$$

Onde, A_{abs} representa a área do absorvedor e A_{ab} a área total de abertura do concentrador.

A eficiência de coletores concentradores pode ser definida como a razão entre a energia absorvida pelo absorvedor (Q) e a irradiância direta normal (do inglês, *direct normal irradiance* - DNI), em W/m^2 , instantânea multiplicada pela área de abertura do concentrador (A), em m^2 (Rabl, 1985):

$$\eta_{opt} = \frac{Q}{A \cdot DNI} \quad (11)$$

A eficiência óptica também pode ser escrita em termos das propriedades ópticas e geométricas do concentrador:

$$\eta_{opt} = \rho \tau \alpha \gamma \quad (12)$$

A energia absorvida pode ser obtida através da equação:

$$Q = \rho \tau \alpha \cdot \gamma(\theta_t, \theta_l) \cdot A \cdot DNI \quad (13)$$

O fator de interceptação tem as componentes transversal, $\gamma_t(\theta_t, 0)$ e longitudinal, $\gamma_l = \gamma(0, \theta_l)$.

Para cada ângulo de incidência nos planos transversal e longitudinal há um γ_1 referente a reflexão simples e um γ_2 referente a reflexão dupla, sendo o fator de interceptação total $\gamma = \gamma_1 + \gamma_2$ (Gomes *et al.*, 2019).

Foi preciso considerar um valor de ρ que represente as perdas devido a refletividade não ideal do material para a reflexão simples e dupla. Desta forma, define-se um ρ ponderado transversal, em função do fator de interceptação transversal, γ_t :

$$\rho_{pt} = \frac{\gamma_{1t}\rho + \gamma_{2t}\rho^2}{\gamma_t} \quad (14)$$

Na qual γ_{1t} é o fator de interceptação transversal para reflexão simples e γ_{2t} para dupla reflexão e $\gamma_t = \gamma_{1t} + \gamma_{2t}$.

E um ρ ponderado longitudinal em função do fator de interceptação transversal, γ_l :

$$\rho_{pl} = \frac{\gamma_{1l}\rho + \gamma_{2l}\rho^2}{\gamma_l} \quad (15)$$

Na qual γ_{1l} é o fator de interceptação longitudinal para reflexão simples e γ_{2l} para dupla reflexão e $\gamma_l = \gamma_{1l} + \gamma_{2l}$.

A eficiência óptica pode ser obtida da aproximação:

$$\eta_o \approx \tau\alpha\gamma_t\gamma_l \frac{(\gamma_t\rho_{pt} + \gamma_l\rho_{pl})}{\gamma_t + \gamma_l} \quad (16)$$

E a energia total absorvida por m² durante um ano será (Santos *et al.*, 2021):

$$E_{ano} = \tau\alpha \sum_{h=1}^{8760} \frac{(\gamma_t\rho_{pt} + \gamma_l\rho_{pl})}{\gamma_t + \gamma_l} \gamma_t \gamma_l DNI \quad (17)$$

3.4 CONCENTRADORES LINEAR FRESNEL APLANÁTICO CONSIDERADOS

Os refletores aplanático linear Fresnel utilizados para o cálculo da estimativa foram baseados no artigo de Souza et. (2022), nos quais os valores de distância entre o vértice do espelho secundário e o foco do sistema (K), distância entre os vértices do espelho primário e secundário (s) foram variados. A concentração geométrica (C) variou de 35-50 em (Souza et., 2022), exercendo os valores de calhas parabólicas convencionais comercializadas.

A Figura 30 demonstra o fator de interceptação máximo em função da variação da projeção transversal do CLFA {-1; -0,1}, com $C = 50$.

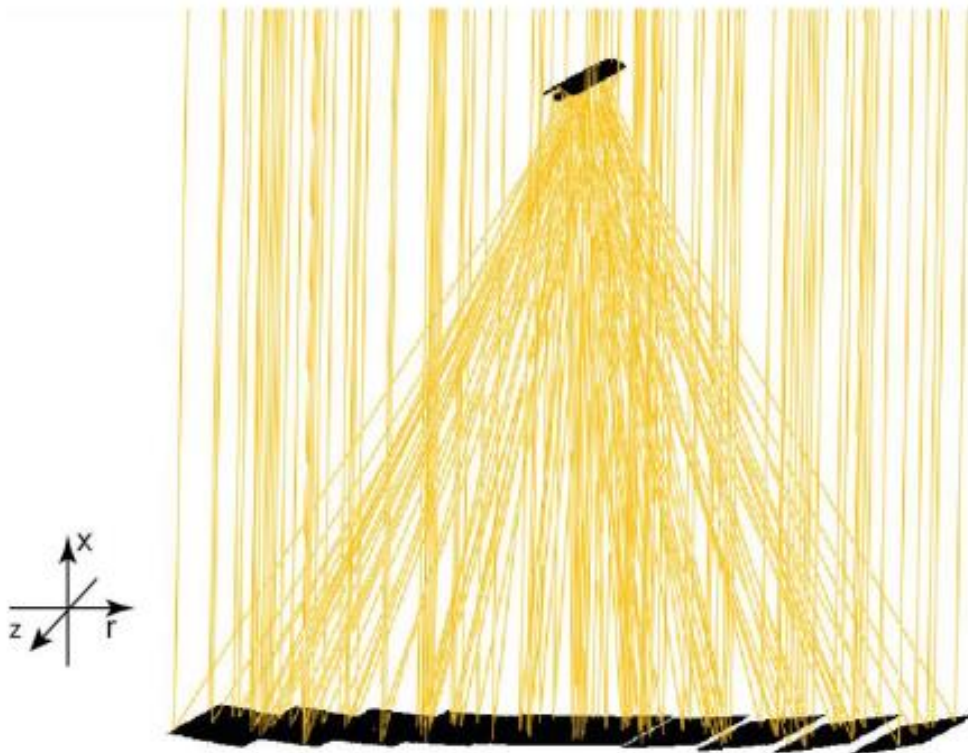
Figura 30 – CFLA com parâmetros {-1; -0,1} e $C = 50$



Fonte: Souza, 2022

A Figura 31 demonstra os absorvedores comerciais convencionais de 35 mm, e usando o fator de multiplicação definido para o concentrador em (Souza et.,2022), o CLFA {-2,2; -0,03}.

Figura 31 – CFLA com parâmetros $\{-2,25; -0,03\}$ e $C = 35$.



Fonte: Souza, 2022

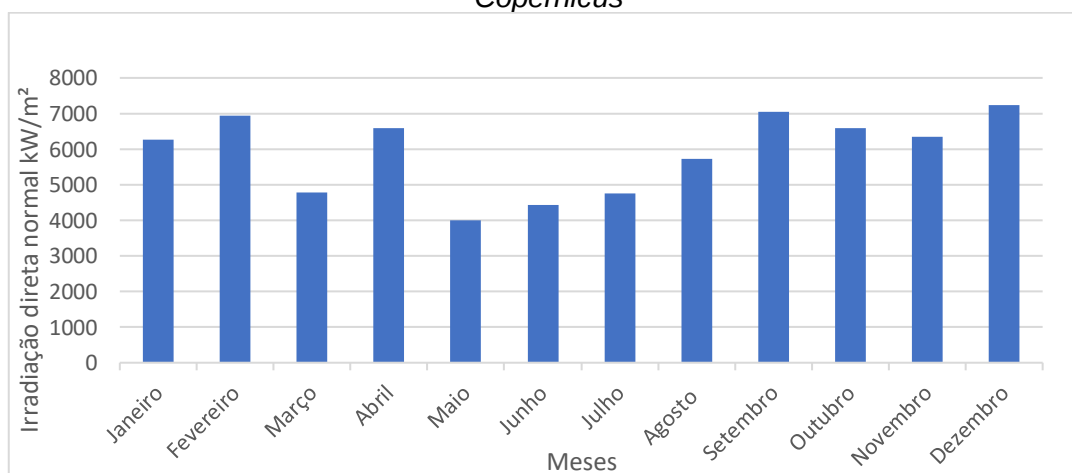
Os projetos de CLFA de desempenho superior nas duas concentrações definidas foram escolhidos, inicialmente, com base em testes para $\gamma (0,0)$, que norteiam a identificação inicial das melhores configurações. Depois, γ foi avaliado analiticamente - e validado por traçado de raios - de modo mais completo através da dependência angular dos ângulos de incidência projetados (SOUZA, 2022).

Todos os cálculos e simulações foram feitas utilizando o software SOLTRACE, utilizando distribuição probabilística total de erros ópticos Gaussiana, com semiabertura angular do cone de radiação de $\theta_s = 9$ mrad, onde os espelhos primários estão à mesma altura, próximo ao nível do solo, possuindo curvaturas cilíndricas dos espelhos primários calculadas nos trabalhos anteriormente referenciados.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Pode-se observar que Maceió é uma área que possui um enorme potencial solar, sendo aproximadamente 6000 Wh/m² dia de irradiação direta normal. A Figura 32 demonstra a média diária mensal estimada pelo COPERNICUS do ano de 2022 da irradiação solar direta, tendo destaque nos meses fevereiro, setembro e dezembro.

Figura 32 – Irradiação direta normal média mensal em Maceió no ano de 2022 pelo Copernicus



Fonte: Autor, 2023

Com os cálculos da declinação solar, foi plausível saber ao longo do ano a distância angular dos raios do sol ao norte (ou sul) do equador, ou seja, a declinação variou entre 23,27° e -23,27°. Com isso, sabe-se o dia exato do solstício de verão, solstício de inverno, equinócio de primavera e equinócio de outono no hemisfério sul. A Tabela 4 apresenta os dias do ano de 2022 que aconteceram os eventos.

Tabela 4 – Fenômenos astronômicos de 2022

Evento	Dia/Data	Declinação
Solstício de inverno	21 de junho 2022	23.44'
Solstício de verão	21 de dezembro 2022	- 23.44'
Equinócio de primavera	22 de setembro 2022	0°
Equinócio de outono	20 de março de 2022	0°

Fonte: Autor, 2022

Pode-se observar que a altitude solar varia significativamente sua posição latitudinal na Terra. Como a região de Maceió fica próxima a linha do equador, o sol estará alto no céu próximo ao meio do dia. Portanto, a altitude solar nesse horário é a maior como demonstra a Figura 33:

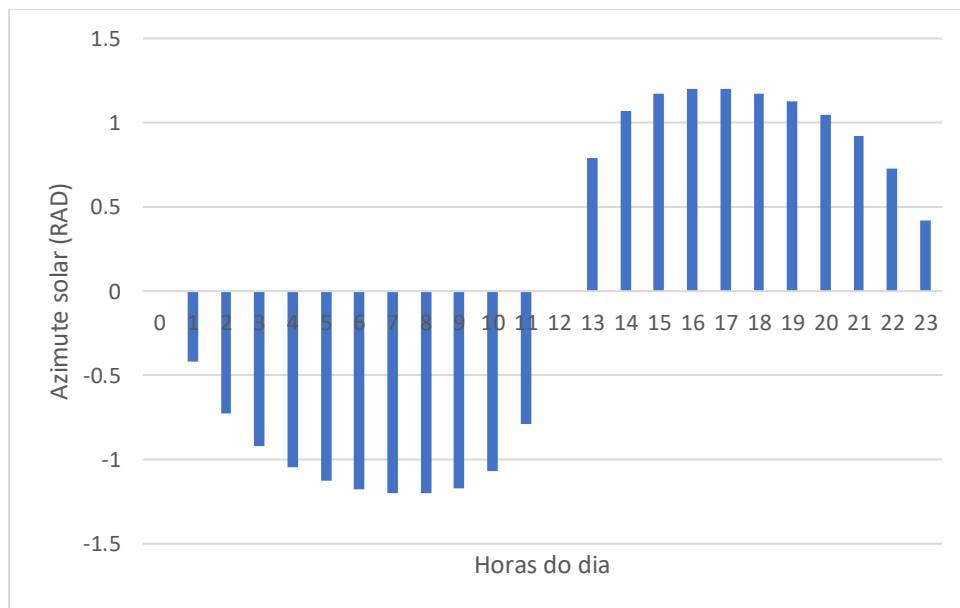
Figura 33 – Altitude Solar



Fonte: Autor, 2023

Pode-se analisar que o azimuth (γ) é o ângulo medido sobre o horizonte, formado entre o eixo Norte-Sul, com origem no norte geográfico, e a direção da projeção do Sol no plano do horizonte local. Observa-se que na Figura 34 o azimuth varia entre 0° e 360° , sendo positivo, de 0° a 180° , quando a projeção se encontrar a leste do sul geográfico e negativo, de 0° a 180° , quando se encontrar a oeste. Ao meio-dia solar, por definição, o sol está exatamente sobre o meridiano, que contém a linha norte-sul, e, conseqüentemente, o azimuth solar está em 0° .

Figura 34 – Ângulo de azimute solar em Maceió

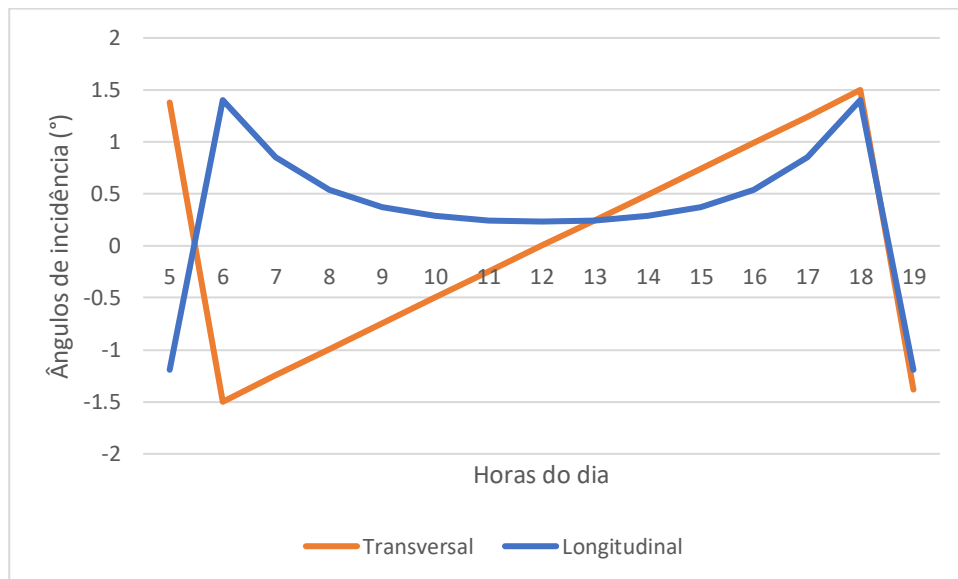


Fonte: Autor, 2023

Normalmente a melhor orientação para se instalar coletores CSP é a norte-sul, onde os espelhos rastreiam o sol, girando em um eixo, de leste para oeste. Na Figura 35, é possível analisar o comportamento dos ângulos de incidência: transversal e longitudinal.

O transversal permite fazer a correção da incidência de radiação no mesmo plano da figura. O longitudinal permite corrigir a incidência num plano perpendicular à página. Esses eventos, são chamados de perdas de início e fim da linha. No início do coletor, parte do absorvedor não recebe radiação concentrada e no fim do coletor os últimos espelhos refletem para fora do absorvedor.

Figura 35 – Ângulo de incidência da cidade de Maceió – Alagoas



Fonte: Autor, 2023

Pode se notar que o ângulo de incidência transversal é a principal desvantagem dos concentradores solar Fresnel. Esse fato, faz com que a entrega de energia de um CFL não seja constante ao longo do dia, sendo menor no início do dia, quando a radiação solar começa a incidir e no fim do dia.

Os resultados mostram que um aumento na concentração significa um aumento nas perdas ópticas transversais e uma melhoria no ganho óptico longitudinal devido a uma menor altura do absorvedor/secundário. Sabendo disso, o fator de interceptação longitudinal CLFA $\{-1; -0,1\}$, que é superior ao CLFA $\{-2,2; -0,03\}$, devido à menor altura do conjunto absorvedor/secundário.

No entanto, ao analisar a variação dos coeficientes de interceptação transversal e longitudinal combinados, pode-se afirmar que CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ é o melhor concentrador entre os analisados.

A Tabela 5 demonstra os resultados obtidos com a ajuda do software SOLTRACE, de energia anual absorvida e radiação solar direta na cidade de Maceió-Alagoas.

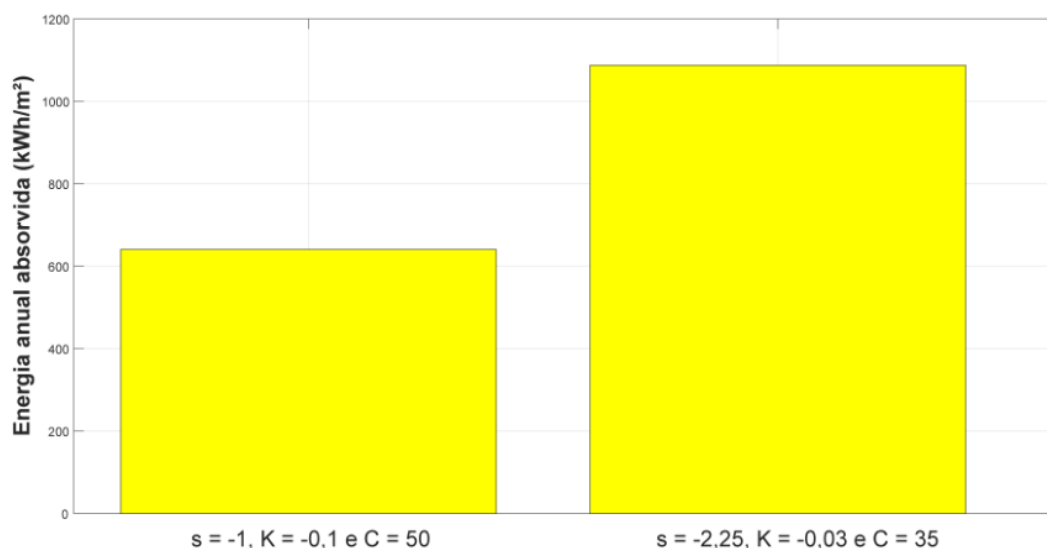
Tabela 5 – Resultados de energia anual absorvida e radiação direta em 2022

	Concentrador 1	Concentrador 2
s, K e C	s=-1, K=-0,1 e C = 50	s=-2,25, K=-0,03 e C = 35
Energia Anual absorvida (kWh/m ²)	640.253,8998	1.087.361,475
DNI total (kWh/m²)	2.018.755,729	2.018.755,729

Fonte: Autor, 2023

A radiação normal direta durante o ano de 2022 foi de 2×10^6 kWh/m² na região proposta para o estudo. No entanto, a energia anual absorvida apresentou variações nos dois concentradores comparada a radiação total incidente. Nesse contexto, o termo de energia solar absorvida pode ser entendido da seguinte maneira: a radiação solar direta atinge os espelhos primários, sendo parte dela que atinge o tubo absorvedor é absorvida. Entretanto, existem diversos fatores que reduzem a energia absorvida, que incluem bloqueio de raios refletidos dos segmentos do espelho primário, radiação que não atinge o primário e atinge o solo, sombreamento causado pelo primário no secundário, perdas finais, raios refletidos do primário que não atingem o secundário, perdas entre espelhos e perdas térmicas no tubo absorvedor.

Figura 36 – Energia anual absorvida pelos concentradores



Na Figura 36 pode-se analisar que aumentar os valores de K em módulo resulta no aumento da abertura do concentrador secundário (e, portanto, aumento das perdas por sombreamento secundário). Caso s aumente em

módulo, haverá a diminuição da profundidade do primário e a consequente redução das perdas para o solo.

Pôde-se observar rapidamente que o CLFA com parâmetros $s = -2,2$, $K = -0,03$ e $\varphi_{\max} = 85^\circ$ apresenta o melhor desempenho na incidência normal, com $\gamma = 0,84$. Observa-se que o fator de interceptação do concentrador supera 0,9 quando a sombra do secundário deixa o primário. O concentrador apresenta desempenho inferior quando se observa individualmente a variação longitudinal do fator de interceptação devido à maior altura do conjunto secundário/absorvedor. Quando se analisa de forma combinada a variação do fator de interceptação transversal e longitudinal, pode-se afirmar que o CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ é o melhor concentrador dentre os analisados.

A curva de fator de interceptação longitudinal a uma concentração $C = 50$ (CLFA $\{-1; -0,1\}$) alcança valores superiores quando comparado ao CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ com $C = 35$. Entretanto, não é suficiente para superar a coleta de energia total verificada no CLFA $\{2,2; -0,03\}$, que apresenta fator de interceptação acima de 0,84 na incidência normal, superando 0,9 quando a sombra secundária deixa o primário.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Pode-se concluir, que em termos de concentração, o CLFA $\{-2,2; -0,03\}$ apresenta $C = 35$, é bem superior às calhas parabólicas comerciais. Porém nos dois concentradores existiram perdas por: dispersão, sombreamento do primário pelo secundário, perdas para o solo, bloqueio e impacto do sombreamento sobre os espelhos. Os CLFAs apresentam forte dependência dos dois ângulos de incidência projetados, transversal e longitudinal.

Para trabalhos futuros, estudar mais profundamente a estimativa energética seria necessário obter os dados de radiação solar com uma maior frequência, ou seja, de minuto a minuto e analisar a média de radiação solar direta em mais anos. Além de utilizar dados reais de DNI para cidade de Maceió, analisar a eficiência térmica e por último comparar diferentes concentradores Fresnel aplanático.

Das avaliações feitas, observa-se que as principais barreiras para a inserção desta tecnologia no mercado brasileiro não estão nos aspectos de ordem técnica, mas na falta de incentivos e metas para seu desenvolvimento e custos associados.

REFERÊNCIAS

ANEEL, 2022. Projeto estratégico: **Desenvolvimento da tecnologia nacional de geração heliotérmica de energia elétrica**. Agência Nacional de Energia Elétrica. Brasília, 2022.

AWAN, A. B., ZUBAIR, M., PRAVEEN, R. P., BHATTI, A. R (2019). **Design and comparative analysis of photovoltaic and parabolic trough based CSP plants**. Solar Energy, Elsevier, v. 183, p. 551-565.

AZEVEDO, V. W. B. **Estudo de localização de Usina Solar Termoelétrica no Estado de Pernambuco. 2016**. 240f. Dissertação (Doutorado em Ciências, Área de Concentração: Energia Renováveis) - Departamento de Energia Nuclear, Universidade Federal de Pernambuco, 2016

BONJORNO, J. R. R. CLINTON, M. A. AUGUSTO, L. **Física, eletromagnetismo, física moderna..** São Paulo, SP: FTD. V.3 (s.d.)

CAMS solar radiation time-series (2022) Disponível em: <<https://ads.atmosphere.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/cams-solar-radiation-timeseries?tab=form>> Acessado em 02 de fevereiro de 2023.

CASTRO, G., 2015. **Avaliação do valor da energia proveniente de usinas heliotérmicas com armazenamento no âmbito do sistema interligado nacional**. UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

Çengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2012). **Transferencia de Calor e Massa - Uma abordagem prática**. Porto Alegre: AMGH Editora Ltda.

FILHO, C., 2014. **Metodologia para Estudo de Implantação de uma Usina Heliotérmica de Receptor Central no Brasil**. UFRJ (Universidade Federal do Rio de Janeiro) – Rio de Janeiro – RJ – Brasil.

INPE (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais), 2018. **Atlas Brasileiro de Energia Solar**. São José dos Campos – SP.

KALOGIROU, S. A. **Solar thermal collectors and applications. Progress in energy and combustion science**, Elsevier, v. 30.

LABREN, 2023 - **Médias do Total Diário da Irradiação PAR para o Estado de ALAGOAS** disponível em: <
http://labren.ccst.inpe.br/atlas2_tables/AL_par.html> acessado em 05 de fevereiro de 2023.

LOVEGROVE, K.; STEIN, W. **Concentrating solar power technology Principles, developments and applications**. Woodhead Publishing Limited, 2012.

MONTES, M. J., ABBAS, R., MUÑOZ, M., MUÑOZ-ANTÓN, J., MARTÍNEZ-VAL, J. M. (2017). **Advances in the linear Fresnel single-tube receivers: Hybrid loops with nonevacuated and evacuated receivers**. *Energ. Convers. Manage.*, Elsevier, v. 149, p. 318-333.

NIXON, J. D., DEY, P. K., DAVIES, P. A. (2013). **Design of a novel solar thermal collector using a multi-criteria decision-making methodology**. *J. Clean. Prod.*, Elsevier, v. 59, p. 150-159.

OLIVEIRA, J. A., FRAIDENRAICH, N., VILELA, O. C. (2015). **Sombra, bloqueio e área de perda de um concentrador linear Fresnel. Análise de sensibilidade**. *Revista Brasileira de Energia Solar*, v. 6, p. 138-147.

SBC Energy Institute, 2013. **Concentrating Solar Power**. Gravenhage, Holanda.

SOUZA, L. F. L., FRAIDENRAICH, N., TIBA, C., GORDON, J. M. (2021). **Linear aplanatic Fresnel reflector for practical high-performance solar concentration**. *Solar Energy*, Elsevier, v. 222, p. 259-268.

SOUZA, L. F. L., FRAIDENRAICH, N., TIBA, C., GORDON, J. M. (2022). **Analytic optical evaluation of linear aplanatic solar Fresnel reflectors**. *Solar Energy*, Elsevier, v. 249, p. 107-121.

SBC Energy Institute, 2013. **Concentrating Solar Power**. Gravenhage, Holanda.

SOUZA, L. F. L., PAES, M. D. A., TIBA, C. (2021). **Análise financeira da produção combinada de Eletricidade e calor de processo industrial com Energia solar**. Revista Brasileira de Eneriga Solar, v. 12, n. 1, p. 87– 96.

VIANA, Trajano de Souza, 2010. **Potencial de geração de energia elétrica com sistemas fotovoltaicos com concentrador no Brasil**. Tese (doutorado), Universidade Federal de Santa Catarina, SC, Brasil.