



**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA**  
**“JÚLIO DE MESQUITA FILHO”**  
**Faculdade de Engenharia e Ciências de Guaratinguetá**

**BRUNO PEDROSA SANSONE**

**Pesquisa Bibliográfica sobre a utilização de lentes Fresnel como concentradores  
fotovoltaicos**

Guaratinguetá  
2023

**Bruno Pedrosa Sansone**

**Pesquisa Bibliográfica sobre a utilização de lentes Fresnel como concentradores  
fotovoltaicos**

Trabalho de Graduação apresentado ao Conselho de Curso de Graduação em Engenharia Mecânica da Faculdade de Engenharia e Ciências do Campus de Guaratinguetá, Universidade Estadual Paulista, como parte dos requisitos para obtenção do diploma de Graduação em Engenharia Mecânica.

Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

Guaratinguetá  
2023

S229p Sansone, Bruno Pedrosa  
Pesquisa bibliográfica sobre a utilização de lentes  
Fresnel como concentradores fotovoltaicos / Bruno Pedrosa  
Sansone - Guaratinguetá, 2023.  
77 f : il.  
Bibliografia: f. 75-77

Trabalho de Graduação em Engenharia Mecânica –  
Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Engenharia e  
Ciências de Guaratinguetá, 2023.  
Orientador: Prof. Dr. José Alexandre Matelli

1. Sistemas de energia fotovoltaica. 2. Energia solar.  
3. Energia elétrica - Consumo. I. Título.

CDU 620.91

BRUNO PEDROSA SANSONE

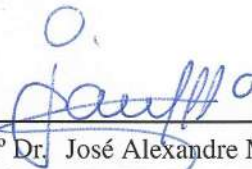
ESTE TRABALHO DE GRADUAÇÃO FOI JULGADO ADEQUADO COMO PARTE DO REQUISITO PARA A OBTENÇÃO DO DIPLOMA DE "GRADUANDO EM ENGENHARIA MECÂNICA "

APROVADO EM SUA FORMA FINAL PELO CONSELHO DE CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA MECÂNICA



Profº Dr. CELSO EDUARDO TUNA  
Coordenador

BANCA EXAMINADORA:



Profº Dr. José Alexandre Matelli  
Orientador/UNESP-FEG



Profº Dr. Rubens Alves Dias  
UNESP-FEG



Profº Dr. Evaldo Chagas Gouvêa  
UNESP-FEG

Janeiro, 2023

## **DADOS CURRICULARES**

### **BRUNO PEDROSA SANSONE**

**NASCIMENTO** 26.04.1999 - Fortaleza / CE

**FILIAÇÃO** Marco Alessandro Sansone  
Maria Aline Pedrosa Cavalcante

Dedico este trabalho aos meus pais, pelo apoio e sacrifício, sem os quais não seria possível concluir  
essa jornada.

## AGRADECIMENTOS

À minha família, meus pais Marco e Aline e minha irmã Giulia, que sempre me apoiaram, e mesmo diante de dificuldades puderam me proporcionar as condições para concluir esta graduação.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Alexandre Matelli, que sempre foi altamente solícito e parceiro para me guiar ao longo deste trabalho.

À equipe de extensão universitária UNESP Racing e seus membros, que me proporcionaram a melhor experiência extracurricular que tive ao longo desta graduação. Muito do que aprendi fora de sala de aula foi graças a eles.

Ao meu avô José (in memoriam) e à minha avó Djanira, que mesmo à distância estiveram comigo e acreditaram em mim ao longo de todos os meus estudos.

Aos queridos amigos que fiz ao longo desta graduação, em especial aos meus companheiros de república, aos amigos da turma da Mecânica 017 e aos parceiros de carona com quem dividi longas horas de trajeto de Guaratinguetá para Atibaia.

Agradeço, enfim, à Deus, que à sua maneira, esteve ao meu lado durante os momentos felizes e difíceis que vivenciei no decorrer desta etapa.

*“A melhor coisa do futuro é que ele chega à razão de um dia de cada vez.”*  
*(Abraham Lincoln)*

## RESUMO

A partir da necessidade de redução das emissões de gases poluentes causadores do aquecimento global, o desenvolvimento de tecnologias associadas às fontes renováveis de energia é fundamental para o aumento da participação dessas fontes na matriz energética mundial. No escopo da geração de energia solar fotovoltaica, destaca-se o desenvolvimento de lentes Fresnel como concentradores ópticos, que possuem o propósito de aumentar a geração de energia em células fotovoltaicas. Uma pesquisa bibliográfica qualitativa foi adotada como estratégia de pesquisa para estudar e compreender a utilização de lentes Fresnel como concentradores na geração de energia solar fotovoltaica. Foi analisada a origem da lente Fresnel, os campos de sua atuação ao longo da história, assim como os parâmetros e a metodologia de projeto para as suas diferentes classes. Na comparação de performance em relação à célula convencional, os artigos selecionados mostram que o sistema fotovoltaico concentrador com lentes Fresnel apresentou um ganho de eficiência e produção de energia, a depender de fatores como a distância da célula em relação à lente, e a magnitude da irradiação direta normal disponível. Além disso, são apresentados os problemas relacionados à não-uniformidade da irradiação advinda da concentração da lente, que podem impactar na temperatura e, conseqüentemente, na eficiência da célula. Por fim, também foram listadas algumas vantagens e desvantagens da lente Fresnel em relação a outros concentradores solares.

**PALAVRAS-CHAVE:** Lentes Fresnel; Concentradores Fotovoltaicos; Solar; Óptico; Pesquisa bibliográfica.

## **ABSTRACT**

Based on the need to reduce pollutant gases emissions that cause global warming, the development of technologies associated with renewable energy sources is essential to increase the participation of these sources in the world's energy matrix. In the scope of photovoltaic solar energy generation, stands out the development of Fresnel lenses as optical concentrators, which have the purpose to increasing energy production in photovoltaic cells. A qualitative bibliographic research was adopted as a research strategy to study and understand the use of Fresnel lenses as concentrators in solar photovoltaic power generation. The origin of the Fresnel lens, the sectors of its participation throughout history, as well as the parameters and design methodology for its different classes were analyzed. In the performance comparison with the conventional cell, the selected articles show that the concentrated photovoltaic system with Fresnel lenses showed a gain in efficiency and energy production, depending on factors such as the distance of the cell from the lens, and the magnitude of the available direct normal irradiance. In addition, the paper presents problems related to the non-uniformity of the irradiance coming from the lens concentration, which can impact the temperature and consequently the cell's efficiency. Finally, some advantages and disadvantages of the Fresnel lens over other solar concentrators are also listed.

**KEYWORDS:** Fresnel lens; Concentrated Photovoltaic; CPV; Solar; Optics; Bibliographic research.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1	Previsão da necessidade global de energia por setor até 2050.	18
Figura 2	Previsão da matriz energética mundial para 2050.	19
Figura 3	Distribuição espectral da radiação solar para comprimentos de onda de 0 a 3 $\mu\text{m}$ .	23
Figura 4	Natureza direcional da radiação fora da atmosfera terrestre.	23
Figura 5	Espalhamento da radiação solar na atmosfera terrestre.	24
Figura 6	Distribuição direcional da radiação solar na superfície da Terra.	25
Figura 7	Ângulos $\theta$ , $\psi$ e $\gamma_S$ da Geometria Solar.	25
Figura 8	Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.	27
Figura 9	Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semiconductor.	28
Figura 10	Níveis de energia em materiais tipo $n$ e $p$ .	28
Figura 11	Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.	29
Figura 12	Fatores que limitam a eficiência de uma célula fotovoltaica.	30
Figura 13	Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio.	32
Figura 14	Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo).	32
Figura 15	Esquema de um concentrador óptico genérico.	34
Figura 16	Comparação entre sistemas de concentração formadores e não-formadores de imagem.	35
Figura 17	Potência elétrica teórica dissipada por um módulo em função do ângulo de incidência do raio de luz.	36
Figura 18	Direção dos raios solares em função do ângulo de incidência.	36
Figura 19	Comparação entre o formato de uma lente convencional e uma lente Fresnel.	37
Figura 20	Modelo esquemático de uma lente Fresnel do tipo circular.	38
Figura 21	Modelo de uma lente Fresnel linear indicando o caminho dos raios solares para dois horários diferentes do dia.	38
Figura 22	Modelo esquemático de um concentrador parabólico e seus parâmetros geométricos.	39
Figura 23	Exemplo de um concentrador solar parabólico em operação.	39
Figura 24	Vista 2D esquemática de um concentrador solar hiperbólico evidenciando possíveis trajetos de raios incidentes.	40
Figura 25	Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (irradiação de 1000 $\text{W}/\text{m}^2$ ).	41
Figura 26	Modelo de um dissipador de calor passivo para uma célula fotovoltaica única.	42
Figura 27	Modelo de um dissipador de calor ativo do tipo <i>heat pipe</i> para sistemas CPV.	42
Figura 28	Fluxograma das três etapas do procedimento metodológico de pesquisa.	46
Quadro 1	Artigos selecionados na pesquisa.	47

Figura 29 Vista em corte da lente de superfície escalonada criada por Buffon (a), e da lente Fresnel criada em 1822 (b).	48
Figura 30 Projeto de baliza giratória de farol de Augustin Jean Fresnel.	49
Figura 31 Linha temporal das aplicações envolvendo lentes Fresnel ao longo da história.	50
Figura 32 Desenvolvimento histórico da lente Fresnel para a aplicação de concentração solar.	50
Figura 33 Visualização esquemática bidimensional dos fenômenos de reflexão (a) e refração (b).	52
Figura 34 Visualização esquemática bidimensional do ângulo crítico de refração (a) e do fenômeno da reflexão interna total (b).	52
Figura 35 Visualização esquemática do parâmetro <i>f-number</i> .	53
Figura 36 Solução analítica do projeto de uma lente Fresnel formadora de imagem com entalhes voltados para dentro.	54
Figura 37 Solução analítica do projeto de uma lente Fresnel formadora de imagem com entalhes voltados para fora.	55
Figura 38 Comparação entre o ângulo dos prismas $\alpha$ para lentes Fresnel com entalhes voltados para dentro e para fora.	56
Figura 39 Teorema do raio da borda.	58
Figura 40 Teorema do raio da borda aplicado aos entalhes da lente Fresnel projetada.	58
Figura 41 Parâmetros utilizados na construção do perfil de cada entalhe da lente Fresnel não formadora de imagem projetada.	59
Figura 42 Dois modelos de lente Fresnel construídos a partir da seção contendo o perfil dos entalhes para (a) extrusão e (b) revolução.	60
Figura 43 Proposta alternativa de lente Fresnel a partir da junção de duas superfícies posicionadas de forma perpendicular uma à outra.	60
Figura 44 Simulação com técnica <i>ray tracing</i> para novo conceito de lente Fresnel de forma a convergir a luz solar em duas direções.	61
Figura 45 Alturas testadas para a célula, sendo (a) no ponto focal, (b) abaixo e (c) acima do ponto focal.	62
Figura 46 Representação esquemática do <i>setup</i> montado para o experimento.	62
Figura 47 (a) Potência x Tempo para um dia nublado; (b) Energia total gerada em 12 horas.	63
Figura 48 (a) Potência x Tempo para um dia ensolarado; (b) Energia total gerada em 12 horas.	64
Figura 49 Especificações elétricas e curva I-V do painel fotovoltaico CS3L-380MS sob condição STC.	65
Figura 50 Especificações elétricas e curva I-V do painel fotovoltaico CS3L-380MS sob condição NMOT.	65
Figura 51 Curvas de potência por área em função da irradiação direta normal para sistema CPV e NCPV.	67
Figura 52 Curvas de potência por área em função da irradiação direta normal para sistema CPV e NCPV com diferentes valores de eficiência de conversão.	68

Figura 53 Perfil de intensidade relativa de irradiação gerado por lente Fresnel do tipo ponto focal.	70
Figura 54 Perfil de intensidade relativa de irradiação obtido por simulação <i>ray tracing</i> para sistema composto por duas lentes Fresnel não formadoras de imagem.	70
Figura 55 Micrografias de seções radiais da superfície de uma lente Fresnel, aumentando a distância progressivamente do centro da lente de (a) para (d).	72
Figura 56 Raio de luz perdido devido à incidência na face de conexão entre entalhes.	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Bandas proibidas $E_g$ para diversos materiais semicondutores à temperatura de 300 K.	27
Tabela 2 – Classificação dos concentradores fotovoltaicos baseada no fator de concentração.	33
Tabela 3 – Fluidos compatíveis com cobre e alumínio, baseado em testes de vida útil de <i>heat pipes</i> .	43
Tabela 4 – Aumento percentual na energia total gerada em 12 horas de cada configuração.	64
Tabela 5 – Parâmetros do modelo de comparação utilizado.	66
Tabela 6 – Intervalo de radiação direta normal para o qual o sistema NCPV desempenha melhor que o CPV para combinações de eficiência nominal de conversão.	68

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CPV	<i>Concentrated Photovoltaics</i>
COVID-19	<i>Corona Virus Disease (2019)</i>
DSSC	<i>Dye-Sensitized Solar Cell</i>
OPV	<i>Organic Photovoltaics</i>
STC	<i>Standard Test Conditions</i>
NMOT	<i>Nominal Module Operating Temperature</i>
DNI	<i>Direct Normal Irradiance</i>
NCPV	<i>Nonconcentrated Photovoltaics</i>
PMMA	Polimetilmetacrilato
UFRJ	Universidade Federal do Rio de Janeiro

## LISTA DE SÍMBOLOS

$S_c$	Constante solar [ $1368 \pm 0,65 \text{ W/m}^2$ ]
$\theta$	Ângulo de zênite [ $^\circ$ ]
$G_{S,e}$	Irradiação solar extraterrestre [ $\text{W/m}^2$ ]
$f_T$	Fator de correção da excentricidade da órbita da Terra ao redor do Sol
$d_t$	Diâmetro da Terra [ $1,27 \cdot 10^7 \text{ m}$ ]
$D$	Diâmetro [m]
$\lambda$	Comprimento de onda [m]
$\psi$	Elevação solar [ $^\circ$ ]
$\gamma_S$	Ângulo azimutal do Sol [ $^\circ$ ]
$E_g$	Banda proibida ( <i>bandgap</i> ) [eV]
$E_f$	Energia do fóton [J]
$h$	Constante de Planck [ $6,62607015 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ ]
$\nu$	Frequência da luz [Hz]
$c$	Velocidade da luz no vácuo [ $2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ ]
$E_c$	Nível inferior da energia da banda de condução [eV]
$E_v$	Nível máximo de energia na banda de valência [eV]
$E_{fe}$	Nível de energia de Fermi [eV]
$V_0(T)$	Diferença de potencial na junção <i>pn</i> [V]
$n_i$	Concentração de portadores intrínsecos no material [ $\text{m}^{-3}$ ]
$N_d$	Concentração do dopante tipo <i>n</i> [ $\text{m}^{-3}$ ]
$N_a$	Concentração do dopante tipo <i>p</i> [ $\text{m}^{-3}$ ]
$q$	Carga do elétron [ $1,602176634 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ ]
$k$	Constante de Boltzmann [ $1,380649 \cdot 10^{-23} \text{ J/K}$ ]
$T$	Temperatura absoluta [K]
$I_L$	Corrente fotogerada [A]

$I_0$	Corrente de saturação reversa do diodo [A]
$A$	Área da seção reta da junção $pn$ [m <sup>2</sup> ]
$i_D$	Fator de idealidade do diodo
$D_p$	Coefficiente de difusão de lacunas [m <sup>2</sup> /s]
$D_n$	Coefficiente de difusão de elétrons [m <sup>2</sup> /s]
$L_p$	Comprimento de difusão de lacunas [m]
$L_n$	Comprimento de difusão de elétrons [m]
$I_{SC}$	Corrente elétrica de curto-circuito [A]
$V_{OC}$	Tensão de circuito aberto [V]
$P_{MP}$	Potência máxima [W]
$I_{MP}$	Corrente no ponto de potência máxima [A]
$V_{MP}$	Tensão no ponto de potência máxima [V]
$R_s$	Resistência em série [ $\Omega$ ]
$R_p$	Resistência em paralelo [ $\Omega$ ]
$FF$	<i>Fill factor</i> (Fator de preenchimento)
$\eta$	Eficiência de conversão de energia solar em energia elétrica
$A_c$	Área da célula fotovoltaica [m <sup>2</sup> ]
$G_c$	Irradiância solar incidente sobre a célula [W/m <sup>2</sup> ]
$X$	Fator de concentração
$G_x$	Fluxo radiante médio na superfície receptora [W/m <sup>2</sup> ]
$G$	Irradiação hemisférica total na superfície terrestre [W/m <sup>2</sup> ]
$\eta_o$	Eficiência óptica do concentrador
$C_g$	Concentração geométrica
$P_{in}$	Potência radiante na entrada do concentrador [W]
$P_{out}$	Potência radiante na saída do concentrador [W]
$A_{in}$	Área da superfície de entrada do concentrador [m <sup>2</sup> ]
$A_{out}$	Área da superfície de saída do concentrador [m <sup>2</sup> ]

$n$	Índice de refração
$n_1$	Índice de refração do meio na entrada do concentrador solar
$n_2$	Índice de refração do meio na saída do concentrador solar
$\theta_{in}$	Ângulo de incidência na entrada do concentrador [°]
$\theta_{out}$	Ângulo de saída do concentrador [°]
$U$	Uniformidade do fluxo radiante
$C_{max}$	Concentração máxima do fluxo radiante
$\varphi_R$	Ângulo de borda (concentradores parabólicos) [°]
$f$	Distância focal [m]
$CR$	Concentração geométrica de concentradores hiperbólicos
$\Phi$	Ângulo de incidência [°]
$\Phi_R$	Ângulo de reflexão [°]
$\Phi'$	Ângulo de refração [°]
$\Phi_c$	Ângulo de refração crítico [°]
$v$	Velocidade da luz em um material de índice de refração qualquer $n$ [m/s]
$i$	Distância entre a imagem conjugada e a superfície da lente [m]
$o$	Distância entre o objeto e a superfície da lente [m]
$f/\#$	Parâmetro <i>f-number</i>
$\phi$	Diâmetro da lente [m]
$R$	Raio da lente [m]
$\alpha$	Ângulo do prisma (entalhe) [°]

## SUMÁRIO

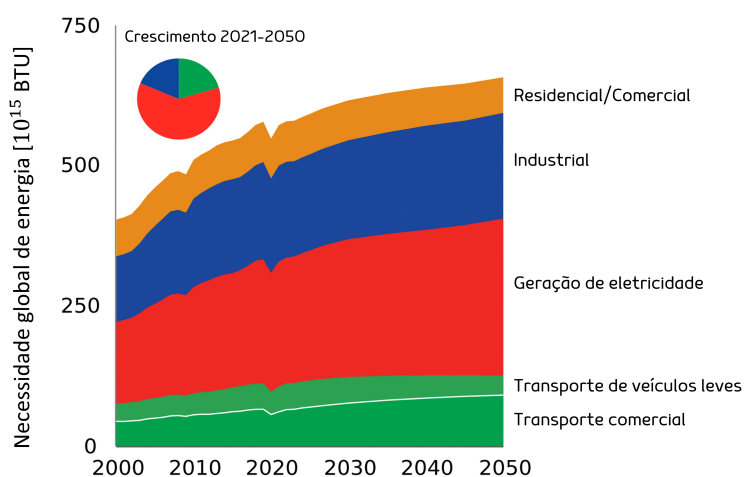
<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>18</b>
1.1	MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS	19
1.2	OBJETIVOS	20
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b>	<b>22</b>
2.1	RADIAÇÃO SOLAR	22
2.2	ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA	26
2.2.1	O Efeito Fotovoltaico	26
2.2.2	Caraterísticas Elétricas das Células Fotovoltaicas	31
2.3	CONCENTRADORES FOTOVOLTAICOS	33
2.3.1	Introdução	33
2.3.2	Principais parâmetros	35
2.3.3	Lentes Fresnel	37
2.3.4	Concentradores Parabólicos	38
2.3.5	Concentradores Hiperbólicos	40
2.3.6	Resfriamento	40
2.3.7	Vantagens e Desvantagens	43
<b>3</b>	<b>PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA</b>	<b>45</b>
<b>4</b>	<b>ANÁLISE DOS ARTIGOS</b>	<b>47</b>
4.1	HISTÓRIA	48
4.2	PROJETO	51
4.2.1	Lentes Fresnel formadoras de imagem ( <i>imaging</i> )	53
4.2.1.1	Entalhes voltados para dentro ( <i>grooves in</i> )	54
4.2.1.2	Entalhes voltados para fora ( <i>grooves out</i> )	55
4.2.2	Lentes Fresnel não-formadoras de imagem ( <i>nonimaging</i> )	56
4.3	EFICIÊNCIA E GERAÇÃO DE ENERGIA	61
4.4	UNIFORMIDADE DE FLUXO	69
4.5	VANTAGENS E DESVANTAGENS	71
4.6	PERSPECTIVAS FUTURAS	73
<b>5</b>	<b>CONCLUSÃO</b>	<b>74</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b>	<b>75</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O desenvolvimento da civilização moderna, marcada pela industrialização e consumo, está altamente associada com o aumento da necessidade de energia. O crescimento populacional, a construção de infraestrutura e o desenvolvimento de tecnologia e riqueza são alguns dos fatores que, ao longo dos anos, levaram o mundo a necessitar de uma maior geração (e consequentemente, consumo) de energia. Dessa forma, ao longo do século XXI, o consumo de energia praticamente só aumentou. Para 2050, a previsão é de que a necessidade global de energia deverá atingir um total de cerca de  $660 \cdot 10^{15}$  BTU, ou seja, 193,4 PWh, 15% a mais do que a atual (EXXON MOBIL, 2022).

Além disso, considerando o consumo de energia por setor, aquele que apresenta a maior necessidade de energia atualmente é o de geração de energia elétrica, conforme é possível visualizar na Figura 1. Impulsionado principalmente pelo desenvolvimento de economias emergentes, este também é o setor que mais cresce. Ainda, os países em desenvolvimento respondem por mais de 100% do crescimento da necessidade global de energia (EXXON MOBIL, 2022).

Figura 1 – Previsão da necessidade global de energia por setor até 2050.



fonte: Exxon Mobil (2022).

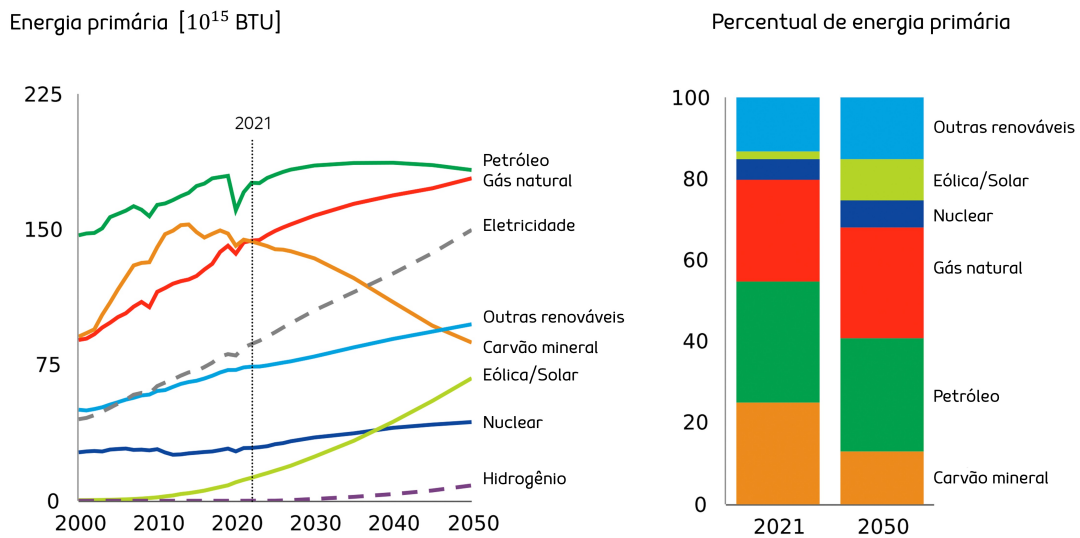
Para atender à necessidade global de energia, os combustíveis fósseis, ou seja, carvão mineral, gás natural e o petróleo (e seus derivados) se estabeleceram como a principal fonte da matriz energética mundial, perdurando assim até os dias de hoje, conforme ilustra a Figura 2.

A ampla utilização dos combustíveis fósseis (ou não renováveis) como matéria-prima para a geração de energia ao longo dos anos acarretou em uma série de problemas ambientais, incluindo o aquecimento global e o aumento da poluição do ar nas grandes cidades. Dessa forma, com o intuito de reduzir a emissão de gases poluentes (ou *emissão de carbono*, como são popularmente chamados) provenientes da utilização destes combustíveis, prevê-se que a matriz energética mundial seguirá a tendência de diminuir a participação de fontes fósseis, como o carvão mineral, e aumentar a parcela renovável, que inclui as fontes de energia solar e eólica, conforme mostra a Figura 2.

Ainda na Figura 2, com os países adotando essa política de transição para uma matriz energética mais limpa, prevê-se que a participação de fontes renováveis (como eólica e solar) e nuclear deverá

contribuir com cerca de 65% do fornecimento adicional de energia para atender ao crescimento da necessidade (EXXON MOBIL, 2022). Além disso, em relação aos combustíveis fósseis, é esperado que o consumo de gás natural aumente, chegando a atender quase 30% da necessidade global de energia em 2050. O gás natural é o combustível fóssil menos poluente, ou seja, que emite a menor quantidade de gás carbônico, sendo aproximadamente metade da emissão do carvão mineral (MET GROUP, 2020).

Figura 2 – Previsão da matriz energética mundial para 2050.



A expectativa do aumento da geração de energia a partir de fontes renováveis, como a matriz solar, está se traduzindo no investimento que vem sendo destinado a essa tecnologia. No Brasil, a GDSUN, uma das principais empresas do segmento, projeta atingir 470 MWp de capacidade instalada até 2025 (O ESTADO DE S. PAULO, 2022). Já a companhia norueguesa Equinor pretende investir US\$ 430 milhões na construção do seu projeto solar denominado *Mendubim* no Rio Grande do Norte, que a partir de 2024 irá gerar anualmente cerca de 1,2 TWh de energia (EPBR, 2022).

A partir do contexto energético global apresentado e dos investimentos que a geração de energia solar vem recebendo com o intuito de ampliar sua participação na matriz energética mundial, torna-se relevante a pesquisa e o desenvolvimento de soluções que possam potencializar e otimizar a produção de energia a partir do Sol. Dessa forma, este trabalho se propõe a estudar uma dessas soluções no segmento da energia solar fotovoltaica, a dos concentradores fotovoltaicos (CPV - *Concentrated Photovoltaics*). Mais especificamente, de um modelo de concentrador, a lente Fresnel.

## 1.1 MOTIVAÇÃO E JUSTIFICATIVAS

A tendência global de reduzir a parcela de utilização dos combustíveis fósseis e buscar alternativas energéticas mais limpas e renováveis atribui à energia solar um papel determinante dentro do setor energético renovável, vistos os investimentos que vêm sendo destinados para usinas solares e a expectativa que existe sobre a expansão desta tecnologia.

A geração de energia solar apresenta duas vertentes: térmica e fotovoltaica. A energia solar térmica se caracteriza pelo uso da radiação solar no aquecimento de um fluido (como a água), que pode ser utilizado em processos industriais, ou seja, ocorre a conversão da energia solar em energia térmica. Já a tecnologia fotovoltaica é caracterizada pela conversão direta da luz em eletricidade, através de células fotovoltaicas compostas por semicondutores. Neste caso, a energia solar é convertida em energia elétrica.

No escopo da energia solar fotovoltaica, uma das tecnologias em desenvolvimento é a dos concentradores fotovoltaicos (CPV), que se propõe a aumentar não só a quantidade de energia gerada a partir da célula, mas também a sua eficiência. De forma introdutória, o princípio de funcionamento da tecnologia CPV reside em aumentar a irradiação (ou fluxo radiante) incidindo sobre a célula através de um dispositivo óptico como uma lente ou espelho. Tais dispositivos atingem esse feito a partir de sua geometria, projetada para redirecionar os raios solares incidentes para a célula, concentrando-os.

O estudo e desenvolvimento dos concentradores fotovoltaicos se justifica ainda mais quando se coloca o contexto da pandemia de COVID-19 e a crise dos semicondutores provocada por ela. De forma resumida, a queda na demanda e as preocupações sanitárias referentes ao vírus forçaram as fábricas a operar em uma capacidade muito reduzida. Na retomada da produção mundial, as fábricas se encontravam com seus estoques de semicondutores zerados e não havia estoque suficiente para atender a todos. Como o setor de fabricação de módulos fotovoltaicos é dependente da cadeia de semicondutores, esse mercado também foi afetado, forçando inclusive algumas fabricantes a interromperem a fabricação de componentes de painéis solares (NIKKEI ASIA, 2021). Não somente isso, mas a crise também provocou danos a longo prazo, podendo não haver estoque suficiente para abastecer 100% da demanda pelos próximos anos, conforme prevê a fabricante chinesa de silício policristalino, Xinte Energy (PV MAGAZINE, 2022).

Com o intuito de se expandir a utilização da energia solar fotovoltaica e torná-la mais atrativa em termos comerciais, seria desejável reduzir a sua dependência da cadeia dos semicondutores. Dessa forma, a tecnologia de concentração fotovoltaica é uma alternativa que tem se mostrado promissora para aumentar a geração de energia solar sem aumentar necessariamente a área de células fotovoltaicas, reduzindo essa dependência. Além disso, os CPV são produzidos a partir de materiais mais acessíveis, como o acrílico.

Dentre os modelos de concentradores fotovoltaicos, a lente Fresnel se destaca pelo baixo peso, pequeno volume e capacidade de produção em massa sendo, portanto, um dos CPV mais utilizados e estudados. Dessa forma, este trabalho se propõe a fazer uma pesquisa bibliográfica sobre o uso de lentes Fresnel na aplicação de concentração fotovoltaica. Em outras palavras, busca-se responder à questão: como funciona a utilização de lentes Fresnel concentradoras na geração de energia em painéis solares fotovoltaicos?

## 1.2 OBJETIVOS

Buscando respostas à questão de pesquisa enunciada na seção anterior, este trabalho tem como objetivo geral estudar e compreender a utilização de lentes Fresnel como concentradores na geração de energia solar fotovoltaica.

Particularmente, os objetivos específicos são:

- (a) Apresentar a origem e a evolução desta tecnologia para a aplicação de concentração solar. Apresentar a classificação dos modelos de lente Fresnel e como é feito o seu projeto e solução;
- (b) Comparar e analisar a eficiência e quantidade de energia gerada para um sistema fotovoltaico com lentes Fresnel concentradoras em relação a um sistema fotovoltaico convencional;
- (c) Avaliar as vantagens e desvantagens da utilização de lentes Fresnel em relação a outros modelos de concentradores, assim como os problemas decorrentes da técnica de concentração solar.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

O entendimento da geração de energia solar fotovoltaica requer o embasamento teórico dos conceitos de radiação (solar) e dos fenômenos sofridos pela luz solar ao atravessar a atmosfera terrestre. Para tal, foi utilizado o Capítulo 12 da obra de [Incropera et al. \(2014\)](#). Além disso, para fornecer a base teórica do princípio de funcionamento da geração de energia solar fotovoltaica, incluindo o conceito de semicondutores e do efeito fotovoltaico, foram escolhidos os Capítulos 2 e 3 da obra de [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

Com o referencial teórico definido para a fonte (radiação) e o mecanismo (célula fotovoltaica) da geração de energia solar fotovoltaica, por último, porém não menos importante, foram selecionadas as obras de [Khamooshi et al. \(2014\)](#) e [Himer et al. \(2020\)](#) para prover o embasamento teórico dos dispositivos concentradores, CPV.

A escolha das obras se baseou no teor didático de seus conteúdos, além do fato de apresentarem um aspecto amplo de seus temas, bem como uma linguagem acessível sobre os conceitos e princípios abordados neste trabalho. Desse modo, esses três temas foram considerados pilares para o entendimento do assunto principal deste trabalho e, portanto, são comentados nas Seções [2.1](#), [2.2](#) e [2.3](#).

### 2.1 RADIAÇÃO SOLAR

Na geração de energia solar fotovoltaica (e térmica), a fonte de radiação principal é o Sol. O Sol, de forma resumida, é “uma enorme esfera de gás incandescente, em cujo núcleo acontece a geração de energia através de reações termonucleares” ([PINHO; GALDINO, 2014](#)). Seu comportamento emissor se assemelha ao de um corpo negro a 5800 K, conforme ilustra a [Figura 3](#).

Vale destacar, porém, que nem toda a radiação emitida pelo Sol atinge a atmosfera terrestre. Ao atravessar o espaço, o fluxo solar radiante diminui. Dessa forma, definiu-se uma *constante solar*,  $S_c$ , sendo esta “o fluxo de energia solar que incide sobre uma superfície com orientação normal aos raios solares no limite externo da atmosfera terrestre, quando a Terra encontra-se à sua distância média do Sol” ([INCROPERA et al., 2014](#)). Seu valor é de  $1368 \pm 0,65 \text{ W/m}^2$ .

Dependendo da latitude geográfica, assim como da hora do dia e do ano, a irradiação solar no limite externo da atmosfera terrestre será diferente. Sendo assim, o *ângulo de zênite*,  $\theta$ , é formado pelo vetor normal à superfície terrestre e pela direção da radiação solar (adotada como um feixe de raios praticamente paralelos), conforme ilustra a [Figura 4](#).

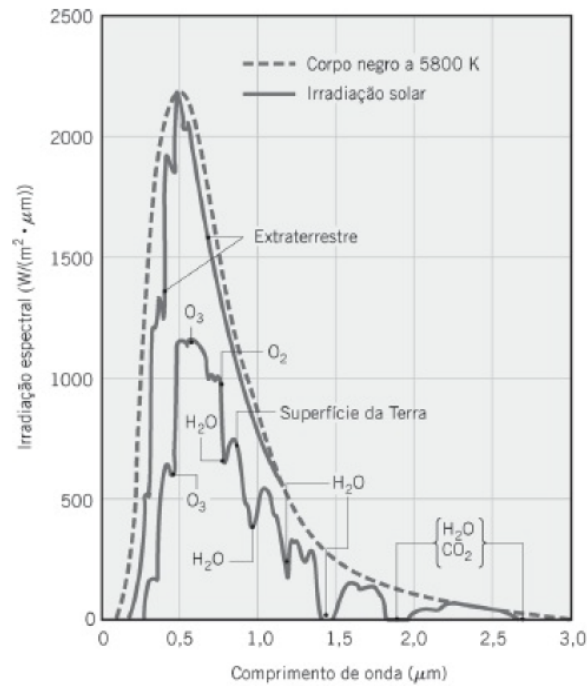
Portanto, a *irradiação solar extraterrestre*,  $G_{S,e}$ , pode ser determinada pela equação [\(1\)](#).

$$G_{S,e} = S_c \cdot f_T \cdot \cos\theta \quad (1)$$

A grandeza  $f_T$  representa um fator de correção que leva em consideração a excentricidade da órbita da Terra ao redor do Sol ( $0,97 \leq f_T \leq 1,03$ ). Em uma base média no tempo e na área superficial, a Terra recebe  $S_c \times \pi r_t^2 / (4\pi r_t^2) = S_c / 4 = 342 \text{ W/m}^2$  de irradiação solar, considerando o diâmetro da Terra igual a  $d_t = 2r_t = 1,27 \times 10^7 \text{ m}$ . A grandeza  $G_{S,e}$  e sua determinação pela equação [\(1\)](#) são

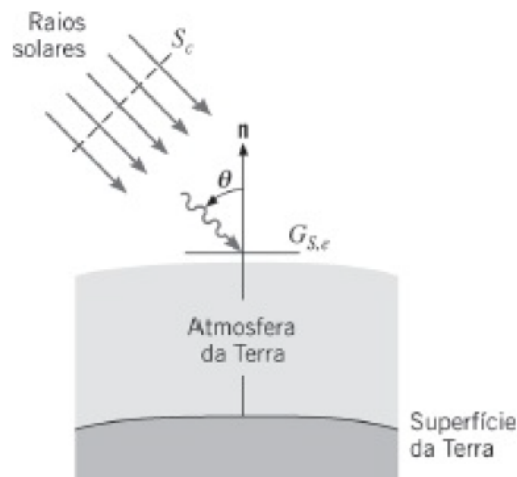
de interesse na geração de energia solar em satélites posicionados na órbita terrestre, dentre outras aplicações espaciais.

Figura 3 – Distribuição espectral da radiação solar para comprimentos de onda de 0 a 3  $\mu\text{m}$ .



fonte: [Incropera et al. \(2014\)](#).

Figura 4 – Natureza direcional da radiação fora da atmosfera terrestre.

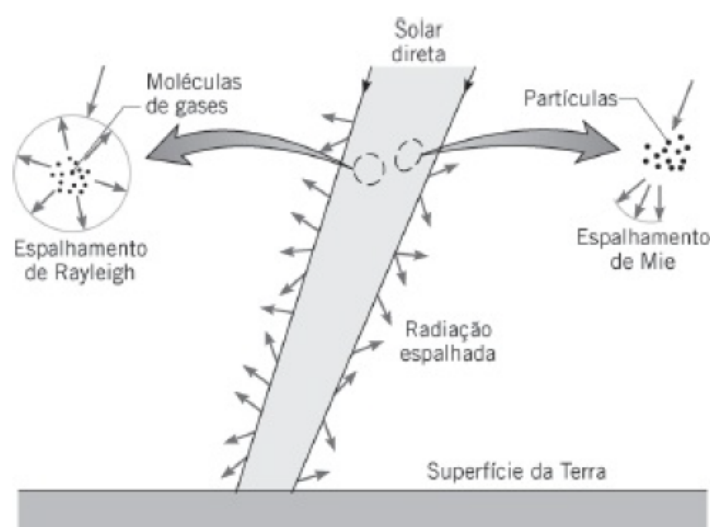


fonte: [Incropera et al. \(2014\)](#).

À medida que a radiação solar atravessa a atmosfera terrestre, seus constituintes gasosos promovem efeitos de absorção e espalhamento da radiação, afetando sua magnitude e suas distribuições espectral e direcional. Conforme ilustrado na [Figura 3](#), os gases atmosféricos ozônio ( $O_3$ ), oxigênio ( $O_2$ ), carbônico ( $CO_2$ ), além de vapor d'água ( $H_2O$ ) absorvem a radiação solar em determinadas faixas de comprimento de onda. Segundo [Incropera et al. \(2014\)](#), a absorção pelo ozônio é mais forte na região UV, proporcionando uma atenuação considerável em comprimentos de onda abaixo de 0,4  $\mu\text{m}$  e uma atenuação completa abaixo de 0,3  $\mu\text{m}$ .

Os efeitos de espalhamento redirecionam os raios solares, impactando na radiação que atinge a superfície terrestre. Os dois fenômenos de espalhamento principais são: o *espalhamento de Rayleigh* (ou *molecular*) e o *espalhamento de Mie*, como mostra a [Figura 5](#). O primeiro é causado por moléculas muito pequenas de gases e ocorre “quando a razão entre o diâmetro efetivo da molécula e o comprimento de onda da radiação,  $\pi D/\lambda$ , é muito menor do que a unidade e proporciona um espalhamento praticamente uniforme da radiação em todas as direções” ([INCROPERA et al., 2014](#)). Já o espalhamento de Mie é provocado por partículas maiores de fuligem e de poeira e ocorre quando a razão mencionada anteriormente é aproximadamente unitária e está concentrada na direção dos raios incidentes. Diferentemente do espalhamento de Rayleigh, a radiação de espalhamento Mie atinge a superfície da Terra em direções próximas às dos raios solares.

Figura 5 – Espalhamento da radiação solar na atmosfera terrestre.



fonte: [Incropera et al. \(2014\)](#).

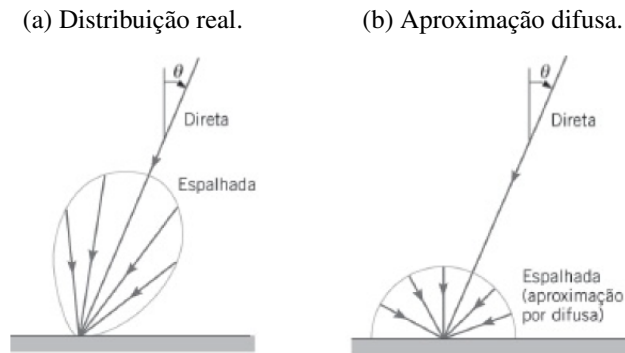
Considerando o valor médio na superfície e no tempo de  $342 \text{ W/m}^2$  da irradiação solar no limite externo da atmosfera terrestre, o espalhamento de Rayleigh é o principal responsável pela reflexão de  $77 \text{ W/m}^2$  de volta para o espaço, enquanto  $67 \text{ W/m}^2$  são absorvidos por fuligem, poeira e nuvens, aquecendo a atmosfera ([INCROPERA et al., 2014](#)). A parcela restante da irradiação solar ( $198 \text{ W/m}^2$ ) atinge a superfície do solo.

Além disso, a irradiação solar atingindo a superfície terrestre não é uniforme no que diz respeito à sua distribuição direcional, como apresenta a [Figura 6](#). Uma parcela da radiação solar que atravessa a atmosfera não é espalhada nem absorvida, mantendo a direção do ângulo de zênite, sendo conhecida como *radiação direta*. A radiação espalhada pelos fenômenos citados anteriormente incide na superfície terrestre a partir de todas as direções, sendo sua intensidade maior nas direções próximas à da radiação direta. Essa parcela é conhecida como *radiação espalhada*, e frequentemente é aproximada como sendo independente da direção, ou seja, *difusa*.

Em dias claros, a radiação espalhada compreende cerca de 10% da irradiação solar terrestre. Já em dias nublados (ou encobertos), quase toda a irradiação solar que atinge a superfície da Terra é espalhada. Dessa forma, a performance das células fotovoltaicas, seja envolvendo a técnica de concentração solar ou não, é impactada pela natureza direcional da radiação. Por exemplo, para a tecnologia CPV,

praticamente apenas a radiação direta é relevante para fins de geração de energia, devido ao ângulo de admissão, conforme será melhor abordado na Seção 2.3.

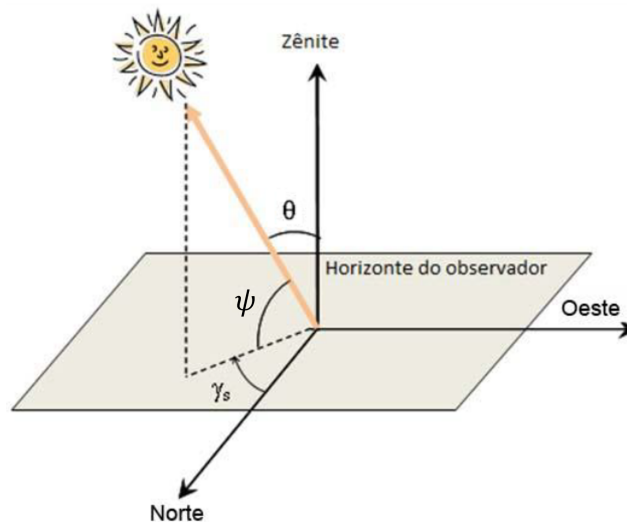
Figura 6 – Distribuição direcional da radiação solar na superfície da Terra.



fonte: [Incropera et al. \(2014\)](#).

Por fim, além do ângulo de zênite, outras duas componentes direcionais dos raios solares são relevantes de se mencionar, ilustradas na [Figura 7](#).

Figura 7 – Ângulos  $\theta$ ,  $\psi$  e  $\gamma_s$  da Geometria Solar.



fonte: [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

A Altura ou Elevação Solar,  $\psi$ , é definida como o “ângulo compreendido entre os raios do Sol e a projeção dos mesmos (sic) sobre o plano horizontal (horizonte do observador)” ([PINHO; GALDINO, 2014](#)). É possível constatar que os ângulos de zênite e de elevação solar são complementares.

O último é o ângulo azimutal do Sol,  $\gamma_s$ , conhecido também como azimute solar. Este é definido segundo [Pinho e Galdino \(2014\)](#) como o ângulo entre a projeção dos raios solares no plano horizontal e a direção Norte-Sul (horizonte do observador). O deslocamento angular se inicia a partir do Norte geográfico, e por convenção é positivo quando a projeção se encontrar à direita do Sul (a Leste) e negativo quando se encontrar à esquerda (a Oeste). Por essa definição, pode-se concluir que o intervalo de valores desse ângulo se encontra de:  $-180^\circ \leq \gamma_s \leq 180^\circ$ .

## 2.2 ENERGIA SOLAR FOTOVOLTAICA

A energia solar fotovoltaica é a energia obtida “através da conversão direta da luz em eletricidade (Efeito Fotovoltaico), sendo a célula fotovoltaica, um dispositivo fabricado com material semicondutor, a unidade fundamental desse processo de conversão” (PINHO; GALDINO, 2014).

A tecnologia fotovoltaica que é considerada consolidada e que possui a melhor eficiência a nível comercial são as células de silício monocristalino (m-Si) e silício policristalino (p-Si). Essas duas cadeias de produção representam mais de 85% do mercado e são classificadas como a primeira geração da tecnologia fotovoltaica.

A segunda geração é comercialmente conhecida como *filmes finos*, sendo dividida em três cadeias produtivas:

- silício amorfo (a-Si);
- disseleneto de cobre e índio (CIS) ou disseleneto de cobre, índio e gálio (CIGS);
- telureto de cádmio (CdTe).

Alguns obstáculos para a consolidação comercial desta geração incluem limitações na disponibilidade dos materiais, vida útil, rendimento das células e, para o cádmio, sua toxicidade. Além disso, esta geração apresenta menor eficiência que a primeira.

A última geração, porém não menos importante, é a terceira, a qual ainda se encontra em fase de pesquisa e desenvolvimento, testes e produção em pequena escala. Segundo Pinho e Galdino (2014) a terceira geração é dividida em três cadeias produtivas: célula fotovoltaica multijunção e célula fotovoltaica para concentração (CPV - *Concentrated Photovoltaics*), células sensibilizadas por corante (DSSC - *Dye-Sensitized Solar Cell*) e células orgânicas ou poliméricas (OPV - *Organic Photovoltaics*). Vale destacar que a tecnologia CPV é promissora por atingir altas eficiências em comparação com as células de silício cristalino, sendo o foco deste trabalho.

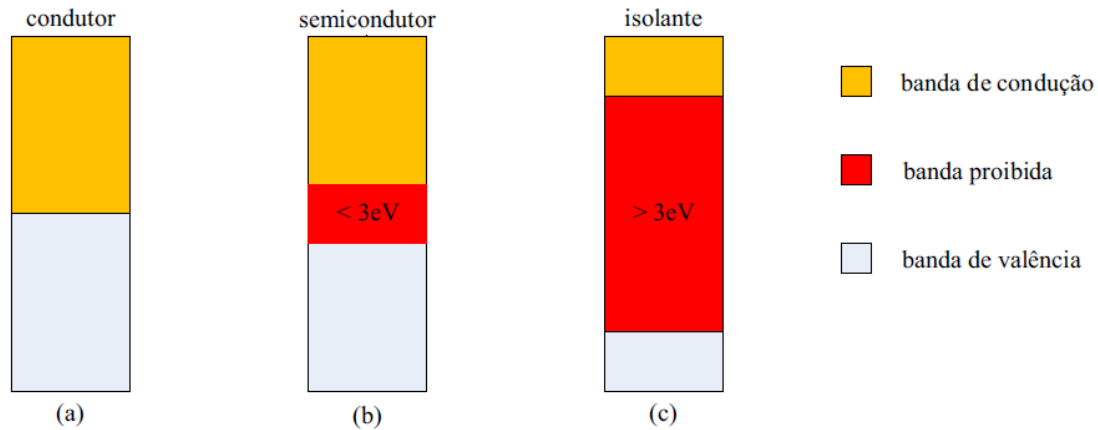
### 2.2.1 O Efeito Fotovoltaico

Antes de introduzir o princípio de funcionamento do Efeito Fotovoltaico, é importante caracterizar os materiais nos quais este efeito ocorre: os semicondutores.

Os materiais semicondutores se caracterizam por “possuírem uma banda de valência totalmente preenchida por elétrons e uma banda de condução vazia (sem elétrons) na temperatura do zero absoluto (0 K). Assim sendo, um semicondutor comporta-se como um isolante a 0 K” (PINHO; GALDINO, 2014). Os principais elementos semicondutores incluem Carbono (C), Silício (Si), Germânio (Ge), Arsênio (As), Fósforo (P), Selênio (Se) e Telúrio (Te).

A diferença dos materiais isolantes, condutores e semicondutores em relação à sua estrutura de separação de bandas de energia está representada na Figura 8. A separação entre as duas bandas de energia permitidas dos materiais semicondutores, conhecida como banda proibida (*bandgap*, ou simplesmente *gap*) e representada por  $E_g$ , pode atingir até 3 eV. Nos materiais isolantes, este *bandgap* supera o valor de 3 eV.

Figura 8 – Estrutura de bandas de energia em (a) condutores, (b) semicondutores e (c) isolantes.



fonte: Pinho e Galdino (2014).

A Tabela 1 apresenta os valores do *bandgap*,  $E_g$ , para diversos materiais semicondutores. Note que as bandas são, na realidade, compostas por um conjunto de inúmeros valores discretos permitidos de energia bastante próximos, por isso muitas vezes são consideradas como contínuas (PINHO; GALDINO, 2014).

Tabela 1 – Bandas proibidas  $E_g$  para diversos materiais semicondutores à temperatura de 300 K.

Material	Grupo	$E_g$ (eV)	Material	Grupo	$E_g$ (eV)
Si	elemento	1,12	GaP	III-V	2,26
Ge	elemento	0,66	CdS	II-IV	2,42
GaAs	III-V	1,43	PbS	II-IV	0,35
InSb	III-V	0,18	PbTe	II-IV	0,30
InP	III-V	1,35	CdTe	II-IV	1,45

fonte: Pinho e Galdino (2014).

Uma consequência das bandas de energia nos materiais semicondutores é o aumento da condutividade com a temperatura, proporcionado pela excitação térmica de elétrons da banda de valência para a banda de condução, deixando na banda de valência as lacunas, as quais são os portadores de carga positiva. Vale mencionar que além da geração térmica, é possível também gerar portadores por meio de energia cinética de partículas que atinjam o material, ou como é chamada, a ionização por impacto.

No caso das células fotovoltaicas, a propriedade fundamental dos semicondutores que viabiliza a geração de energia é a possibilidade de fótons incidentes no material, com energia superior à  $E_g$  do *gap*, também gerarem pares elétron-lacuna, como mostra a Figura 9.

Destaca-se que a energia de um fóton é associada à cor da luz, de acordo com a equação (2).

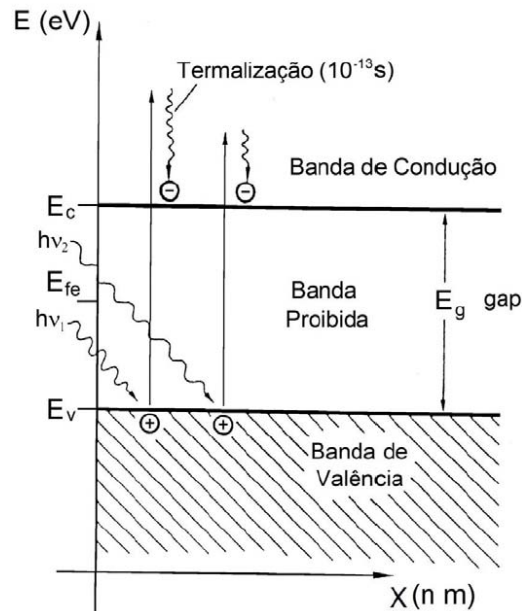
$$E_f = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} \quad (2)$$

Sendo:  $E_f$  é a energia do fóton (J);  $h$  a constante de Planck (J.s);  $\nu$  a frequência da luz (Hz);  $c$  a velocidade da luz no vácuo;  $\lambda$  o comprimento de onda.

Ainda sobre a Figura 9, é possível constatar que o valor da energia do *gap*,  $E_g$ , é a diferença entre o nível inferior da energia da banda de condução,  $E_c$  e o nível máximo de energia na banda de valência,  $E_v$ . A absorção de fótons com energia superior ao *bandgap* resulta em dissipação da energia

em excesso ( $h\nu - E_g$ ) como calor no material, no fenômeno denominado termalização. O nível de energia de Fermi,  $E_{fe}$ , corresponde ao nível médio de energia dos portadores no material e, para os semicondutores intrínsecos, se situa no meio da banda proibida.

Figura 9 – Geração de pares elétron-lacuna pela incidência de fótons no material semiconductor.

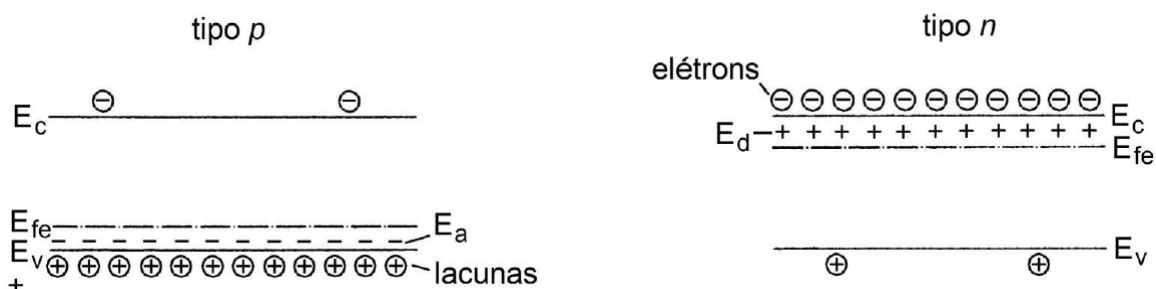


fonte: [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

Os elétrons e lacunas fotogerados podem mover-se dentro do material e aumentam sua condutividade elétrica, o que é denominado efeito fotocondutivo. Porém, de forma a se conseguir aproveitar corrente e tensão elétricas é preciso aplicar um campo elétrico, de modo a separar os portadores. Isso é obtido através da chamada junção *pn*. A junção *pn* é alcançada pela introdução controlada de impurezas no semiconductor, ou seja, uma dopagem. A dopagem consiste na “introdução de pequenas quantidades de outros elementos, denominados impurezas ou dopantes, que mudam drasticamente as propriedades elétricas do material intrínseco (material sem dopagem, denominado de tipo *i*)” ([PINHO; GALDINO, 2014](#)).

Os dopantes (ou impurezas) tipo *n* são chamadas de impurezas doadoras de elétrons. Já os dopantes (ou impurezas) tipo *p* são chamadas de impurezas aceitadoras de elétrons. A [Figura 10](#) ilustra a diferença entre os níveis de energia em materiais semicondutores tipo *n* e *p*.

Figura 10 – Níveis de energia em materiais tipo *n* e *p*.



fonte: [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

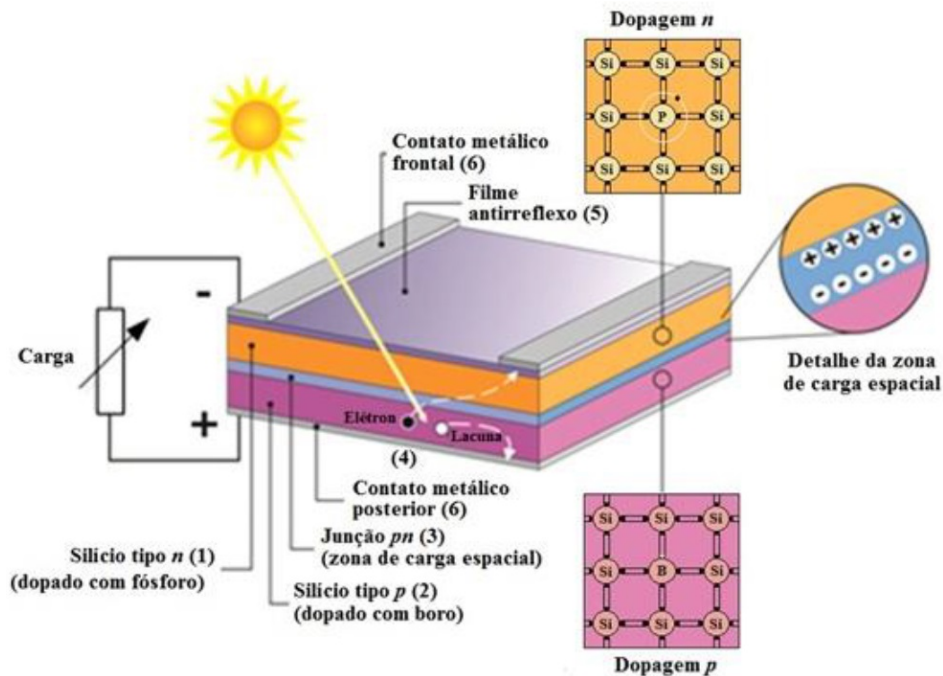
Dessa forma, se na metade de uma lâmina de Silício (Si) inicialmente puro forem introduzidas impurezas tipo  $p$ , por exemplo, átomos de Boro (B), e na outra metade forem introduzidas impurezas tipo  $n$ , por exemplo, átomos de Fósforo (P), será formada uma junção  $pn$ , o que é uma estrutura típica de um diodo retificador semiconductor. A diferença de potencial na junção  $pn$  sem polarização externa (em equilíbrio), em função da temperatura, é apresentada na equação (3).

$$V_0(T) \cong \frac{k \cdot T}{q} \cdot \ln \left( \frac{N_d \cdot N_a}{n_i^2} \right) \quad (3)$$

Sendo:  $V_0(T)$  a diferença de potencial na junção;  $n_i$  a concentração de portadores intrínsecos no material;  $N_d$  a concentração do dopante tipo  $n$ ;  $N_a$  a concentração do dopante tipo  $p$ ;  $q$  a carga do elétron;  $k$  a constante de Boltzmann; e  $T$  a temperatura absoluta (K).

A [Figura 11](#) mostra a estrutura física de uma junção  $pn$  de uma célula fotovoltaica.

Figura 11 – Estrutura básica de uma célula fotovoltaica de silício.



fonte: [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

Realizada a caracterização dos materiais semicondutores e a introdução do processo de dopagem, é possível abordar o conceito do efeito fotovoltaico definido por [Pinho e Galdino \(2014\)](#). Se um material semiconductor dotado de uma junção  $pn$  for exposto a fótons com energia maior que a do  $gap$  ( $E_f > E_g$ ), ocorrerá a fotogeração de pares elétron-lacuna. Entretanto, se esses portadores de carga forem gerados dentro da região de carga espacial, então serão separados pelo campo elétrico, sendo os elétrons acelerados para o lado  $n$  e as lacunas para o lado  $p$ , gerando assim uma corrente elétrica através da junção no sentido da região  $n$  para a região  $p$ .

Por outro lado, se a fotogeração dos portadores de carga ocorrer fora da zona de carga espacial, então os portadores minoritários deverão ter um tempo de vida ou comprimento de difusão mínimo para eventualmente atingirem a junção  $pn$  e serem coletados, sem que ocorra recombinação.

A separação dos portadores de carga pela junção  $pn$  dá origem ao efeito fotovoltaico, que é “a

conversão de energia luminosa em energia elétrica associada a uma corrente elétrica e uma diferença de potencial” (PINHO; GALDINO, 2014). Vale destacar que este efeito pode ocorrer em qualquer diodo semiconductor que for exposto à radiação, o que torna as células fotovoltaicas essencialmente diodos de área elevada otimizados para o aproveitamento do efeito fotovoltaico.

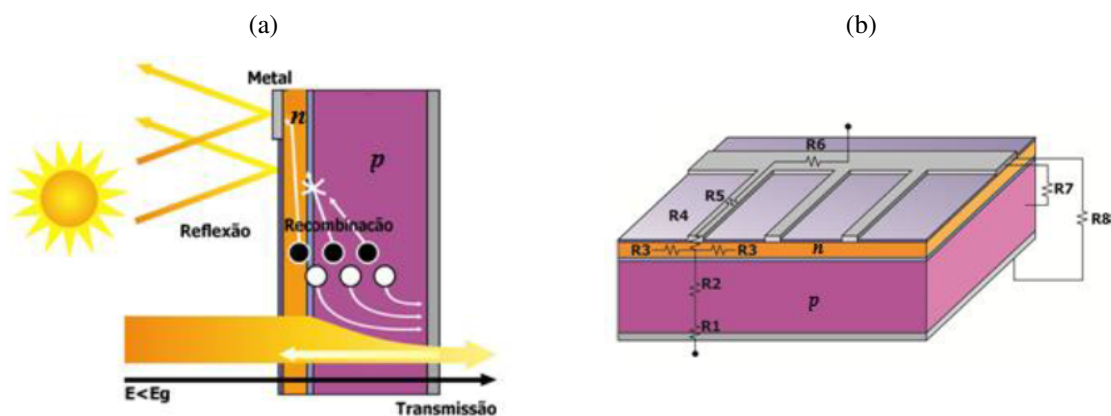
Alguns fatores limitam a eficiência de conversão de uma célula fotovoltaica, sendo eles:

1. reflexão na superfície frontal;
2. sombra proporcionada pela área da malha metálica na face frontal;
3. absorção nula de fótons de energia menor que a do gap ( $E_f < E_g$ );
4. baixa probabilidade de coleta, pela junção  $pn$ , dos portadores de carga gerados fora da zona de carga espacial;
5. recombinação dos portadores de carga (*reencontro* dos elétrons e lacunas em impurezas e defeitos do material);
6. resistência elétrica no dispositivo e nos contatos metal-semicondutor, assim como possíveis caminhos de fuga da corrente elétrica.

A Figura 12 apresenta de forma esquemática os fatores limitantes citados anteriormente, sendo que a Figura 12a ilustra as perdas por reflexão, transmissão, recombinação de portadores de carga minoritários e sombreamento proporcionado pela malha metálica frontal. A Figura 12b, por sua vez, apresenta as perdas por resistência:

- em série, nas junções metal-semicondutor (R4 e R1) existentes nos contatos metálicos frontal e traseiro; nas trilhas metálicas (R5 e R6) e nas regiões  $n$  (R3) e  $p$  (R2);
- em paralelo, entre o contato metálico frontal e a região tipo  $p$  (R7), e entre os contatos metálicos frontal e traseiro (R8).

Figura 12 – Fatores que limitam a eficiência de uma célula fotovoltaica.



fonte: Pinho e Galdino (2014).

### 2.2.2 Características Elétricas das Células Fotovoltaicas

Dentre as características elétricas das células fotovoltaicas, a Curva I-V merece destaque levando em conta o escopo deste trabalho. Segundo [Pinho e Galdino \(2014\)](#), a corrente elétrica em uma célula fotovoltaica pode ser considerada como a soma da corrente de uma junção *pn* no escuro (diodo semiconductor) com a corrente gerada pelos fótons absorvidos da radiação solar.

Essa corrente em função da tensão no dispositivo, denominada de curva I-V, pode ser descrita pela equação (4), derivada da Equação de Shockley, do diodo ideal:

$$I = I_L - I_0 \left[ \exp\left(\frac{qV}{i_D k T}\right) - 1 \right] \quad (4)$$

Sendo:  $I_L$  a corrente fotogerada;  $I_0$  a corrente de saturação reversa do diodo (A);  $i_D$  o fator de idealidade do diodo, número adimensional normalmente entre 1 e 2, obtido experimentalmente;  $q$  a carga do elétron;  $k$  a constante de Boltzmann;  $T$  a temperatura absoluta (K). Observação: no escuro,  $I_L = 0$ , ou seja, a célula fotovoltaica se comporta de forma idêntica a um diodo.

A equação (4) utiliza a corrente de saturação reversa,  $I_0$ , e seu cálculo é dado pela equação (5).

$$I_0 = qAn_i^2 \cdot \left( \frac{D_p}{L_p N_d} + \frac{D_n}{L_n N_a} \right) \quad (5)$$

Sendo:  $A$  a área da seção reta da junção (área da célula);  $n_i$  a concentração de portadores intrínsecos no material;  $N_d, N_a$  a concentração dos dopantes tipo *n* e tipo *p*, respectivamente;  $D_p, D_n$  os coeficientes de difusão de lacunas e elétrons, respectivamente;  $L_p, L_n$  os comprimentos de difusão de lacunas e elétrons;  $q$  a carga do elétron.

Vale destacar que a equação (5) apresenta a forma teórica de se calcular a corrente de saturação reversa. Ela também pode ser determinada experimentalmente aplicando uma tensão de circuito aberto, definida na equação (6), à célula no escuro, ou obtida de forma numérica, por meio de ajuste de uma curva experimental medida.

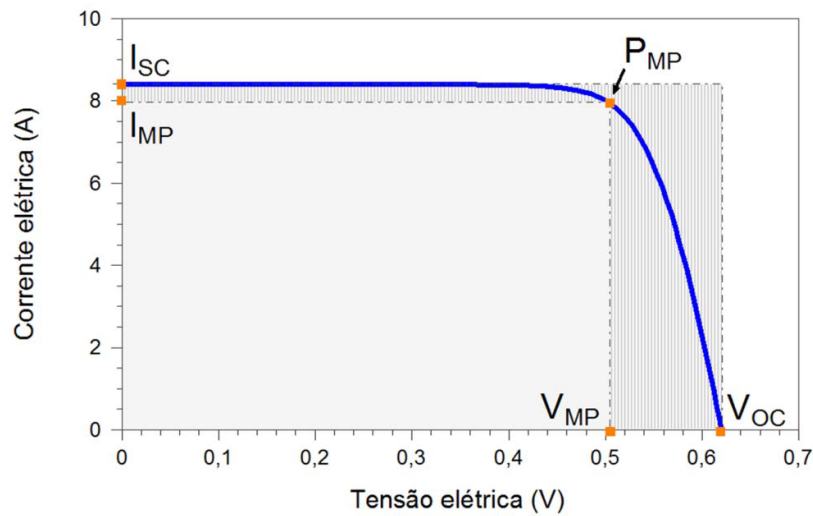
A [Figura 13](#) apresenta uma curva I-V típica de uma célula fotovoltaica de silício (Si). Foram destacados os principais parâmetros elétricos, sendo eles:  $I_{SC}$  a corrente elétrica de curto-circuito,  $V_{OC}$  a tensão de circuito aberto,  $P_{MP}$  a potência máxima ou de pico,  $I_{MP}$  e  $V_{MP}$ , respectivamente, a corrente e a tensão no ponto de potência máxima.

A curva I-V apresentada na [Figura 13](#) permite a determinação dos parâmetros elétricos que caracterizam as células fotovoltaicas. Desses parâmetros, alguns são válidos de serem apresentados para os fins deste trabalho, sendo eles definidos segundo [Pinho e Galdino \(2014\)](#):

- **Tensão de circuito aberto** ( $V_{OC}$ ): é a tensão entre os terminais de uma célula fotovoltaica quando eles se encontram em aberto e é a máxima tensão que uma célula fotovoltaica pode produzir. Definida pela equação (6).

$$V_{OC} = \frac{kT}{q} \cdot \ln\left(\frac{I_L}{I_0} + 1\right) \quad (6)$$

Figura 13 – Corrente elétrica em função da diferença de potencial aplicada em uma célula fotovoltaica de silício de 156 mm x 156 mm, sob condições-padrão de ensaio.



fonte: [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

- **Corrente de curto-circuito** ( $I_{SC}$ ): é a máxima corrente que se pode obter e é medida na célula fotovoltaica quando a tensão elétrica em seus terminais é igual a zero.
- **Fator de preenchimento** ( $FF$ ): é a razão máxima entre a potência da célula e o produto da corrente de curto-circuito com a tensão de circuito aberto. Definido pela equação (7).

$$FF = \frac{V_{MP} I_{MP}}{V_{OC} I_{SC}} \quad (7)$$

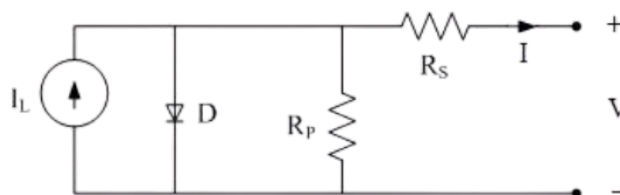
- **Eficiência** ( $\eta$ ): parâmetro que define quão efetivo é o processo de conversão de energia solar em energia elétrica. Representa a relação entre a potência elétrica gerada pela célula fotovoltaica e a potência da energia solar incidente. Definida pela equação (8).

$$\eta = \frac{I_{SC} V_{OC} FF}{A_c G_c} \cdot 100\% = \frac{P_{MP}}{A_c G_c} \cdot 100\% \quad (8)$$

sendo  $A_c$  a área da célula e  $G_c$  a irradiância solar incidente.

O circuito equivalente para uma célula fotovoltaica é apresentado na [Figura 14](#), onde o diodo,  $D$ , representa a participação da junção  $pn$  no escuro.  $R_s$  e  $R_p$  representam as resistências em série e paralelo.

Figura 14 – Circuito equivalente básico para uma célula fotovoltaica (modelo com um diodo).



fonte: [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

## 2.3 CONCENTRADORES FOTOVOLTAICOS

### 2.3.1 Introdução

No escopo da geração de energia solar fotovoltaica, uma das tecnologias usadas para aumentar sua eficiência são os concentradores fotovoltaicos (CPV).

Concentradores fotovoltaicos são dispositivos ópticos capazes de concentrar a luz solar em células fotovoltaicas de alta eficiência (e área reduzida). O custo dos materiais utilizados nesses concentradores é menor do que o custo de fabricação de novas células, ou seja, é possível produzir a mesma potência elétrica substituindo um aumento de área superficial de célula fotovoltaica por um (ou mais) dispositivos CPV, reduzindo os custos de geração de energia.

Os sistemas ópticos que compõem a tecnologia CPV envolvem lentes e espelhos (curvos ou planos). Além disso, os concentradores solares são classificados pelas suas propriedades ópticas, sendo a principal o fator de concentração.

O fator de concentração,  $X$ , é definido como “a razão entre o fluxo radiante médio que atinge uma superfície receptora ( $G_x$ ) e a irradiação hemisférica total sobre a superfície terrestre ( $G$ )” (KHAMOOSHI *et al.*, 2014). O fator de concentração também é conhecido como *número de sóis*, e sua razão está apresentada na equação (9).

$$X = \frac{G_x}{G} \quad (9)$$

A classificação baseada no fator de concentração é dividida em três grupos, conforme apresentado na Tabela 2.

Tabela 2 – Classificação dos concentradores fotovoltaicos baseada no fator de concentração.

<b>Categoria</b>	<b>Faixa de concentração</b>
Baixa concentração (LCPV)	$1 \leq X < 40$
Média concentração (MCPV)	$40 \leq X < 300$
Alta concentração (HCPV)	$300 \leq X \leq 2000$

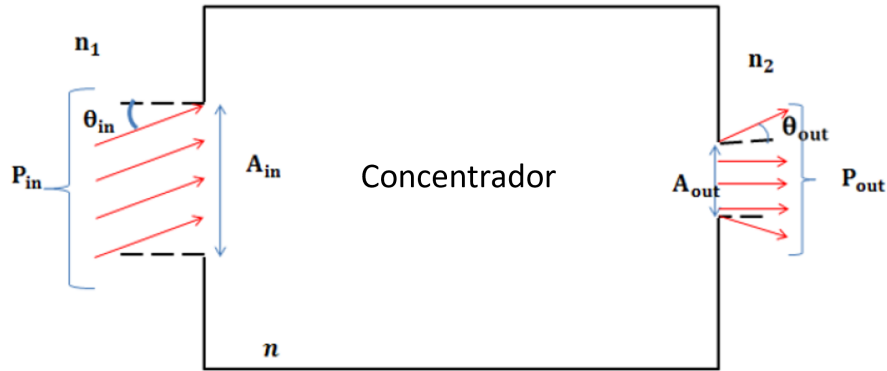
fonte: Khamooshi *et al.* (2014).

Cada uma das categorias mostradas envolve necessidades diferentes quanto aos sistemas de resfriamento e rastreamento das células fotovoltaicas mas, de modo geral, dispositivos de alta concentração (HCPV) necessitam de maior precisão no rastreamento da posição solar, resfriamento mais robusto (normalmente utilizando fluido refrigerante, por meio de convecção ativa) e custos de manufatura mais elevados em comparação aos sistemas de baixa concentração (LCPV). Dessa forma, é possível afirmar que os concentradores de baixa concentração são mais simples que os concentradores de alta concentração.

Uma forma alternativa de se definir o fator de concentração, diferentemente da equação (9), foi desenvolvida por Himer *et al.* (2020). Os autores definem o fator de concentração de acordo com a equação (10), a partir de um concentrador óptico genérico esquematizado na Figura 15.

$$X = \eta_o \times C_g \quad (10)$$

Figura 15 – Esquema de um concentrador óptico genérico.



fonte: [Himer et al. \(2020\)](#).

Sendo  $\eta_o$  a eficiência óptica do concentrador, dada pela equação (11):

$$\eta_o = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (11)$$

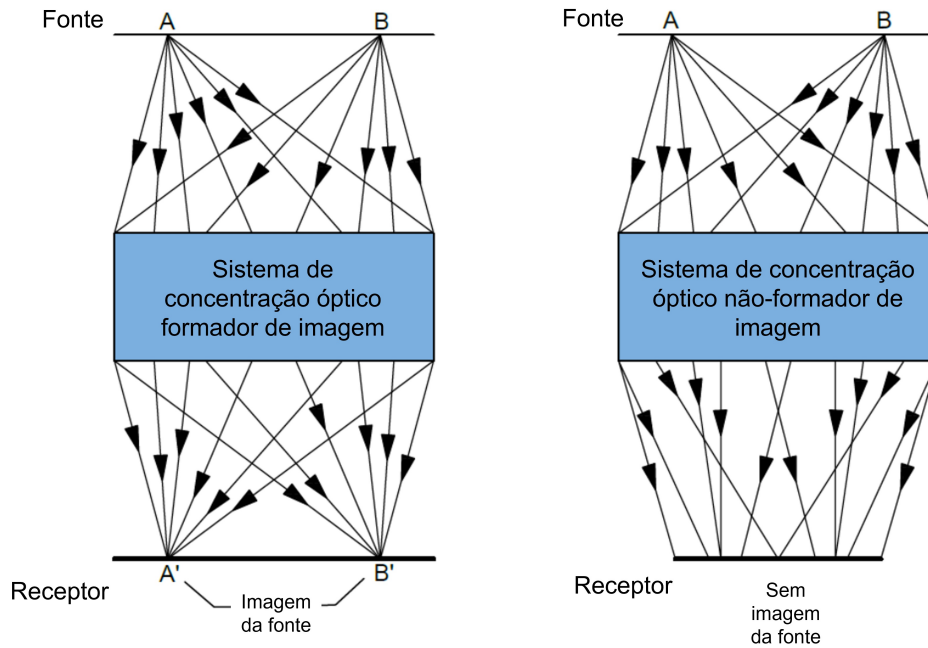
e  $C_g$  a concentração geométrica definida pela razão entre as superfícies de entrada e saída, apresentada na equação (12):

$$C_g = \frac{A_{in}}{A_{out}} = \frac{n_2 \operatorname{sen}\theta_{out}}{n_1 \operatorname{sen}\theta_{in}} \quad (12)$$

Na equação (11),  $P_{in}$  e  $P_{out}$  são as potências radiantes na entrada e na saída do concentrador, respectivamente. Na equação (12),  $A_{in}$  é a área de entrada,  $A_{out}$  a área de saída,  $\theta_{in}$  o ângulo de incidência na entrada do concentrador e  $\theta_{out}$  o ângulo de saída, definido como o ângulo entre a direção normal à superfície saída e o raio de luz resultante. Além disso,  $n_1$  e  $n_2$  são os índices de refração do meio na entrada e na saída, respectivamente.

Uma outra classificação é baseada na formação de imagem. Resumidamente, nos sistemas de concentração formadores de imagem (*imaging optical concentrators*) a posição dos pontos de origem da luz é conservada ao atravessar o concentrador óptico. Já nos concentradores que não formam imagem (*nonimaging optical concentrators*), não existe a conservação da posição original da fonte de luz quando ela atinge a superfície receptora. A [Figura 16](#) ilustra a diferença entre essas duas classes de concentradores.

Figura 16 – Comparação entre sistemas de concentração formadores e não-formadores de imagem.



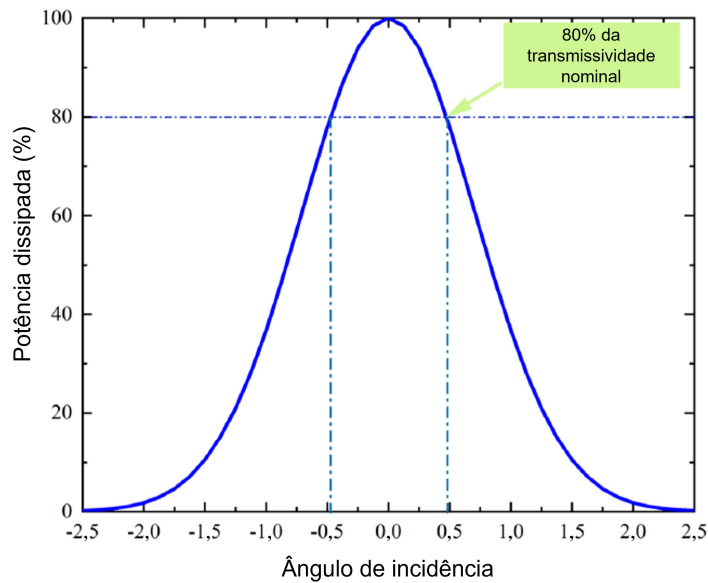
fonte: Madala (2016).

### 2.3.2 Principais parâmetros

Os concentradores fotovoltaicos (assim como outros dispositivos ópticos) apresentam alguns parâmetros que impactam em sua qualidade, custo e que podem vir a ser limitações para um uso comercial amplo. Himer *et al.* (2020) apresenta os principais, que são:

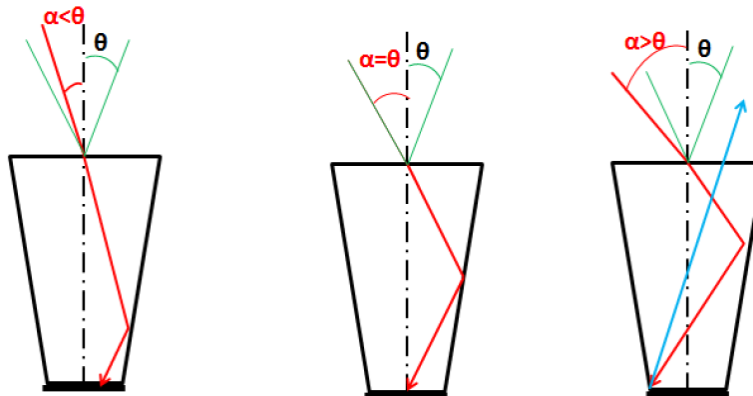
- **Ângulo de admissão do módulo fotovoltaico:** é a tolerância angular de um módulo fotovoltaico, caracterizada pelo desalinhamento entre a direção normal ao módulo e a direção do raio de luz incidente. Essa tolerância é definida como o valor angular máximo no qual o módulo pode ser rotacionado (em relação ao Sol) de modo a dissipar pelo menos 80% da potência nominal máxima ( $P_{MP}$ ) especificada, conforme ilustrado na Figura 17.
- **Ângulo de admissão de um sistema óptico:** é o ângulo máximo no qual um raio solar incidente consegue ser direcionado à superfície receptora. Conforme ilustra a Figura 18, para um dado ângulo de admissão  $\theta$ , raios de luz incidindo com um ângulo menor ou igual a  $\theta$  atingem o receptor, enquanto os outros são perdidos.
- **Uniformidade (homogeneidade) do fluxo radiante:** a uniformidade da irradiação atingindo a célula fotovoltaica é uma característica importante no desempenho da tecnologia CPV. Isso devido ao fato dos concentradores ópticos serem suscetíveis a formar um ponto de concentração de luz não uniforme (conhecido como *hot spot*). Estes pontos de concentração elevada levam a uma resposta não uniforme da célula fotovoltaica, traduzida em um decaimento na eficiência do sistema, e caso a magnitude de concentração no ponto seja muito elevada, pode haver inclusive degradação completa da célula. Além disso, os *hot spots* elevam a temperatura da célula, que conforme será abordado na Subseção 2.3.6, está associada à redução de sua eficiência. O cálculo da uniformidade, apresentado por Pham, Vu e Shin (2019), é dado pela equação (13).

Figura 17 – Potência elétrica teórica dissipada por um módulo em função do ângulo de incidência do raio de luz.



fonte: [Himer et al. \(2020\)](#).

Figura 18 – Direção dos raios solares em função do ângulo de incidência.



fonte: [Himer et al. \(2020\)](#).

$$U = 100 - \frac{\max - \min}{\text{average}} \times 100\% \quad (13)$$

Sendo *max* e *min* os valores máximo e mínimo, respectivamente, da irradiação atingindo a célula, em  $\text{W}/\text{m}^2$ , e *average* sendo o valor médio da irradiação solar em toda a superfície da célula fotovoltaica, também em  $\text{W}/\text{m}^2$ . A uniformidade ideal é de 100%.

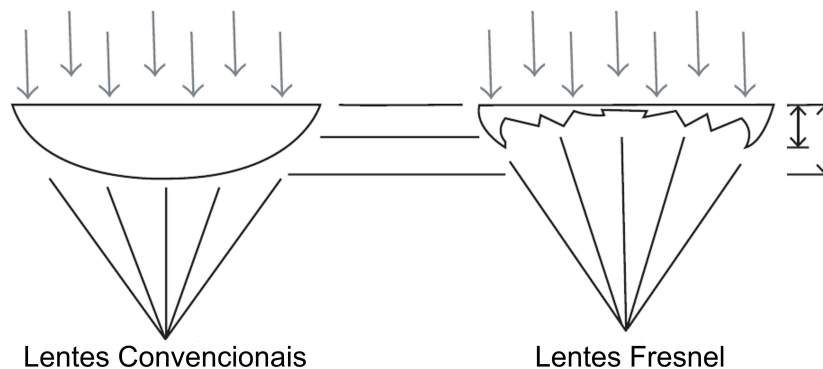
A seguir, serão apresentados os principais modelos de concentradores fotovoltaicos. São eles:

1. Lentes Fresnel;
2. Concentradores Parabólicos;
3. Concentradores Hiperbólicos.

### 2.3.3 Lentes Fresnel

Uma lente Fresnel é um “componente óptico plano no qual uma parcela do volume é retirada de modo que a superfície curva seja substituída por vários entalhes pequenos e concêntricos” (KHAMOOSHI *et al.*, 2014). Esses entalhes agem individualmente como um prisma, uma vez que cada um é aproximado por uma superfície plana que reflete a curvatura da lente convencional na correspondente posição. Dessa forma, o volume retirado pode ser entendido como um material em excesso (*bulk material*), uma vez que a lente Fresnel apresenta o mesmo comportamento óptico da lente convencional, porém com menos material e, conseqüentemente, mais leve. A Figura 19 apresenta uma comparação esquemática da lente convencional em relação à lente Fresnel.

Figura 19 – Comparação entre o formato de uma lente convencional e uma lente Fresnel.



fonte: Khamooshi *et al.* (2014).

As lentes Fresnel tornaram-se uma das melhores escolhas dentre os concentradores fotovoltaicos, de acordo com Khamooshi *et al.* (2014), justamente pelo fato de apresentarem um volume reduzido, serem leves e pela possibilidade de produção em massa com baixo custo. Quanto ao material, originalmente as lentes Fresnel eram feitas de vidro, até serem substituídas por polimetilmetacrilato (PMMA). O PMMA apresenta características ópticas quase idênticas às do vidro, incluindo boa transmissibilidade e resistência à radiação solar, tornando-o a escolha adequada de material para a fabricação de lentes Fresnel.

A concentração máxima do fluxo radiante é dado pela equação (14).

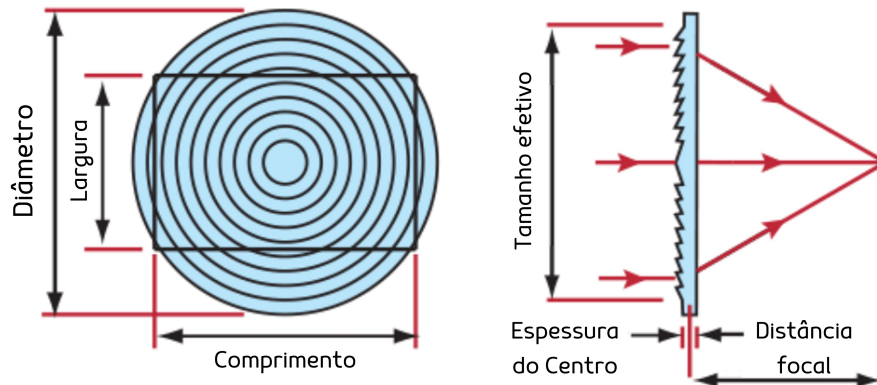
$$C_{max} = \frac{n^2}{\sin\gamma_S \sin\theta} \quad (14)$$

Sendo  $C_{max}$  a concentração máxima do fluxo radiante;  $n$  a componente real do índice de refração;  $\gamma_S$  o ângulo de admissão ao longo do plano azimutal; e  $\theta$  o ângulo de zênite.

Os dois principais tipos de lentes Fresnel são as circulares e as lineares. A Figura 20 ilustra um esquema de uma lente Fresnel circular, bem como alguns de seus principais parâmetros ópticos e geométricos.

Como pode ser constatado pela Figura 20, lentes Fresnel do tipo circular concentram a luz solar em um ponto (chamado de ponto focal), e a distância da lente até esse ponto é chamada de distância focal (*focal length*). Dessa forma, lentes desse modelo também são conhecidas como lentes Fresnel tipo ponto-focal (*point-focus Fresnel lens*).

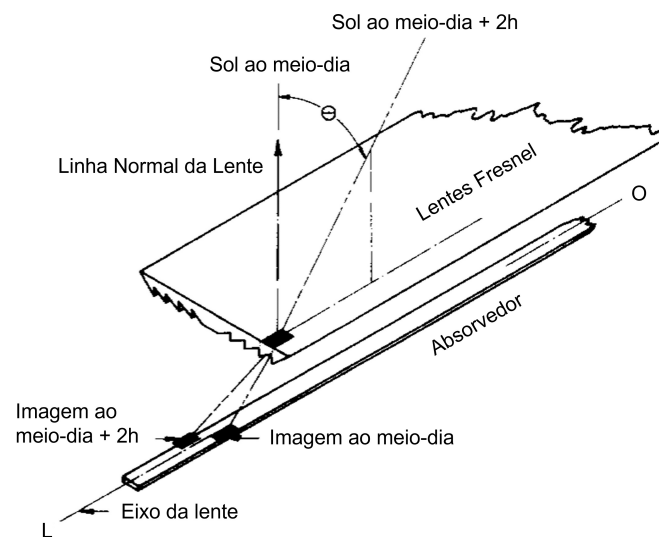
Figura 20 – Modelo esquemático de uma lente Fresnel do tipo circular.



fonte: [Edmundo Optics \(2012\)](#).

As lentes Fresnel do tipo linear, por sua vez, não concentram os raios solares em um único ponto, mas sim em infinitos pontos ao longo de uma direção paralela ao eixo axial da lente. A [Figura 21](#) ilustra um exemplo de uma lente Fresnel linear e o caminho dos raios de luz para dois horários do dia.

Figura 21 – Modelo de uma lente Fresnel linear indicando o caminho dos raios solares para dois horários diferentes do dia.



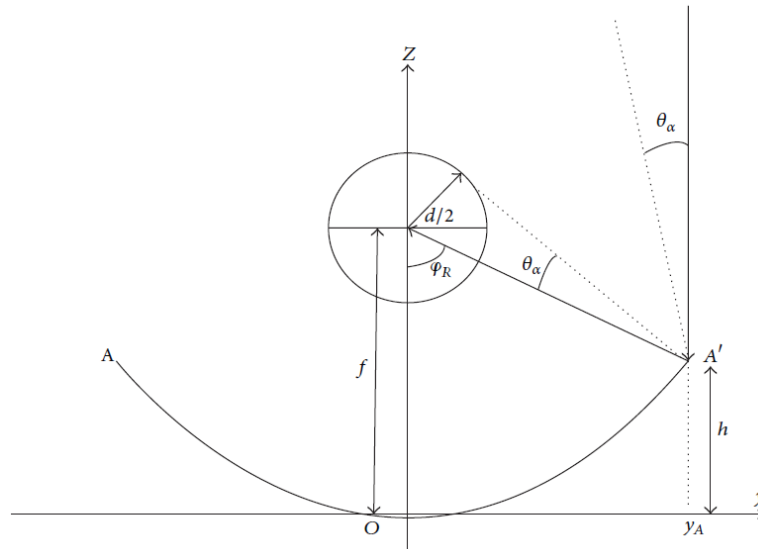
fonte: [Nelson, Evans e Bansal \(1975\)](#).

### 2.3.4 Concentradores Parabólicos

O coletor solar em forma de calha parabólica (*solar parabolic trough collector*) é uma das tecnologias mais reconhecidas devido ao seu baixo custo por unidade. Nesses concentradores, o espelho em forma de parábola concentra a luz do sol na superfície receptora, posicionada no ponto focal da parábola ([KHAMOOSHI et al., 2014](#)). A performance dos concentradores parabólicos é afetada por fatores como a refletividade do espelho; o ângulo de incidência da luz; e a absorvidade da superfície receptora. A [Figura 22](#) apresenta uma visualização esquemática de um concentrador parabólico, assim como seus parâmetros geométricos.

A concentração do fluxo radiante em um concentrador parabólico é dado pela equação [\(15\)](#).

Figura 22 – Modelo esquemático de um concentrador parabólico e seus parâmetros geométricos.



fonte: [Khamooshi et al. \(2014\)](#).

$$C = \frac{\sin \varphi_R}{\pi \sin \theta_\alpha} \quad (15)$$

$$\tan\left(\frac{\varphi_R}{2}\right) = \frac{2y_s}{4f} = \frac{y_s}{2f}$$

Sendo  $\theta_\alpha$  a metade do ângulo de admissão;  $\varphi_R$  o ângulo de borda (ângulo entre o eixo do concentrador e a borda do mesmo); e  $f$  a distância focal.

A [Figura 23](#) ilustra um exemplo de concentrador solar parabólico em operação.

Figura 23 – Exemplo de um concentrador solar parabólico em operação.

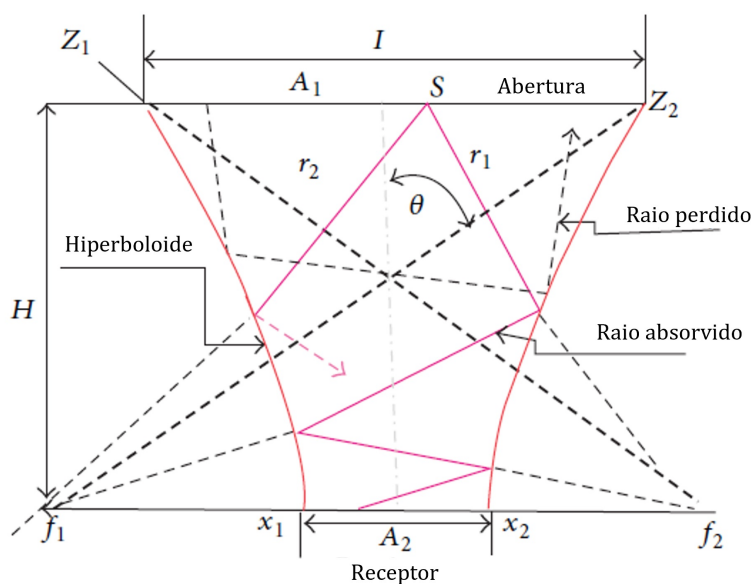


fonte: [SOLARTRON Energy \(2016\)](#).

### 2.3.5 Concentradores Hiperbólicos

Concentradores hiperbólicos são, como o próprio nome diz, coletores solares em forma de hiperboloide. Nesses sistemas, os raios solares que atingem a superfície do concentrador podem ser direcionados para a superfície receptora ou serem refletidos para fora. Também é chamado de concentrador solar hiperbólico elíptico. A [Figura 24](#) mostra uma vista 2D esquemática de um concentrador hiperbólico.

Figura 24 – Vista 2D esquemática de um concentrador solar hiperbólico evidenciando possíveis trajetos de raios incidentes.



fonte: [Khamooshi et al. \(2014\)](#).

A vantagem desse tipo de concentrador é que ele é bastante compacto, uma vez que apenas uma versão truncada (reduzida por um corte) é necessária. Por conta desse fator, o concentrador hiperbólico é usado principalmente como concentrador secundário ([KHAMOOSHI et al., 2014](#)).

A equação [\(16\)](#), desenvolvida por [Ali et al. \(2014\)](#) apresenta a razão de concentração geométrica para concentradores hiperbólicos.

$$CR = \frac{A_{in}}{A_{out}} \quad (16)$$

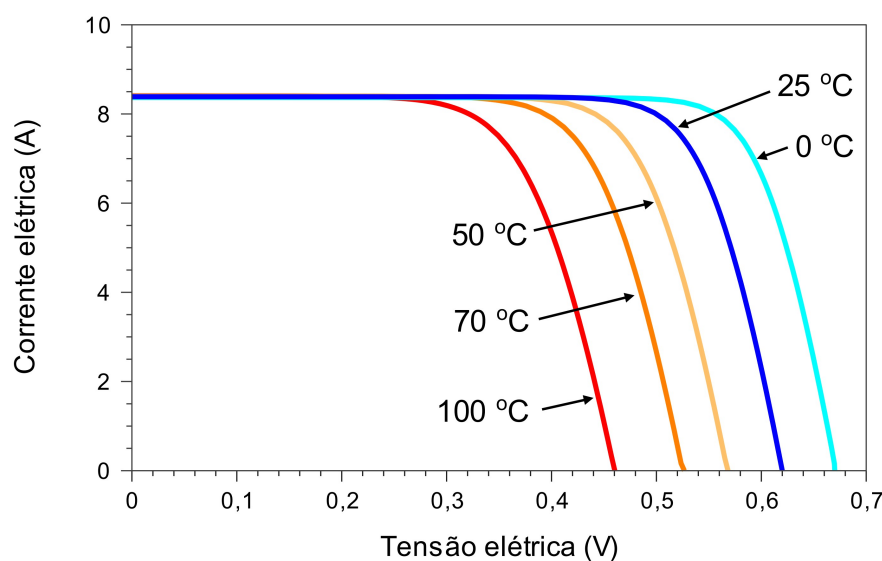
Sendo  $A_{in}$  a área de abertura (por onde entram os raios solares); e  $A_{out}$  a área receptora (superfície receptora atingida pelos raios solares).

### 2.3.6 Resfriamento

Durante o funcionamento de células fotovoltaicas de concentração, a temperatura é um dos principais fatores que podem afetar sua eficiência. Temperaturas elevadas e/ou uma distribuição não uniforme de temperatura sobre a célula fazem com que sua eficiência diminua. Além disso, se os limites técnicos de temperatura do material forem excedidos, pode haver degradação da célula e falha.

A [Figura 25](#) apresenta as curvas I-V de uma célula de silício cristalino sob diferentes temperaturas de operação. É possível constatar que conforme a temperatura aumenta, a tensão elétrica sobre a célula diminui. Pela equação [\(8\)](#), a diminuição da tensão elétrica reduz a eficiência.

Figura 25 – Influência da temperatura da célula fotovoltaica na curva I-V (irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>).



fonte: [Pinho e Galdino \(2014\)](#).

Dessa forma, um sistema de resfriamento se faz muitas vezes necessário de modo a manter a temperatura ideal de operação das células fotovoltaicas. Existem dois modos de resfriamento de sistemas fotovoltaicos: passivo e ativo.

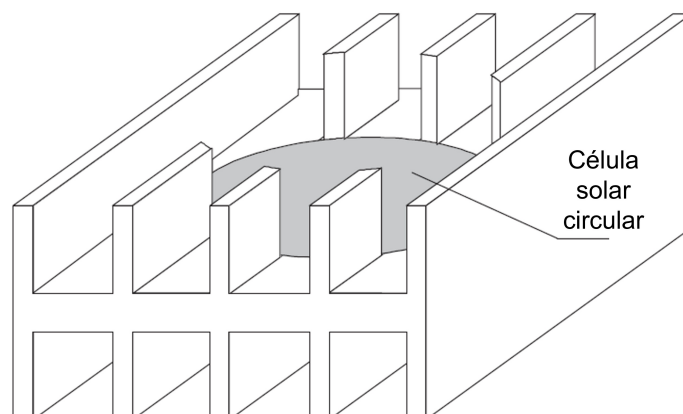
No resfriamento passivo, a célula fotovoltaica é alocada em um substrato cerâmico revestido, de elevada condutividade térmica. O material cerâmico também fornece isolamento elétrico. O principal modo de transferência de calor utilizado nesse sistema é a convecção natural, sendo o calor transferido ao ambiente. De modo geral, os dissipadores de calor passivos são mais indicados para os concentradores fotovoltaicos de baixa concentração (LCPV).

De forma a aumentar as trocas térmicas nesses sistemas, um parâmetro muito relevante é a área superficial de contato com o meio, por onde ocorrerá a transferência de calor. Portanto, é muito frequente a adoção de sistema de aletas metálicas nos dispositivos de resfriamento passivo. A [Figura 26](#) apresenta um dissipador de calor passivo proposto por [Edenburn \(1981\)](#) para uma única célula que utiliza sistema de aletas.

Em contrapartida, no resfriamento ativo um fluido refrigerante é inserido dentro de um ciclo térmico, no qual retira calor das células fotovoltaicas e fornece ao ambiente através de um trocador de calor (normalmente, um condensador). Uma vez que o fluido circula dentro de um condutor, o modo de transferência de calor principal é a convecção forçada.

A tecnologia mais popular de resfriamento ativo para células fotovoltaicas de concentração são os *heat pipes* (ou dissipadores de calor tubulares). Um *heat pipe* é um dispositivo à vácuo que consiste em um fluido de trabalho e uma estrutura de pavio (*wick structure*). O fluido de trabalho transfere o calor rejeitado pelas células para o ambiente através de processos de condensação ([KHAMOOSHI et al., 2014](#)). Os materiais mais comuns dos *heat pipes* são alumínio e cobre.

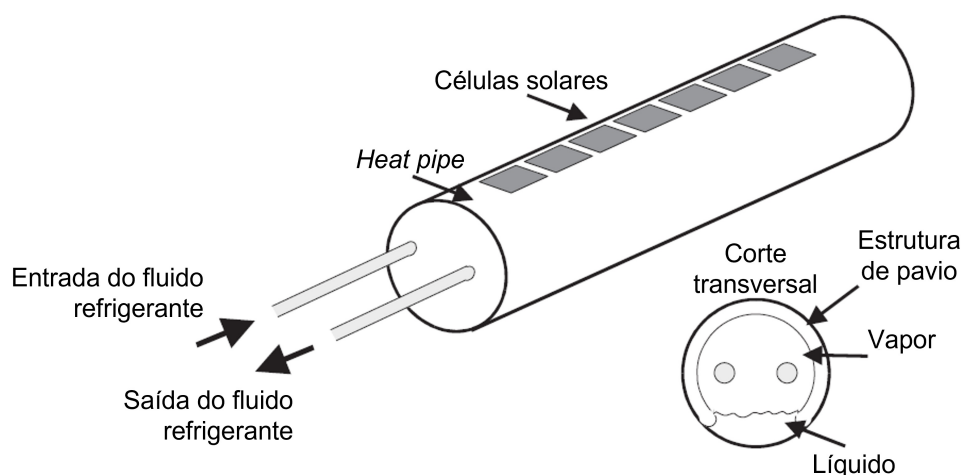
Figura 26 – Modelo de um dissipador de calor passivo para uma célula fotovoltaica única.



fonte: Royne, Dey e Mills (2005).

A Figura 27 apresenta um modelo de *heat pipe* patenteado (RUSSELL, G. F., 1982). Seu projeto envolvia lentes Fresnel lineares como concentradores fotovoltaicos, direcionando a luz solar em uma fileira de células montadas ao longo do *heat pipe* de seção circular.

Figura 27 – Modelo de um dissipador de calor ativo do tipo *heat pipe* para sistemas CPV.



fonte: Royne, Dey e Mills (2005).

Como pode-se observar pela Figura 27, o *heat pipe* apresenta um pavio interno (*internal wick*). Esse pavio direciona o líquido para a superfície aquecida abaixo das células. Dessa forma, ocorre transferência de calor para o fluido, que é fornecido ao circuito refrigerante (*coolant circuit*). Vale destacar que a entrada e a saída do circuito se encontram na mesma extremidade do tubo, assegurando uma temperatura uniforme ao longo de sua extensão.

Além disso, existem restrições quanto ao fluido utilizado e o material do *heat pipe*. A Tabela 3 apresenta os fluidos compatíveis e incompatíveis com o cobre e o alumínio, que são os materiais mais usados nesses sistemas. O uso de um material incompatível pode levar à corrosão do tubo e redução da vida útil do material.

Tabela 3 – Fluidos compatíveis com cobre e alumínio, baseado em testes de vida útil de *heat pipes*.

Fluido	Cobre	Alumínio
Compatível	Água	Amônia
	Metanol	Acetona
	Etanol	Tolueno
		n-Butano
		n-Pentano
		n-Heptano
Incompatível	Amônia	Água
	Acetona	Metanol e outros álcoois
		Benzeno (cancerígeno)
		Naftaleno

fonte: adaptado de [Khamooshi et al. \(2014\)](#).

### 2.3.7 Vantagens e Desvantagens

A pesquisa e o desenvolvimento das tecnologias de concentração fotovoltaica têm como objetivo aumentar a participação da energia solar fotovoltaica na matriz energética mundial. Para isso, é preciso torná-la viável em termos comerciais.

O destaque da tecnologia CPV é que ela se propõe a aumentar a eficiência de geração de energia das células fotovoltaicas sem aumentar demasiadamente o custo, tendo em vista que os materiais ópticos são de modo geral mais baratos que a fabricação de novas células fotovoltaicas, dependentes da cadeia de semicondutores.

Conforme abordado no Capítulo I, a pandemia de COVID-19 gerou um impacto negativo na produção desses materiais, produzindo escassez de oferta em diversos setores industriais, dentre eles o de módulos solares fotovoltaicos. Dessa forma, a dependência da cadeia dos semicondutores é um fator que pode ser enfraquecido pelo crescimento das tecnologias de concentração, que majoritariamente são produzidas a partir de materiais recicláveis, como aço, alumínio e o plástico.

Segundo [Khamooshi et al. \(2014\)](#), a lista a seguir apresenta as vantagens da tecnologia CPV frente aos módulos fotovoltaicos planos tradicionais.

1. **Custo reduzido:** sistemas de concentração fotovoltaica têm a capacidade de produzir a mesma potência elétrica que módulos convencionais a partir de uma área menor de células. Tendo em vista que os materiais que compõem os concentradores são mais baratos que a fabricação de novas células, a tecnologia CPV apresenta uma redução de custos;
2. **Eficiência superior:** os concentradores fotovoltaicos são a única tecnologia solar fotovoltaica a atingir valores de eficiência acima de 20%. Isso reduz a utilização de mais área de terra, resultando em um menor custo;
3. **Maior capacidade de produção de energia anual:** os sistemas de rastreamento solar em conjunto com a tecnologia CPV têm a capacidade de produzir uma potência elétrica anual maior que os sistemas fotovoltaicos tradicionais;

4. **Menos problemas em relação à disponibilidade de material:** os concentradores são fabricados, em sua maior parte, a partir de materiais convencionais de alta oferta. Já as células fotovoltaicas apresentam problemas quanto à disponibilidade de material, pois dependem da matéria-prima do silício ou índio (no caso de  $\text{CuInSe}_2$ );
5. **Menor utilização de materiais tóxicos:** Muitas células fotovoltaicas de filme finos utilizam materiais tóxicos, como o cádmio, dentre outros;
6. **Facilidade de reciclagem:** os concentradores fotovoltaicos são, em sua maioria, fabricados a partir de materiais facilmente recicláveis, como aço, alumínio e plástico. A reciclagem de módulos fotovoltaicos planos tradicionais, por sua vez, é bem mais custosa;
7. **Facilidade de aumento rápido da capacidade de fabricação:** a capacidade de manufatura de semicondutores existente é mais do que suficiente para suprir os requisitos de produção das células para aplicação CPV. O restante das necessidades fabris envolve a produção de componentes mecânicos convencionais no mercado. Isso reduz o capital necessário em comparação à expansão da fabricação dos módulos convencionais.
8. **Possibilidade de fabricação global dos materiais:** com exceção das células, o restante dos materiais que compõem os sistemas concentradores podem ser fabricados em todo o mundo, e dessa forma, próximo ao destino final de uso.

É preciso mencionar também que algumas características inerentes aos concentradores trazem algumas desvantagens para esse tipo de tecnologia. A primeira delas é que os concentradores fotovoltaicos só podem funcionar corretamente (fornecendo a máxima eficiência) a partir de radiação direta, principalmente devido ao ângulo de admissão do concentrador fotovoltaico. Conforme já abordado, é necessário que o raio de luz possua um ângulo de incidência menor que o ângulo de admissão para que consiga atingir a célula receptora. Dessa forma, a radiação difusa, em sua grande maioria, não é aproveitada nesses concentradores.

Portanto, tendo em vista o movimento relativo do Sol no céu terrestre, os sistemas de concentração fotovoltaica (principalmente os de média e alta concentração, MCPV e HCPV) exigem a utilização de sistemas de rastreamento. Esses sistemas, que podem operar com um ou dois eixos de rotação, acompanham o movimento relativo do Sol de modo a aproveitar o máximo possível a radiação solar direta. Se tratando de uma tecnologia complexa e muitas vezes, de preço elevado, torna-se um ponto fraco dos sistemas CPV.

Além disso, a concentração da radiação solar direta implica em uma temperatura de operação mais alta em sistemas de concentração fotovoltaica. Isso abre margem para formação de *hot spots*, ou seja, picos de temperatura na célula, que levam a uma distribuição de temperatura não uniforme ao longo de sua superfície. E como já mostrado pela [Figura 25](#), a elevação da temperatura sobre as células fotovoltaicas implica na diminuição de sua eficiência. Se a temperatura da célula ultrapassar seu limite térmico de operação, pode haver degradação da mesma, e inclusive, falha. Dessa forma, para sistemas concentradores que trabalham com um nível alto de concentração, suscetíveis ao superaquecimento, é necessário que haja um resfriamento adequado.

### 3 PROCEDIMENTO METODOLÓGICO DE PESQUISA

Este trabalho é classificado como uma pesquisa bibliográfica, sendo definida por possibilitar o acesso a diversas fontes de informação e a utilização de dados dispersos em várias publicações, o que contribui para a construção de um quadro conceitual mais completo e elaborado, em relação ao objeto de estudo proposto (GIL, 1994 apud LIMA; MIOTO, 2007).

Na caracterização dos procedimentos técnicos, a pesquisa bibliográfica “é desenvolvida com base em material já elaborado, constituído principalmente de livros e artigos científicos” (GIL, 2002). Em outras palavras, o mecanismo pelo qual se faz possível a pesquisa bibliográfica são as fontes bibliográficas. Dessa forma, uma vez que se estabelece a definição inicial do objeto de estudo, a pesquisa é realizada localizando nas fontes os dados e informações que contribuirão para a solução (ou investigação) do problema proposto pela pesquisa bibliográfica. A organização e síntese das informações coletadas cabe ao autor da pesquisa, de forma que a estruturação do trabalho seja realizada atendendo de forma conveniente aos objetivos traçados.

O presente trabalho possui como objeto de estudo artigos científicos que analisem a utilização de lentes Fresnel em sua aplicação como concentrador solar em um sistema fotovoltaico. A análise pode ser apresentada através de ensaios, simulações numéricas e também de forma analítica. Desse modo, considerando a natureza subjetiva dos aspectos a serem investigados e conhecidos em relação ao tema, esta pesquisa bibliográfica dispõe de uma abordagem qualitativa, conforme definido por Prodanov e Freitas (2013).

Sendo assim, uma pesquisa bibliográfica qualitativa restrita a aplicação de lentes Fresnel como concentradores solares em sistemas fotovoltaicos foi aplicada como estratégia de pesquisa, permitindo sintetizar os estudos pertinentes para responder à questão de pesquisa, compilando os temas em uma estrutura didática e inteligível para os fins deste trabalho. As etapas que compreendem o desenvolvimento desta pesquisa podem ser caracterizadas, conforme definido por Petticrew e Roberts (2006), em: definição inicial, a qual contempla a definição da pergunta problema e do protocolo de pesquisa; pesquisa, a qual realizou a seleção dos artigos, extração de dados e análise; e, por fim a avaliação, que abrange as conclusões e relatório final.

Na primeira etapa da metodologia, buscou-se estabelecer a questão de pesquisa e os tópicos a serem abordados em relação à aplicação das lentes Fresnel como concentradores fotovoltaicos. O protocolo de pesquisa foi composto por: definição de uma revisão teórica acerca dos temas julgados pelo autor como pré-requisitos para o entendimento do assunto principal (sendo tais temas os conceitos de radiação solar, introdução à tecnologia fotovoltaica e introdução aos concentradores fotovoltaicos); definição da estrutura de pesquisa e apresentação dos tópicos que permeiam o objeto de estudo (lentes Fresnel em sua aplicação de concentração fotovoltaica); definição do banco de dados científicos (*Science Direct*) e das palavras-chave (“*Fresnel lens/lentes Fresnel*”, “*concentrated/concentração*”, “*photovoltaics/fotovoltaico*”) utilizadas nos títulos e resumo dos artigos. Além disso, vale destacar que não houve restrição quanto às datas de publicação dos artigos, visto que um dos objetivos específicos do trabalho envolveu a origem e o desenvolvimento temporal da lente Fresnel até sua aplicação como

concentrador solar.

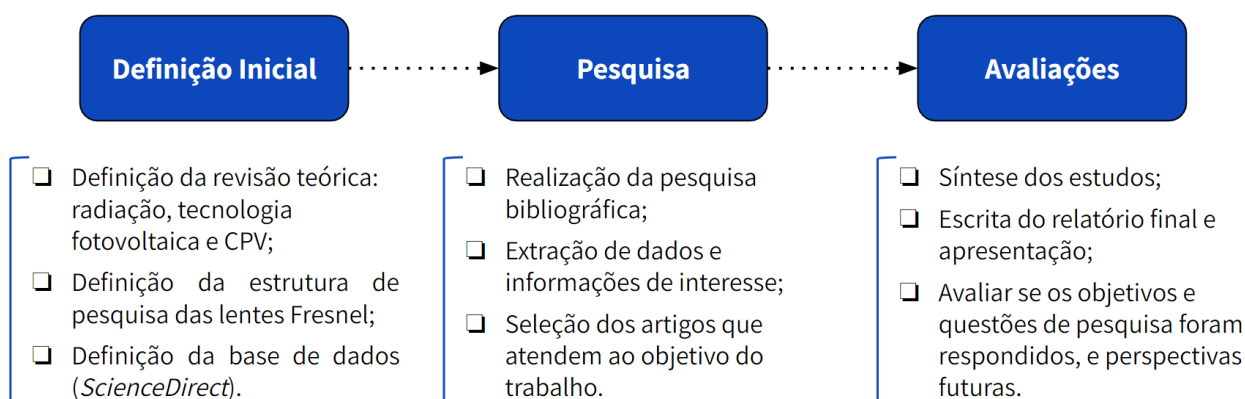
Em seguida, na etapa de pesquisa, foram selecionados os artigos científicos que abordassem um (ou mais) tópicos definidos na estrutura de pesquisa da aplicação de lentes Fresnel como concentradores solares, no intuito de atender aos objetivos geral e específicos deste trabalho. Esses tópicos foram:

- **História:** contextualização da origem e invenção da lente Fresnel, bem como seu desenvolvimento no decorrer da história até sua aplicação como concentrador solar em células fotovoltaicas;
- **Projeto:** apresentação da metodologia de projeto da lente Fresnel. A metodologia inclui a solução analítica a partir de parâmetros de projeto para as lentes que permitem tal solução, bem como um exemplo de solução numérica para lentes que não podem ser projetadas analiticamente;
- **Eficiência e geração de energia:** análise comparativa da eficiência e geração de energia de um sistema fotovoltaico com lentes Fresnel em relação a um sistema convencional sem concentração. A comparação pode ser via ensaio (experimento) ou simulação computacional;
- **Uniformidade do fluxo radiante:** análise de como a lente Fresnel, através da concentração, pode direcionar um fluxo não uniforme para a célula fotovoltaica e as consequências deste fenômeno;
- **Vantagens e desvantagens:** apresentação de um compilado de prós e contras da utilização de lentes Fresnel em relação a outros dispositivos ópticos concentradores.

Por fim, feita a seleção e análise dos artigos, foi possível entrar na última etapa do desenvolvimento deste trabalho, a de avaliação. Nesta etapa, foram sintetizados os assuntos abordados pelos artigos científicos, classificando-os de acordo com a estrutura apresentada na etapa anterior. Desse modo, as informações foram organizadas de forma a atender aos objetivos deste trabalho, seguido pela escrita do relatório final e pela elaboração de uma apresentação. Concluindo, pôde-se avaliar se os objetivos e questões de pesquisa foram respondidos e comentar perspectivas futuras sobre a lente Fresnel.

A **Figura 28** apresenta um resumo contendo as principais etapas descritas no procedimento metodológico de pesquisa.

Figura 28 – Fluxograma das três etapas do procedimento metodológico de pesquisa.



fonte: Elaborado pelo autor.

## 4 ANÁLISE DOS ARTIGOS

Com a execução do protocolo de pesquisa, foram selecionados os artigos que apresentavam contribuições para atingir os objetivos propostos, conforme é apresentado no **Quadro 1**.

Quadro 1 – Artigos selecionados na pesquisa.

ID	Título original	Referência	Journal
1*	Nonimaging Fresnel Lenses: design and performance of solar concentrators	LEUTZ; SUZUKI, (2001)	-
2	Fresnel lenses	ANIČIN; BABOVIĆ, DAVIDOVIĆ (1989)	AMERICAN JOURNAL OF PHYSICS
3	A review of recent advances in fabrication of optical Fresnel lenses	TAN et al., (2021)	JOURNAL OF MANUFACTURING PROCESSES
4	Optical Design using Fresnel lenses	DAVIS; KÜHNLENZ, (2007)	OPTIK & PHOTONIK
5	Profiles of solar-engineering Fresnel lenses	TVER'YANOVICH, (1984)	APPLIED SOLAR ENERGY
6	Novel Design of Primary Optical Elements Based on a Linear Fresnel Lens for Concentrator Photovoltaic Technology	PHAM; VU; SHIN, (2019)	ENERGIES
7	Impact of the Location of a Solar Cell in Relationship to the Focal Length of a Fresnel Lens on Power Production	LI et al., (2014)	ENERGY AND POWER
8	Deciding between concentrated and non-concentrated photovoltaic systems via direct comparison of experiment with opto-thermal computation	SHARMA; BHATTACHARYA, (2021)	RENEWABLE ENERGY
9	Performance of solar concentrator made of an achromatic Fresnel doublet measured with a continuous solar simulator and comparison with a singlet	LANGUY et al., (2013)	SOLAR ENERGY MATERIALS AND SOLAR CELLS
10	Photovoltaic Concentration: Research and Development	HIMER et al., (2020)	ENERGIES
11	A Review of Solar Photovoltaic Concentrators	KHAMOOSHI et al., (2014)	INTERNATIONAL JOURNAL OF PHOTOENERGY
12	Thin Sheet Plastic Fresnel Lenses of High Aperture	MILLER; MCLEOD; SHERWOOD, (1951)	JOURNAL OF THE OPTICAL SOCIETY OF AMERICA

fonte: Elaborado pelo autor.

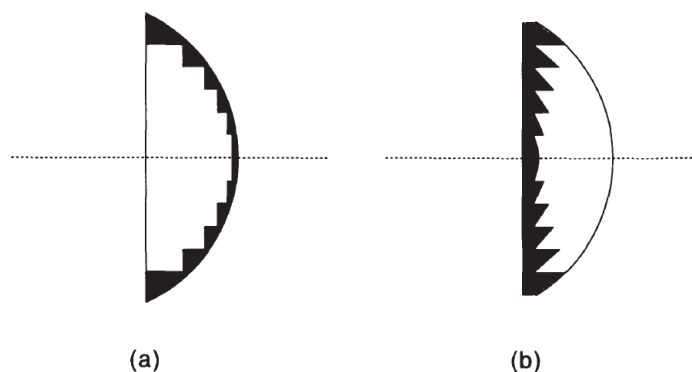
Vale destacar que a obra de ID 1 não se trata de um artigo, e sim de um livro, por isso a utilização do asterisco (\*) no **Quadro 1**. A decisão de incluir o livro ID 1 no conjunto de obras da pesquisa bibliográfica se justifica pela sua ampla contribuição para o alcance dos objetivos propostos.

## 4.1 HISTÓRIA

A origem do que hoje se conhece como lente Fresnel tem seu ponto de partida no princípio da refração. A refração ocorre quando a luz atravessa uma interface entre dois materiais com diferentes índices de refração. Dessa forma, o que definirá a trajetória da luz quando esta atravessar a interface é a forma geométrica das superfícies que limitam esta interface. Baseado nesse princípio, [Leutz e Suzuki \(2001\)](#) apresentam a origem e a história da lente Fresnel, além de fazer menção à sua linha temporal na aplicação de energia solar.

Ao se falar na óptica de uma lente, o material em excesso que separa as suas duas superfícies refratárias pouco interfere em suas propriedades ópticas. Em 1748, Georges de Buffon retirou o material interno de uma lente plana-convexa. Buffon iniciou pela face plana, deixando anéis escalonados seguindo o formato esférico original da lente. A [Figura 29](#) apresenta (à esquerda) a lente de Buffon, em comparação com a lente Fresnel (à direita) criada em 1822.

Figura 29 – Vista em corte da lente de superfície escalonada criada por Buffon (a), e da lente Fresnel criada em 1822 (b).



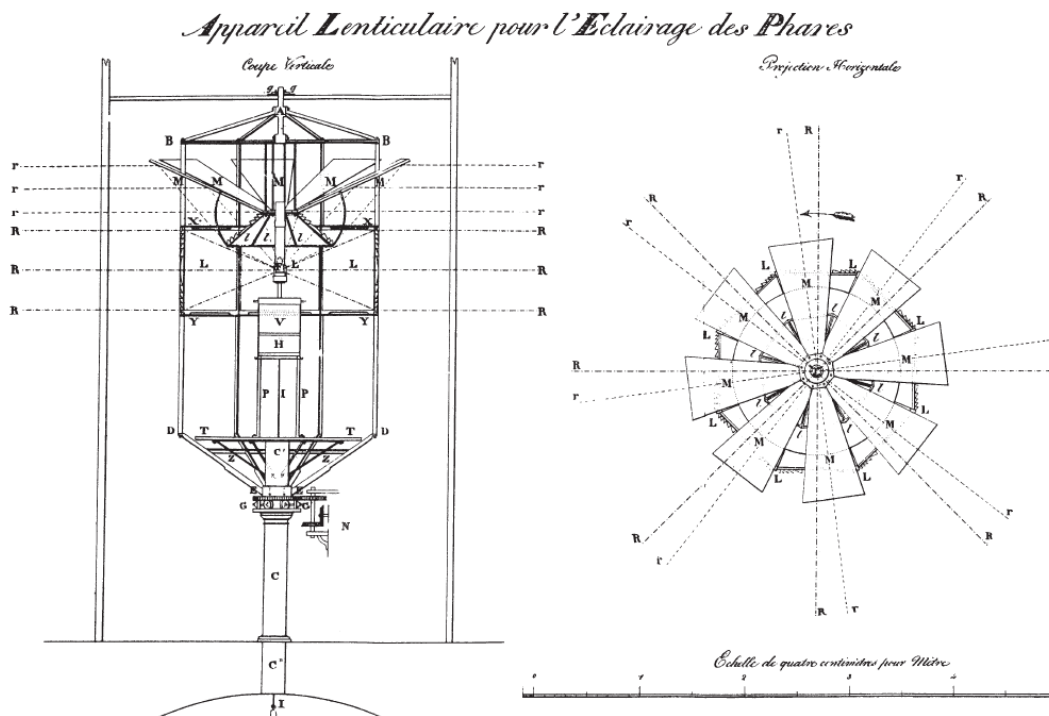
fonte: [Leutz e Suzuki \(2001\)](#).

Em princípio, essas lentes eram utilizadas em faróis nos litorais franceses da Normandia e da Bretanha, uma vez que apresentavam um menor peso (consequência da retirada de material) em relação às lentes convencionais, sendo um dos primeiros modelos registrados na história de lentes com o material interior removido.

Assim, as lentes Fresnel foram oficialmente inventadas em 1822, quando Augustin Jean Fresnel apresentou sua baliza giratória para faróis (*lighthouse turntable*) para a Academia Francesa de Ciências e a instalou (provavelmente outro conjunto) no farol de Cordouan, no estuário da Gironda. A [Figura 30](#) apresenta as vistas lateral e superior do projeto de baliza giratória de farol idealizado e construído por Fresnel.

A obra de [Aničin, Babović e Davidović \(1989\)](#) apresenta a documentação da descoberta de Fresnel a partir de uma monografia do próprio em 1822, incluindo a transcrição exata (e sua tradução em inglês) da definição formulada por Fresnel de sua descoberta, considerada até os dias atuais como a mais precisa:

Figura 30 – Projeto de baliza giratória de farol de Augustin Jean Fresnel.



fonte: Aničin, Babović e Davidović (1989).

*Mais si l'on divise celle-ci en anneaux concentriques, et qu'on ôte à la petite lentille du centre et aux anneaux qui l'entourent toute la partie inutile de leur épaisseur, en leur laissant seulement assez pour qu'ils puissent être solidement unis par leurs bords les plus minces, on conçoit qu'on peut également obtenir le parallélisme des rayons émergens partis du foyer, ou, ce qui revient au même, la reunion au foyer des rayons incidents parallèles à l'axe de la lentille, en donnant à la surface de chaque anneau la courbure et l'inclinaison convenables.*

No entanto, se dividirmos (a lente) em anéis concêntricos e retirarmos da pequena lente do centro e dos anéis que a circundam toda a parte desnecessária de sua espessura, deixando apenas o suficiente para possibilitar juntas fortes ao longo de suas bordas mais finas, concebe-se que a paralelidade dos raios que emergem do foco poderia ser obtida igualmente, ou, o que é equivalente, a reunião no foco dos raios incidentes paralelos ao eixo da lente (poderia ser obtida) dando à superfície de cada anel a curvatura e inclinação adequadas. (tradução própria)

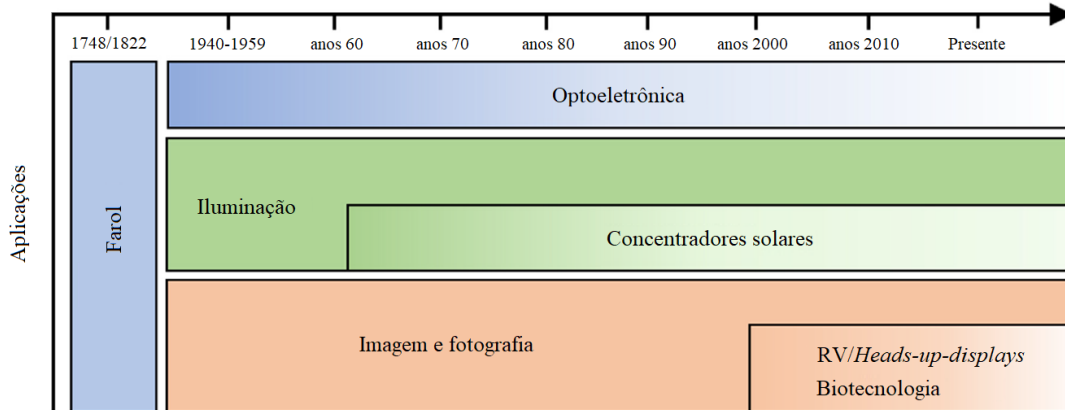
Apesar de não terem sido projetadas especificamente para concentração solar, as lentes Fresnel utilizadas nesse farol foram a tecnologia precursora que levou à pesquisa e ao desenvolvimento dessa tecnologia, a qual hoje é utilizada em diferentes aplicações, sendo uma delas a geração de energia a partir do Sol. Além desta, Leutz e Suzuki (2001) apresentam outras aplicações das lentes Fresnel ao longo da história, como:

- Retroprojetores, copiadoras e *scanners*;

- Câmeras fotográficas, lupas e lentes de leitura;
- Aplicações infravermelho, holografia e transferência de dados;
- Faróis (aqueles que não foram substituídos por sistemas de posicionamento global);

Tan *et al.* (2021) apresentam uma linha temporal das aplicações envolvendo o uso de lentes Fresnel no decorrer da história. Conforme apresentado pela Figura 31, é possível constatar que o uso dessas lentes como concentradores solares se iniciou a partir da década de 1960.

Figura 31 – Linha temporal das aplicações envolvendo lentes Fresnel ao longo da história.

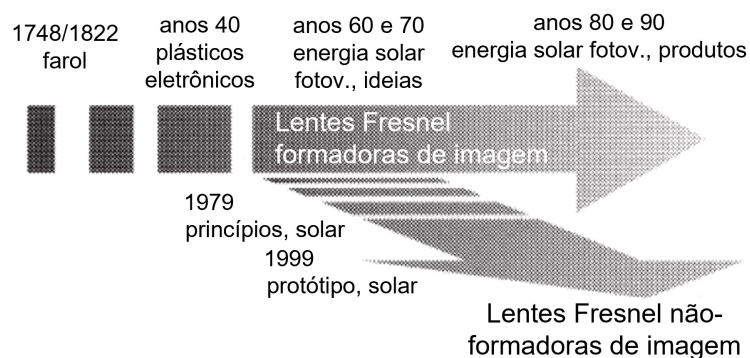


fonte: adaptado de Tan *et al.* (2021).

Na década de 1950, quando o PMMA (polimetilmetacrilato) e outros plásticos tornaram-se disponíveis, ocorreram as primeiras tentativas de se usar a lente Fresnel como coletores de energia solar. Isso se deve ao fato do PMMA ser resistente à luz do Sol, permanecer termicamente estável até pelo menos 80 °C, sua transmissividade espectral ser compatível com o espectro solar, e seu índice de refração ser de 1,49, que é muito próximo ao do vidro (LEUTZ; SUZUKI, 2001).

A chegada do PMMA como material de fabricação permitiu que o desenvolvimento das lentes Fresnel avançasse consideravelmente com o passar dos anos. Conforme está resumido na Figura 32, o desenvolvimento histórico da lente Fresnel (no escopo da concentração solar) se dividiu em duas principais vertentes: a de lentes Fresnel formadoras de imagem (*imaging*) e a de lentes Fresnel não formadoras de imagem (*nonimaging*).

Figura 32 – Desenvolvimento histórico da lente Fresnel para a aplicação de concentração solar.



fonte: Leutz e Suzuki (2001).

## 4.2 PROJETO

O projeto de uma lente Fresnel envolve, antes de mais nada, o entendimento de alguns princípios básicos da óptica geométrica. Conforme já apresentado, uma lente Fresnel é, de forma prática, uma cadeia de prismas. Dessa forma, o entendimento do comportamento óptico dos prismas que a compõem é essencial para um bom projeto desse tipo de concentrador. [Leutz e Suzuki \(2001\)](#) apresentam os princípios básicos da óptica que regem os fenômenos da luz incidindo sobre uma lente.

Um raio de luz, ao atingir a superfície de uma lente, está submetido a dois fenômenos básicos da óptica: reflexão e refração. A reflexão de um raio de luz obedece, para um plano (2D) e para o espaço (3D), a equação (1).

$$\Phi = \Phi_R \quad (1)$$

Sendo ambos os ângulos medidos a partir de uma mesma linha perpendicular à superfície. Essa linha é chamada de normal. Na equação (1),  $\Phi_R$  é o ângulo de reflexão.

A refração, por sua vez, é caracterizada pela Lei de Snell, a qual relaciona os ângulos de incidência,  $\Phi$ , e de refração,  $\Phi'$  com os índices de refração dos dois meios envolvidos:

$$\frac{\text{sen}\Phi}{\text{sen}\Phi'} = \frac{n'}{n} \quad (2)$$

Na equação (2),  $n$  é o índice de refração do meio no qual advém o raio de luz e  $n'$  é o índice de refração no qual o raio de luz adentra.

O índice de refração,  $n$ , de um material é definido como “a razão entre a velocidade da luz no vácuo,  $c = 2,997925 \cdot 10^8$  m/s, e a velocidade da luz neste material,  $v$ ” ([LEUTZ; SUZUKI, 2001](#)). A equação (3) apresenta a definição mencionada.

$$n = \frac{c}{v} \quad (3)$$

É preciso esclarecer, porém, que a velocidade da luz em um material varia conforme a cor da luz. Dessa forma, por consequência, pode-se afirmar que o índice de refração do material é função da cor da luz, ou seja, de seu comprimento de onda:  $n = n(\lambda)$ . Por padrão, quando apenas um valor de índice de refração  $n_D$  é dado, ele se refere à luz amarela com um comprimento de onda de  $\lambda_D = 589,2$  nm. Além disso, vale mencionar que para o ar, ou seja, o meio que normalmente cerca as lentes em uma aplicação de concentração fotovoltaica,  $n_D = 1,0$ .

A [Figura 33](#) apresenta um esquema dos fenômenos de reflexão (a) e refração (b) de um raio de luz incidente em uma superfície para uma vista bidimensional.

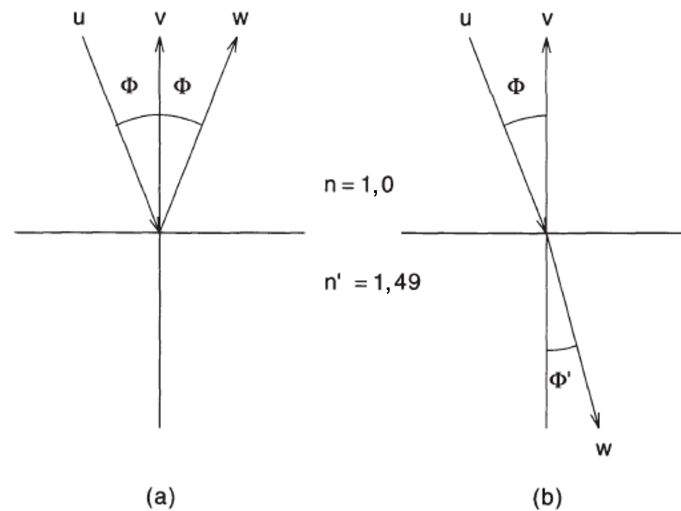
Ainda sobre o fenômeno da refração, prossegue o seguinte: um raio de luz entrando em um material de índice de refração maior será refratado tendendo a se *aproximar* da normal. Um raio deixando um material de índice de refração maior e indo para um meio de índice de refração menor será refratado se *afastando* da normal, conforme apresentado por [Leutz e Suzuki \(2001\)](#).

Outro fenômeno que é preciso ser apresentado é o da Reflexão Interna Total (*Total Internal Reflection - TIR*). Esse fenômeno define o ângulo crítico (ou máximo) de refração,  $\Phi_c$  a partir de um

raio de luz entrando em um meio de maior índice de refração com ângulo de incidência de  $90^\circ$ . O ângulo crítico pode ser calculado substituindo  $\Phi = 90^\circ$  na equação (2):

$$\text{sen}\Phi_c = \frac{n}{n'}$$

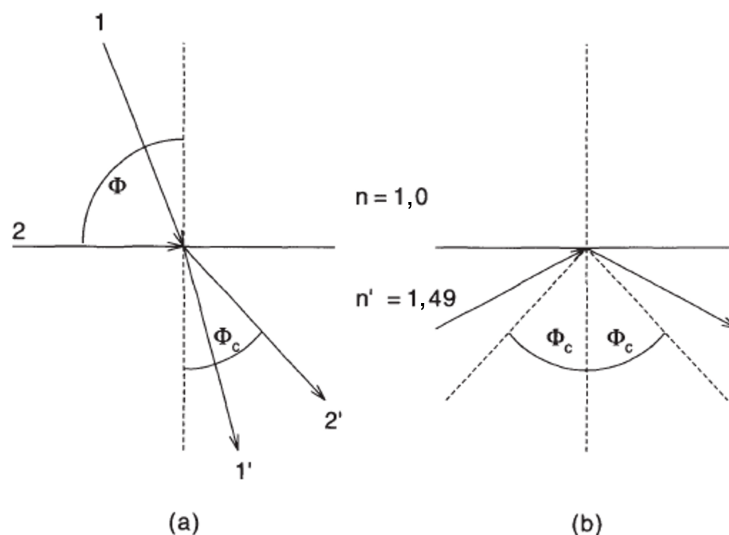
Figura 33 – Visualização esquemática bidimensional dos fenômenos de reflexão (a) e refração (b).



fonte: Leutz e Suzuki (2001).

Por exemplo, para um prisma de acrílico ( $n' = 1,49$ ) cercado por ar,  $\text{sen}\Phi_c = 0,671$  e  $\Phi_c = 42,16^\circ$ . A Figura 34a apresenta um esquema bidimensional incluindo o raio de luz incidente a  $90^\circ$  que determina o ângulo crítico de refração.

Figura 34 – Visualização esquemática bidimensional do ângulo crítico de refração (a) e do fenômeno da reflexão interna total (b).



fonte: Leutz e Suzuki (2001).

Dessa forma, um raio de luz que tente sair de um meio de maior índice de refração para um de menor é submetido ao fenômeno da reflexão interna total quando o fizer para um ângulo **maior** que o ângulo crítico de refração, conforme ilustra a Figura 34b. Ou seja, o raio de luz é completamente refletido nessas circunstâncias, não havendo refração.

Na Seção 4.2.1 serão especificados os parâmetros e a metodologia de projeto das lentes Fresnel formadoras de imagem (*imaging*). Na Seção 4.2.2 é apresentado um exemplo de algoritmo para o projeto de uma lente Fresnel não formadora de imagem (*nonimaging*), bem como os princípios que regem sua metodologia.

#### 4.2.1 Lentes Fresnel formadoras de imagem (*imaging*)

O projeto das lentes Fresnel formadoras de imagem segue o mesmo princípio em termos de óptica geométrica que o projeto de outras lentes comuns, principalmente em relação aos conceitos de distância focal e abertura. Além disso, as lentes Fresnel formadoras de imagem são centralizadas no eixo do sistema óptico e seu projeto é geralmente realizado para raios paraxiais.

A distância focal de uma lente Fresnel plano-convexa pode ser determinada pela equação (4), também conhecida como equação dos pontos conjugados.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{i} + \frac{1}{o} \quad (4)$$

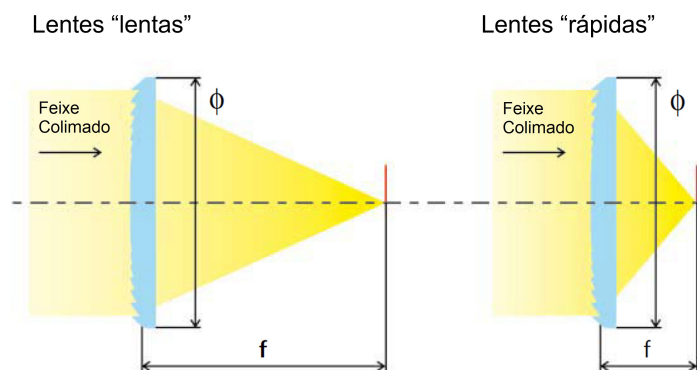
Sendo  $f$  a distância focal da lente,  $o$  a distância dos pontos do objeto em relação a superfície refratária da lente e  $i$  a distância entre os pontos da imagem conjugada e a mesma superfície da lente. Vale destacar que a equação (4) assume a lente como fina. No caso de uma lente plano-convexa,  $o = \infty$ , e assim,  $1/f = 1/i$ .

Outro parâmetro de projeto é o *f-number*, ou  $f/\#$ , apresentado por Davis e Kühnlenz (2007). Este parâmetro descreve a razão entre a distância focal  $f$  e o diâmetro da lente  $\phi$ , definido pela equação (5).

$$f/\# = \frac{f}{\phi} \quad (5)$$

Segundo Davis e Kühnlenz (2007),  $f/\#$  também pode ser entendido como a *velocidade* da lente. Ou seja, quanto menor for  $f/\#$ , mais rápida é a lente, e quanto maior for  $f/\#$ , mais devagar ela é. Essa relação de velocidade pode ser visualizada na Figura 35, e está relacionada com a concentração da lente: lentes de elevado  $f/\#$  concentram a luz de forma mais devagar, e vice-versa.

Figura 35 – Visualização esquemática do parâmetro *f-number*.



fonte: Davis e Kühnlenz (2007).

As lentes Fresnel plano-convexas formadoras de imagem podem ser de dois tipos:

1. Entalhes prismáticos voltados para dentro (apontados para o receptor);
2. Entalhes prismáticos voltados para fora (apontados para a fonte de luz).

Cada modelo apresenta uma solução analítica por meio de equações que modelam a geometria dos prismas, compondo assim o perfil da lente completa.

#### 4.2.1.1 Entalhes voltados para dentro (*grooves in*)

O projeto das lentes Fresnel com os prismas apontados para o receptor apresenta uma solução analítica proposta por Tver'yanovich (1984). Tal solução é dada por meio das equações (6), (7) e (8).

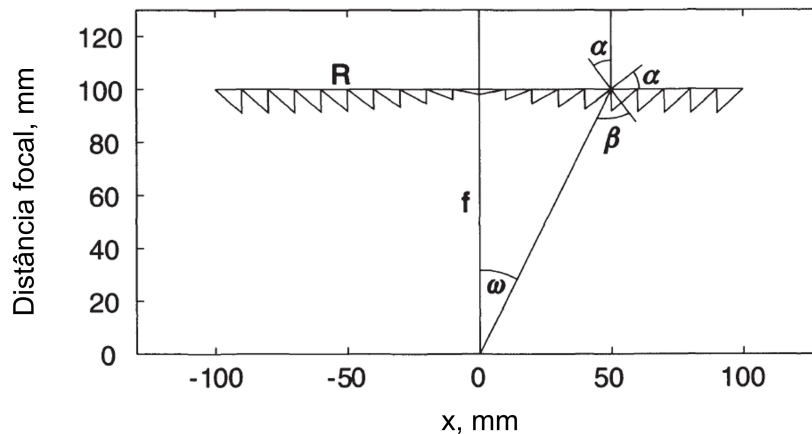
$$n \operatorname{sen} \alpha = \operatorname{sen} \beta, \quad (6)$$

$$\tan \omega = \frac{R}{f}, \quad (7)$$

$$\beta = \alpha + \omega \quad (8)$$

Sendo  $\alpha$  o ângulo do prisma,  $R$  o raio da lente e  $f$  a distância focal. Os ângulos  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\omega$  são correspondentes à óptica geométrica do caminho de um raio de luz incidente na superfície da lente, conforme a Figura 36.

Figura 36 – Solução analítica do projeto de uma lente Fresnel formadora de imagem com entalhes voltados para dentro.



fonte: Leutz e Suzuki (2001).

Dessa forma, a partir das equações (6), (7) e (8), pode-se chegar na expressão final que define o ângulo do prisma,  $\alpha$ :

$$\tan \alpha = \frac{R}{n \sqrt{R^2 + f^2} - f} \quad (9)$$

A Figura 36 apresenta o resultado de uma simulação baseada na equação (9), onde foi utilizada uma distância focal  $f = 100$  mm, e um valor de raio na faixa de  $0 \leq R \leq R_{max}$  em intervalos de  $R/10$ , onde  $R_{max} = f$ , obtendo portanto  $f/\# = 0,5$  para essa lente.

#### 4.2.1.2 Entalhes voltados para fora (*grooves out*)

Análogo ao desenvolvimento apresentado na subseção 4.2.1.1, será apresentado aqui o projeto de lentes Fresnel formadoras de imagem com os entalhes prismáticos voltados para a fonte de luz (normalmente, o Sol). As equações (10), (11), (12) e (13) descrevem essas lentes:

$$\text{sen}\alpha = n \text{sen}\beta, \quad (10)$$

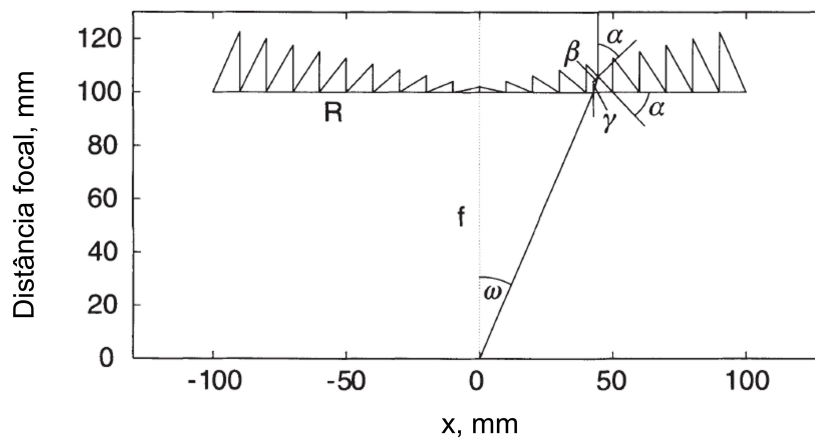
$$-\alpha = \gamma - \beta, \quad (11)$$

$$n \text{sen}\gamma = \text{sen}\omega, \quad (12)$$

$$\tan\omega = \frac{R}{f}. \quad (13)$$

Sendo  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  e  $\omega$  os ângulos apresentados na Figura 37, correspondentes à óptica geométrica do caminho de um raio de luz incidente na superfície da lente. Novamente, sendo  $\alpha$  o ângulo do prisma,  $R$  o raio da lente e  $f$  a distância focal.

Figura 37 – Solução analítica do projeto de uma lente Fresnel formadora de imagem com entalhes voltados para fora.



fonte: Leutz e Suzuki (2001).

Diferentemente das lentes com entalhes voltados para dentro, nesse caso surge mais um ângulo utilizado para descrever os prismas,  $\gamma$ . Isso se deve ao fato de que nas lentes com entalhes voltados para dentro os raios paraxiais mudam sua direção apenas uma vez (já que a primeira superfície atingida é ortogonal aos mesmos), enquanto nos sistemas com entalhes voltados para fora os raios de luz mudam sua trajetória duas vezes.

Análoga à equação (9), a expressão final que define o ângulo  $\alpha$  de cada prisma nas lentes com entalhes para fora em termos de  $R$  e  $f$  ( $\text{sen}\omega$  pode ser substituído por  $R/\sqrt{R^2 + f^2}$ ), a partir das equações (10), (11), (12) e (13) é apresentada na equação (14).

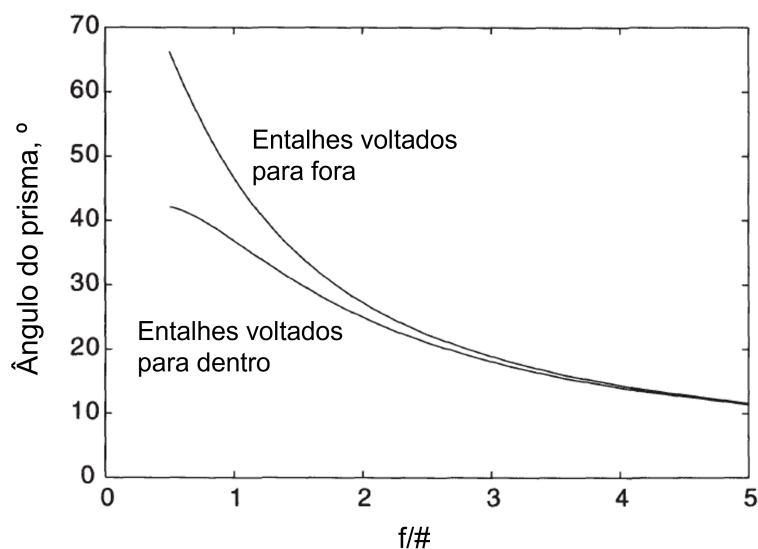
$$\tan\alpha = \frac{\text{sen}\omega}{1 - \sqrt{n^2 - \text{sen}^2\omega}} \quad (14)$$

A Figura 37 apresenta o resultado de uma simulação baseada na equação (14), onde foi utilizada

uma distância focal  $f = 100$  mm, e uma abertura na faixa de  $0 \leq R \leq R_{max}$  em intervalos de  $R/10$ , onde  $R_{max} = f$ , obtendo portanto  $f/\# = 0,5$  para essa lente.

Dessa forma, [Leutz e Suzuki \(2001\)](#) apresentam também a comparação entre os ângulos dos prismas,  $\alpha$ , obtidos para ambas as lentes. A [Figura 38](#) apresenta essa comparação para lentes de diferentes diâmetros, ou seja, diferentes valores de  $f/\#$ .

Figura 38 – Comparação entre o ângulo dos prismas  $\alpha$  para lentes Fresnel com entalhes voltados para dentro e para fora.



fonte: [Leutz e Suzuki \(2001\)](#).

Pela [Figura 38](#), pode-se constatar que as lentes Fresnel com entalhes voltados para fora apresentam, de forma geral, prismas com ângulos maiores que as de entalhes voltados para dentro. Isso leva tais lentes a serem “menos propensas a erros focais do que as lentes com entalhes voltados para dentro, onde uma pequena variação na inclinação de um prisma próximo ao centro da lente levaria a uma elevada imprecisão, e portanto, a um foco fora do eixo da lente” ([LEUTZ; SUZUKI, 2001](#)).

Por outro lado, lentes com prismas voltados para a fonte de luz (ou seja, para fora) são mais difíceis de limpar e estão propensas a perdas por sombreamento, caso os raios de luz não atinjam a lente de forma paraxial. Além disso, inverter a posição da lente para deixar os entalhes voltados para dentro levaria ao fenômeno da reflexão interna total (TIR) nos prismas mais distantes do eixo óptico central. Conforme foi mostrado, para o PMMA, este ângulo é de  $42,16^\circ$  que, pela [Figura 38](#), é menor que o ângulo dos prismas para valores de  $f/\#$  menores que 1.

#### 4.2.2 Lentes Fresnel não-formadoras de imagem (*nonimaging*)

Conforme apresentado anteriormente, as lentes Fresnel formadoras de imagem refratam a luz vindo de um objeto fonte e, como o próprio nome sugere, formam uma imagem deste objeto no plano focal. No escopo da concentração solar para fins de produção de energia, existe um interesse muito maior na concentração de luz do que na formação de imagem. Dessa forma, foi desenvolvido um outro segmento das lentes Fresnel: as não formadoras de imagem (*nonimaging Fresnel lenses*).

Dessa forma, o objetivo das lentes Fresnel não formadoras de imagem é concentrar os raios solares em detrimento da qualidade da imagem formada, ou seja, da precisão fotográfica. Assim, o foco principal do projeto de uma lente Fresnel não formadora de imagem é “de maximizar a quantidade (energia) e qualidade (uniformidade do fluxo) da radiação solar concentrada pelas lentes” (LEUTZ; SUZUKI, 2001).

Um problema que é intensificado com a proposta da lente não formadora de imagem é a formação de *hot spots* na célula. Uma vez que o projeto relaxa os requisitos de formação de imagem, de modo a priorizar que a luz chegue na superfície receptora (independente de onde), a distribuição da irradiação atingindo a célula não é uniforme. Não só isso, mas a lente tende a concentrar a luz em determinadas áreas (por exemplo, seu centro), formando uma região de elevada temperatura em relação ao restante da célula (*hot spot*), o que reduz sua eficiência.

Além disso, como não existe rigor na formação de imagem, as lentes Fresnel não formadoras de imagem não conseguem ser completamente descritas analiticamente necessitando, portanto, de uma solução numérica. Dessa forma, o projeto dessas lentes é feito por meio de um algoritmo.

O projeto a ser apresentado aqui seguiu a metodologia desenvolvida por Pham, Vu e Shin (2019). A proposta visa que cada entalhe tenha seu próprio ponto focal, de modo a distribuir a luz solar uniformemente sobre a superfície receptora. Dessa forma, se cada entalhe distribui a luz de forma uniforme, a lente como um todo também concentrará a radiação uniformemente. Os três princípios ópticos que regem o projeto são:

1. O teorema do raio da borda (*edge ray theorem*);
2. O princípio de Fermat;
3. A lei de Snell.

O princípio do raio da borda define que os raios de luz originados das bordas (ou extremidades) da fonte devem ser direcionados para as bordas da superfície receptora. Isso garante que todos os raios de luz provenientes dos pontos internos da fonte chegarão na célula fotovoltaica. Vale lembrar que neste método não existe necessidade de formação de imagem, uma vez que o objetivo é apenas garantir que os raios da fonte atinjam o receptor. A Figura 39 ilustra o teorema do raio da borda de forma genérica. Já a Figura 40 ilustra o princípio do raio da borda aplicado no entalhe da lente Fresnel. Note que o ponto focal varia para cada entalhe.

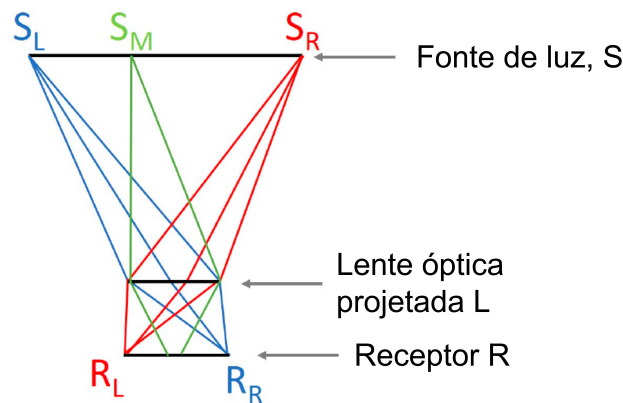
O princípio de Fermat define que, considerando todos os caminhos possíveis para ir de um ponto ao outro, a luz percorre aquele que levará ao menor tempo. No caso de pontos em materiais diferentes (com índices de refração diferentes), o ponto no qual ocorrerá a refração também está relacionado com a minimização deste tempo.

O passo a passo do projeto de cada entalhe segundo Pham, Vu e Shin (2019) é descrito a seguir, acompanhado pela Figura 41:

1. O ponto de partida ocorre na inicialização dos parâmetros da lente, como a largura de cada entalhe,  $w$ , a espessura da lente,  $d$ , a largura da superfície receptora e a altura da lente. Com isso, as posições dos pontos  $P_1$ ,  $P_2$ ,  $P_3$  e  $P_4$  são conhecidas de antemão devido ao valor da largura

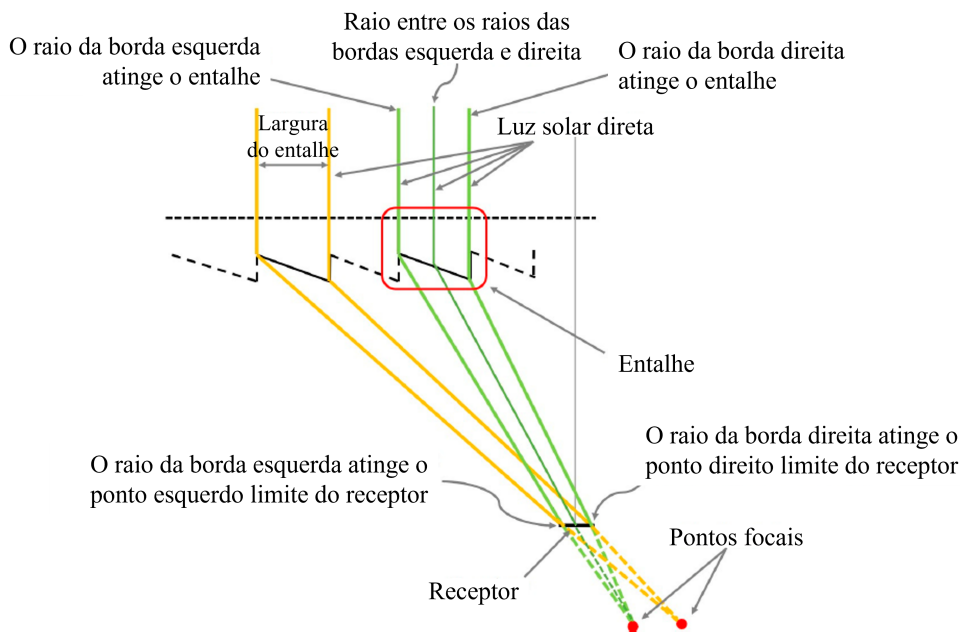
do entalhe,  $w$ , e a espessura da lente,  $d$ , como ilustra a [Figura 41](#). Resta, portanto, encontrar a posição de  $P_5$ ;

Figura 39 – Teorema do raio da borda.



fonte: [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#).

Figura 40 – Teorema do raio da borda aplicado aos entalhes da lente Fresnel projetada.



fonte: [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#).

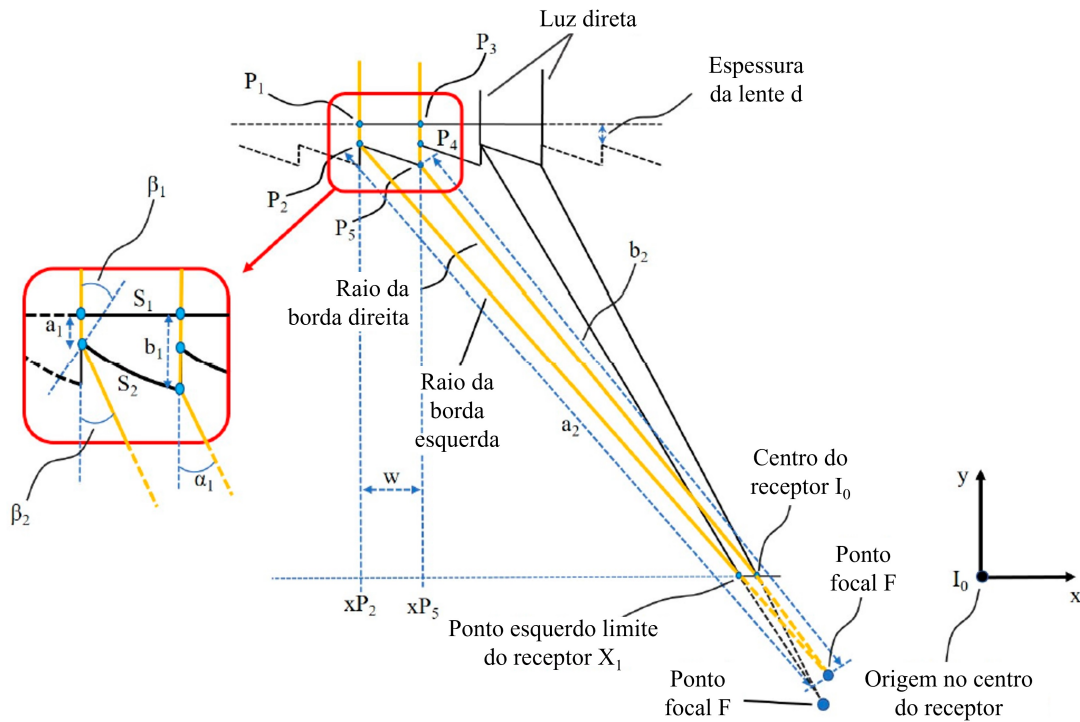
2. O raio da borda esquerda atinge o entalhe em  $P_1$ , e, devido a superfície  $S_1$  ser plana, esse raio de luz chega a  $P_2$  sem mudança de trajetória. Na posição  $P_2$ , o raio da borda esquerda é refratado para a extremidade esquerda da superfície receptora,  $X_1$ . Através dessa condição, determina-se os ângulos  $\beta_1$  e  $\beta_2$ , sendo estes os ângulos refratários do raio da borda esquerda na superfície de saída  $S_2$ . Tais ângulos são determinados pelas equações [\(15\)](#) e [\(16\)](#):

$$n \operatorname{sen} \beta_1 = \operatorname{sen}(\beta_2 + \beta_1), \quad (15)$$

$$\tan \beta_2 = \frac{X_1 - x_{P_2}}{y_{P_2}}, \quad (16)$$

sendo  $n$  o índice de refração,  $xP_2$  e  $yP_2$  as posições de  $P_2$  nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente;

Figura 41 – Parâmetros utilizados na construção do perfil de cada entalhe da lente Fresnel não formadora de imagem projetada.



fonte: [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#).

3. A posição de  $P_5$  é estimada por duas condições. Primeiramente, o raio da borda direita, que deixa o entalhe em  $P_5$ , deve atingir o centro  $I_0$  da superfície receptora e interceptar o raio da borda esquerda no ponto focal do entalhe,  $F$ . Em segundo, o comprimento do caminho óptico do raio da borda esquerda deve ser igual ao da borda direita, pelo princípio de Fermat. Portanto, a posição de  $P_5$  é definida pelas equações (17) e (18):

$$\tan\alpha_1 = \frac{I_0 - xP_5}{yP_5}, \quad (17)$$

$$na_1 + a_2 = nb_1 + b_2, \quad (18)$$

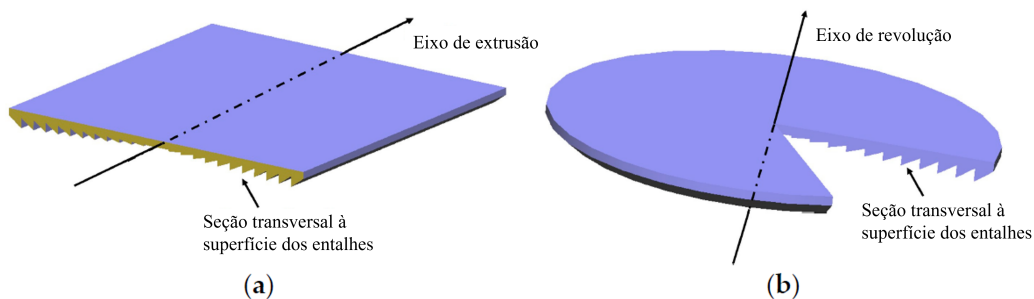
sendo  $\alpha_1$  o ângulo de refração do raio da borda direita em  $P_5$ ,  $xP_5$  e  $yP_5$  são as posições de  $P_5$  nos eixos  $x$  e  $y$ , respectivamente. Por fim,  $a_1$ ,  $a_2$ ,  $b_1$  e  $b_2$  são o comprimento dos caminhos ópticos dos raios da borda esquerda e direita, respectivamente;

4. Todos os raios de luz entre as bordas esquerda e direita devem convergir no ponto focal  $F$  devido à conservação do comprimento do caminho óptico. Dessa forma, o conjunto de raios atingindo o entalhe será uniformemente distribuído sobre metade da superfície receptora. Assim, pela condição do comprimento do caminho óptico, a superfície de saída  $S_2$  pode ser construída pela soma dos pontos de saída de cada raio;

5. Uma vez que o desenvolvimento de um entalhe for concluído, repete-se o procedimento para a construção do próximo entalhe, sendo que os pontos  $P_3$  e  $P_4$  do entalhe atual serão os pontos  $P_1$  e  $P_2$  do próximo entalhe, respectivamente. Vale destacar que esse passo a passo constrói metade do perfil da lente Fresnel. Como a lente é simétrica, basta espelhar o esboço em relação ao seu eixo central para obter a outra metade.

Obtida a seção transversal da lente na qual estão contidos os perfis dos entalhes, o corpo da lente pode ser construído a partir de duas formas, conforme mostrado na [Figura 42](#). A primeira se trata de uma extrusão no sentido do eixo normal à seção, [Figura 42a](#), a qual irá gerar uma lente Fresnel linear, concentrando os raios ao longo de uma direção paralela ao eixo de extrusão. Já a segunda construção é realizada a partir de uma revolução de metade da seção em torno do qual será o eixo focal da lente, [Figura 42b](#). Neste segundo modo é gerada uma lente Fresnel do tipo circular, a qual tem a capacidade de atingir altas taxas de concentração, com a desvantagem de uma distribuição não uniforme da irradiação ao longo da célula receptora, podendo levar ao surgimento de *hot spots*.

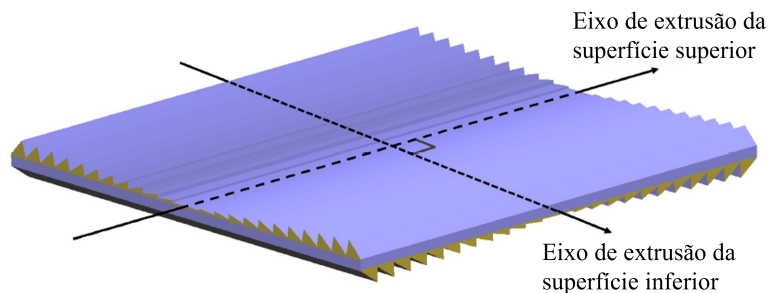
Figura 42 – Dois modelos de lente Fresnel construídos a partir da seção contendo o perfil dos entalhes para (a) extrusão e (b) revolução.



fonte: [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#).

Uma nova proposta de lente Fresnel é apresentada por [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#), sendo uma combinação entre duas lentes Fresnel lineares posicionadas de forma perpendicular uma à outra, conforme ilustra a [Figura 43](#).

Figura 43 – Proposta alternativa de lente Fresnel a partir da junção de duas superfícies posicionadas de forma perpendicular uma à outra.

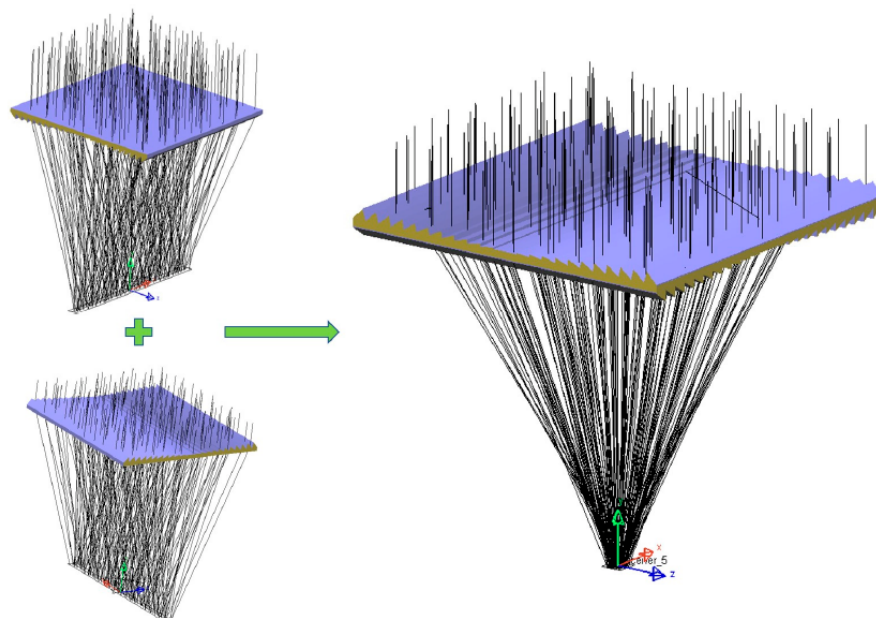


fonte: [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#).

O objetivo deste sistema é coletar (e concentrar) a luz solar em duas direções, de forma a se obter um feixe de seção transversal quadrada, com um fluxo radiante mais uniforme do que uma lente Fresnel

circular pode fornecer. A [Figura 44](#) apresenta a técnica de simulação com *ray tracing* usada pelos autores para estimar a performance do projeto. É possível perceber que a combinação das duas lentes tem a capacidade de distribuir os raios solares em duas direções.

Figura 44 – Simulação com técnica *ray tracing* para novo conceito de lente Fresnel de forma a convergir a luz solar em duas direções.



fonte: [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#) .

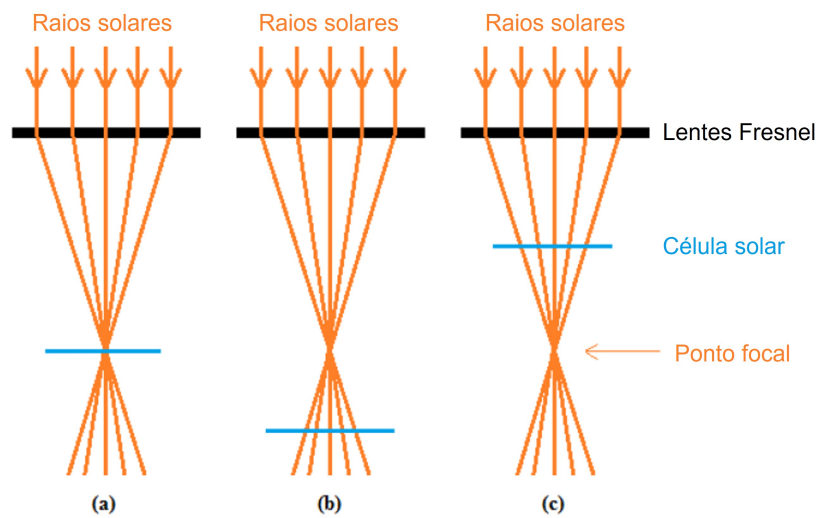
### 4.3 EFICIÊNCIA E GERAÇÃO DE ENERGIA

[Li et al. \(2014\)](#) e [Sharma e Bhattacharya \(2021\)](#) conduziram estudos comparativos avaliando a performance de um sistema fotovoltaico concentrador com lentes Fresnel em relação a um sistema fotovoltaico sem concentração, considerando os ganhos (e perdas) de eficiência e geração de energia apresentados pelas células. Vale mencionar que a obra de [Li et al. \(2014\)](#) conduz um estudo experimental, enquanto [Sharma e Bhattacharya \(2021\)](#) realizam a análise por meio de uma simulação computacional a partir de um modelo validado.

De forma a se avaliar o impacto da utilização de lentes Fresnel para concentração de luz solar em células fotovoltaicas, o experimento conduzido por [Li et al. \(2014\)](#) comparou a potência gerada por uma célula fotovoltaica exposta à radiação solar do ambiente em relação a outras células sob concentração de uma lente Fresnel.

Foram testadas diferentes alturas (posições) para a célula em relação à lente, sendo a altura menor ( $\leq 1,0F$ ), igual ( $1,0F$ ) ou maior ( $\geq 1,0F$ ) que a distância focal da lente, conforme ilustra a [Figura 45](#). O intuito de variar essa distância é avaliar como a distribuição do fluxo radiante sobre a célula impacta em sua performance. Colocar a célula a uma distância muito próxima ao ponto focal pode levar a um *hot spot* em seu centro, elevando a temperatura a níveis que comprometem a sua eficiência.

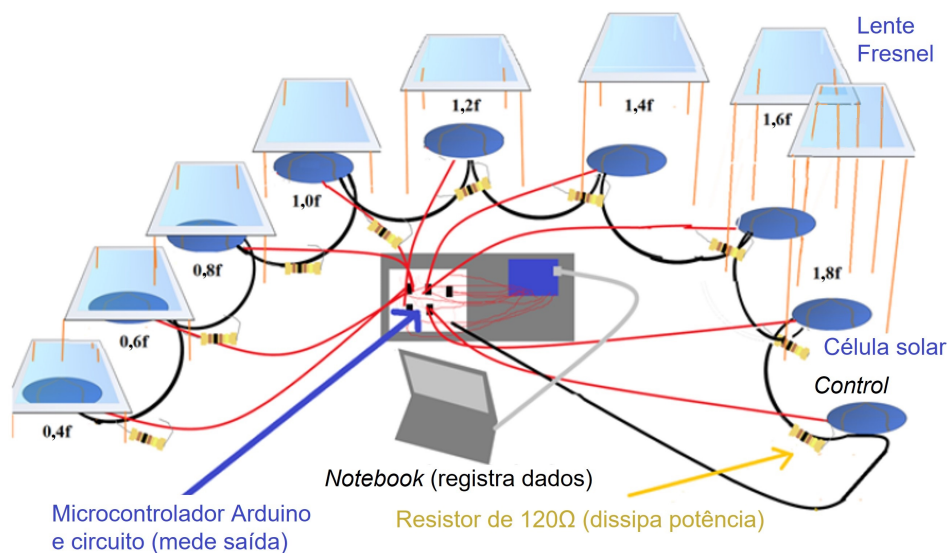
Figura 45 – Alturas testadas para a célula, sendo (a) no ponto focal, (b) abaixo e (c) acima do ponto focal.



fonte: [Li et al. \(2014\)](#).

O experimento contou com um total de oito configurações, além da célula de referência (sem lente), denominada como *Control*. As configurações de altura da lente variaram de  $0,4F$ , ou seja, 40% da distância focal até  $1,8F$ , 180% da distância focal, analogamente. Além das células e das lentes, foi utilizado um microcontrolador Arduino, um circuito com resistores (para medir a potência elétrica gerada) e um computador para registro dos resultados. A [Figura 46](#) apresenta um desenho esquemático do *setup* construído pelos autores para o experimento.

Figura 46 – Representação esquemática do *setup* montado para o experimento.



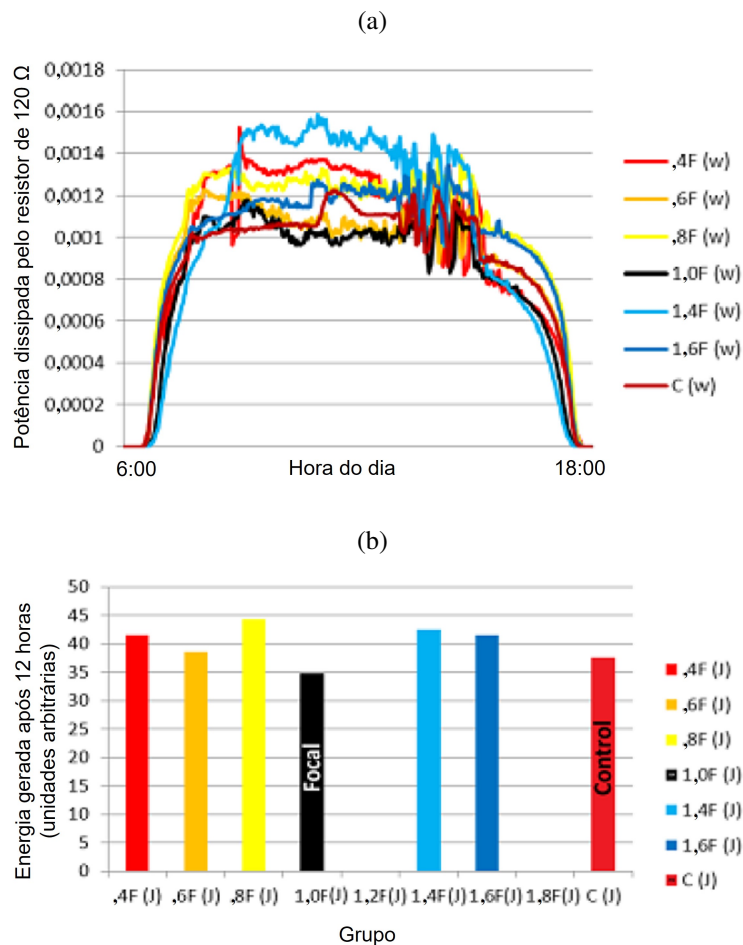
fonte: [Li et al. \(2014\)](#).

A lente Fresnel utilizada foi do tipo formadora de imagem (*imaging*), sendo PVC o material, com distância focal de 300 mm. As células fotovoltaicas do experimento produzem uma corrente máxima de 1,0 A e uma tensão máxima de 0,5 V. Os resistores usados para dissipar a potência de cada célula possuem resistência de  $120 \Omega$ , com erro de  $\pm 5\%$ . O ensaio foi conduzido ao longo de sete dias na

cidade de Nova York, para o intervalo de 6h até às 18h, incluindo dias ensolarados e nublados.

A [Figura 47](#) apresenta os resultados obtidos para um dia nublado. É possível constatar pela [Figura 47b](#) que a geração de energia em todos os grupos com lentes Fresnel, à exceção da célula que ficou na distância focal ( $1,0F$ ), foi superior ao grupo da célula sem lente (*Control*). A configuração que performou melhor foi a de distância equivalente a 80% da distância focal,  $0,8F$ , provocando um aumento de 17,77% na energia elétrica gerada. A configuração com o pior desempenho foi o grupo com distância entre célula e lente equivalente à distância focal,  $1,0F$ . Neste caso, a geração de energia ao longo de 12 horas foi 7,74% menor que o grupo de referência, sem lente Fresnel. Obs: os grupos  $1,2F$  e  $1,8F$  não estão incluídos devido a erros no registro dos resultados.

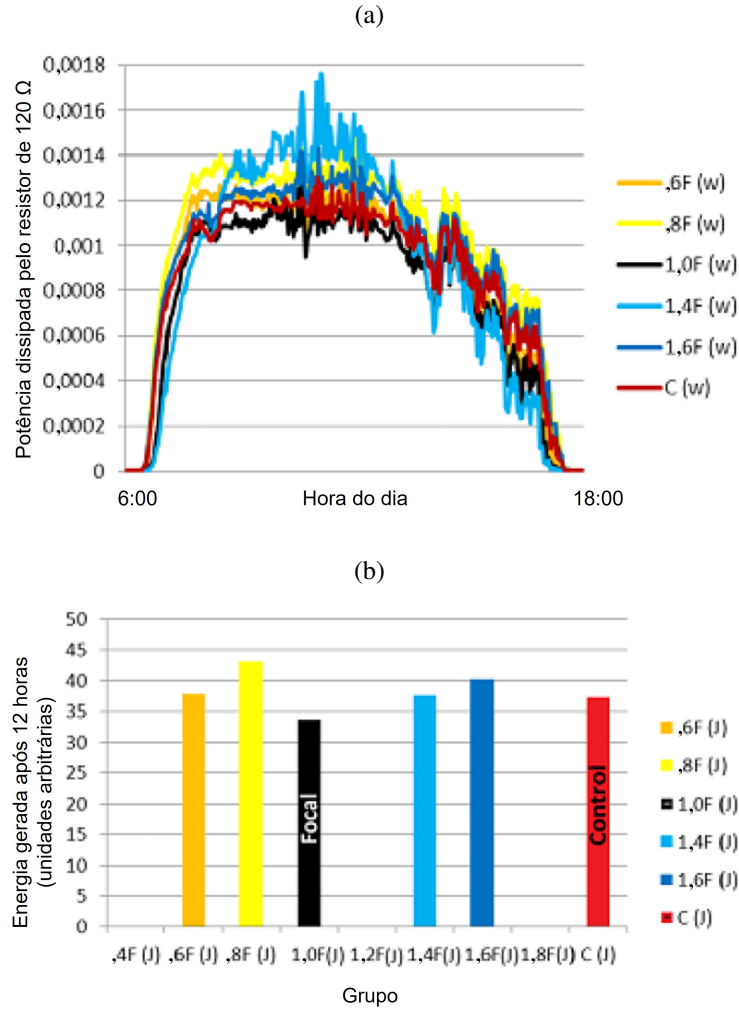
Figura 47 – (a) Potência x Tempo para um dia nublado; (b) Energia total gerada em 12 horas.



fonte: [Li et al. \(2014\)](#).

Os resultados referentes aos dias ensolarados estão reunidos na [Figura 48](#). De forma semelhante ao dia nublado, para o dia ensolarado a configuração que retornou a maior quantidade de energia gerada ao longo de 12 horas foi a  $0,8F$ , 15,49% a mais que o grupo de referência sem lente Fresnel. Analogamente, a configuração  $1,0F$  foi a que pior performou, reduzindo o total de energia gerada em 9,56% comparativamente ao grupo de referência (*Control*). Obs: os grupos  $0,4F$ ,  $1,2F$  e  $1,8F$  não estão incluídos devido a erros no registro dos resultados.

Figura 48 – (a) Potência x Tempo para um dia ensolarado; (b) Energia total gerada em 12 horas.



fonte: [Li et al. \(2014\)](#).

Além disso, é possível constatar que na Figura 47a e Figura 48a os picos de potência dissipada pelo resistor ao longo do dia ocorreram para a mesma configuração,  $1,4F$ . Outro ponto a se observar é que os resultados obtidos pelos autores se mantiveram para o dia nublado e ensolarado, o que sugere que não há dependência do tempo para a performance da configuração. De forma a confirmar tais resultados, foram conduzidos mais cinco experimentos, incluindo dias nublados e ensolarados. O aumento percentual médio na energia total gerada em 12 horas para cada configuração em relação ao grupo de referência sem lente Fresnel está resumido na Tabela 4.

Tabela 4 – Aumento percentual na energia total gerada em 12 horas de cada configuração.

Grupo	0,4F	0,6F	0,8F	1,0F	1,2F	1,4F	1,6F	1,8F
Aumento médio de energia gerada [%]	4,92	3,11	14,93	-9,76	1,25	6,96	8,69	9,53

fonte: adaptado de [Li et al. \(2014\)](#).

Novamente, a configuração que melhor performou foi a  $0,8F$ , resultando em um adicional de energia elétrica gerada de aproximadamente 15%, sendo que todas as outras, com exceção da  $1,0F$ , também aumentaram a energia total gerada. A configuração com a célula na distância focal obteve

uma redução de 9,76% na produção de energia em relação ao grupo sem lente Fresnel.

Para que seja possível avaliar o ganho na geração de energia elétrica apresentado pela Tabela 4 na perspectiva de um módulo fotovoltaico e não apenas de uma célula, este trabalho propõe uma estimativa para o aumento na energia gerada em um módulo fotovoltaico comercial a partir dos resultados obtidos por Li et al. (2014).

O painel fotovoltaico utilizado para a análise pertence ao modelo CS3L-380MS, comercializado pela fabricante Canadian Solar®, sendo uma das maiores multinacionais neste segmento. Este modelo de painel fotovoltaico é composto por 120 células de silício monocristalino num arranjo duplo de 10x6 células. A especificação 380 no modelo diz respeito à potência máxima sob Condições Padrão de Teste (STC), ou seja, sob uma irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>, espectro AM 1,5 e temperatura da célula de 25 °C este módulo atinge 380 W de potência. Também para essa condição, a eficiência do módulo é de 20,5%, conforme ilustrado na Figura 49, retirada do manual técnico do produto.

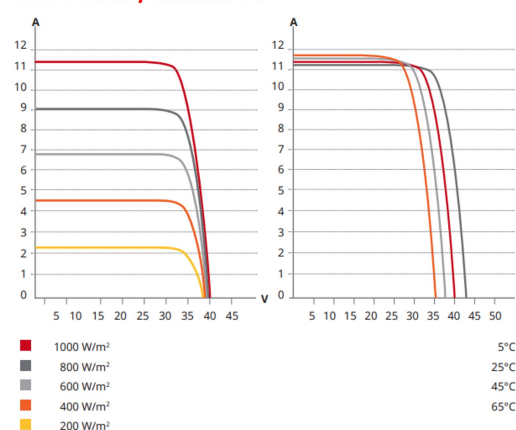
Figura 49 – Especificações elétricas e curva I-V do painel fotovoltaico CS3L-380MS sob condição STC.

#### DADOS ELÉTRICOS | STC\*

CS3L	370MS	375MS	380MS	385MS	390MS
Potência nominal máx. (Pmax)	370 W	375 W	380 W	385 W	390 W
Tensão operacional ideal (Vmp)	34,1 V	34,3 V	34,5 V	34,7 V	34,9 V
Corrente operacional ideal (Imp)	10,86 A	10,94 A	11,02 A	11,10 A	11,18 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	40,8 V	41,0 V	41,2 V	41,4 V	41,6 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	11,54 A	11,61 A	11,68 A	11,75 A	11,82 A
Eficiência do módulo	20,0%	20,3%	20,5%	20,8%	21,1%
Temperatura operacional	-40°C ~ +85°C				
Tensão máx. do sistema	1500V (IEC/UL) ou 1000V (IEC/UL)				
Desempenho do módulo contra incêndio	TYPE 1 (UL 61730 1500V) ou TYPE 2 (UL 61730 1000V) ou CLASS C (IEC 61730)				
Classificação máxima de fusíveis da série	20 A				
Classificação da aplicação	Classe A				
Tolerância de potência	0 ~ + 10 W				

\*Sob condições de teste padrão (STC) de irradiação de 1000 W/m<sup>2</sup>, espectro AM de 1,5 e temperatura de célula de 25 °C.

#### CS3L-380MS / CURVAS I-V



fonte: Canadian Solar Inc. (2022)

Tendo em vista que nas condições reais dificilmente consegue-se manter tais valores de irradiação e temperatura, adota-se a condição de Temperatura Nominal de Operação do Módulo (NMOT), a qual considera uma irradiação de 800 W/m<sup>2</sup>, espectro AM 1,5, temperatura ambiente de 20 °C e velocidade do vento de 1 m/s. Para este painel, a NMOT é de 41 ± 3 °C, conforme Canadian Solar Inc. (2022). Para essa condição, a potência máxima do módulo fotovoltaico é de 285 W, como ilustra a Figura 50.

Figura 50 – Especificações elétricas e curva I-V do painel fotovoltaico CS3L-380MS sob condição NMOT.

#### DADOS ELÉTRICOS | NMOT\*

CS3L	370MS	375MS	380MS	385MS	390MS
Potência nominal máx. (Pmax)	278 W	281 W	285 W	289 W	293 W
Tensão operacional ideal (Vmp)	32,0 V	32,2 V	32,3 V	32,5 V	32,7 V
Corrente operacional ideal (Imp)	8,68 A	8,75 A	8,81 A	8,88 A	8,94 A
Tensão de circuito aberto (Voc)	38,6 V	38,8 V	38,9 V	39,1 V	39,3 V
Corrente de curto-circuito (Isc)	9,31 A	9,36 A	9,42 A	9,47 A	9,53 A

\*Sob temperatura operacional nominal do módulo (NMOT) de irradiação de 800 W/m<sup>2</sup>, espectro AM de 1,5 e temperatura ambiente de 20 °C, velocidade do vento de 1 m/s.

#### CARACTERÍSTICAS DE TEMPERATURA

Especificação	Dados
Coefficiente de temperatura (Pmax)	-0,34 % / °C
Coefficiente de temperatura (Voc)	-0,26 % / °C
Coefficiente de temperatura (Isc)	0,05 % / °C
Temperatura operacional nominal do módulo	41 ± 3°C

fonte: Canadian Solar Inc. (2022)

A partir da equação 7, é possível calcular o Fator de preenchimento do módulo na condição NMOT:

$$FF = \frac{V_{MP}I_{MP}}{V_{OC}I_{SC}} = \frac{32,3 \times 8,81}{38,9 \times 9,42} = 0,7766 = 77,66\%$$

Além disso, considerando o aumento médio de energia gerada obtido na Tabela 4 de 14,93% para a configuração 0,8F aplicado no módulo CS3L-380MS em condição NMOT, têm-se que  $285 \times 0,1493 = 42,55$  W, ou seja, poderia ser gerada uma potência máxima teórica adicional de 42,55 W. Como a concentração solar tende a subir a temperatura do módulo, e sabendo pela Figura 50 que a potência máxima do módulo decai em 0,34% para cada °C de temperatura adicional, esse valor de 42,55 W de potência adicional exigiria um sistema de arrefecimento que possa manter a temperatura do módulo em no máximo 41 °C. Outro ponto a se destacar é que o aumento de energia gerada da Tabela 4 foi obtido apenas para uma célula, e não para um módulo completo. Dessa forma, adotou-se para o cálculo que esse aumento é correspondente.

Se esse aumento for colocado sob a perspectiva de uma usina solar, que conta com cerca de milhares (a centenas de milhares, a depender) de painéis fotovoltaicos, o ganho de potência pode ser na ordem de 42,6 kW a 42,6 MW, sem aumentar em nenhum momento o número de módulos fotovoltaicos.

O estudo conduzido por Sharma e Bhattacharya (2021) avaliou a performance de um sistema fotovoltaico convencional (sem concentração) em relação a de um sistema fotovoltaico com concentração via lente Fresnel. A análise envolveu a validação de um modelo de simulação computacional termo-óptica a partir da comparação com os resultados obtidos experimentalmente.

Ao se verificar que a robustez do modelo foi capaz de gerar resultados com erros máximos, mínimos e médios de, respectivamente, 2,51%, 0,011% e 1,17% para a potência dissipada, provou-se que o modelo computacional apresenta confiabilidade suficiente para fazer projeções de projeto e avaliar em quais condições um CPV é mais vantajoso que um módulo fotovoltaico sem concentração, no que diz respeito à maximização da potência dissipada.

As condições do modelo utilizado para comparar as duas tecnologias estão reunidas na Tabela 5. Nota-se que um sistema CPV praticamente não responde à parcela difusa da radiação, diferentemente de um sistema sem concentração (NCPV). Além disso, os últimos quatro parâmetros da Tabela 5 são referentes ao resfriamento dos módulos fotovoltaicos, sendo os mesmos valores utilizados para ambos os casos, de forma a tornar a comparação independente.

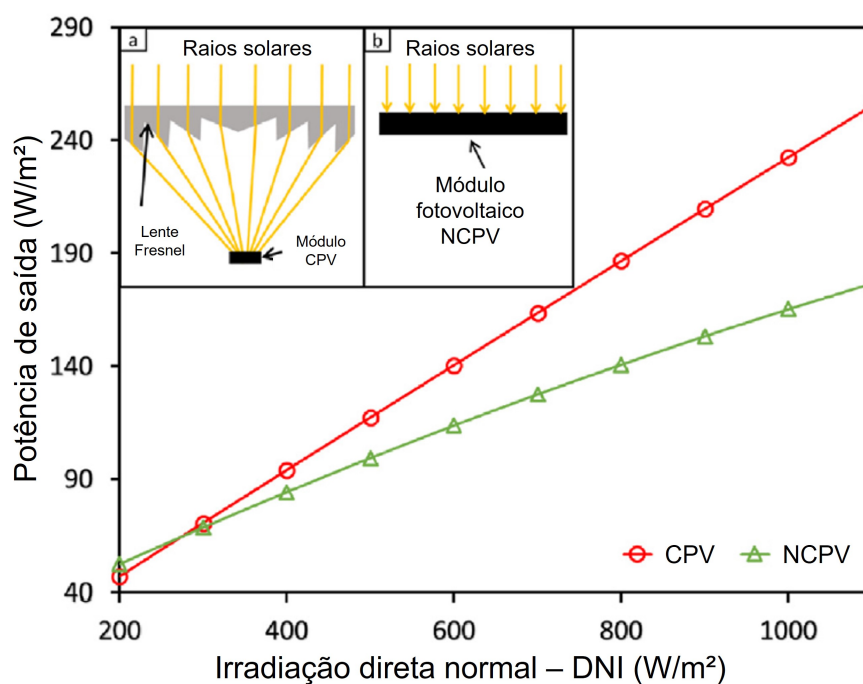
Tabela 5 – Parâmetros do modelo de comparação utilizado.

Parâmetro	CPV	NCPV
Radiação direta (DNI) [W/m <sup>2</sup> ]	100	100
Razão de concentração [-]	90	-
Radiação difusa [W/m <sup>2</sup> ]	-	100
Coefficiente de temperatura [% / °C]	-0,045	-0,5
Vazão mássica da água de refrigeração [kg/min]	2,58	
Temperatura de entrada da água [°C]	22	
Temperatura ambiente [°C]	21	
Velocidade do vento [m/s]	2,77	

fonte: adaptado de Sharma e Bhattacharya (2021).

A [Figura 51](#) apresenta os resultados de potência por área obtidos para diferentes valores de irradiação direta normal (*direct normal irradiance* - DNI) em ambos os sistemas simulados.

Figura 51 – Curvas de potência por área em função da irradiação direta normal para sistema CPV e NCPV.



fonte: [Sharma e Bhattacharya \(2021\)](#).

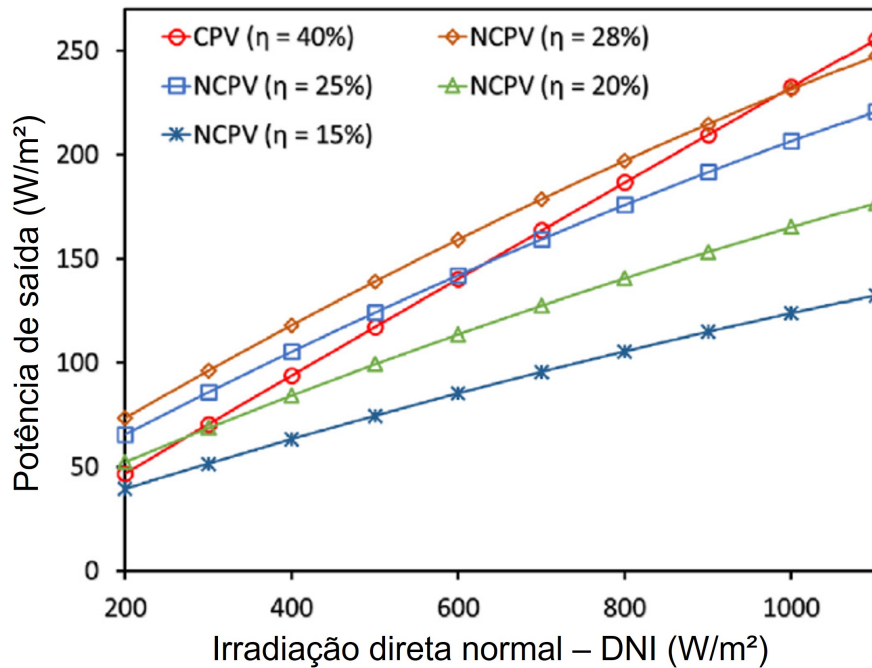
Comparando as curvas referentes à performance entre o módulo CPV de 40% de eficiência nominal (medida em condições padrão de teste - STC) e o sistema sem concentração de 20% de eficiência nominal (STC), percebe-se que em ambos os casos a potência medida aumenta juntamente com a irradiação direta normal, o que é esperado. No início das curvas, para baixos valores de irradiação (começando em 200 W/m<sup>2</sup>), o sistema de concentração apresenta uma potência menor do que o módulo fotovoltaico convencional. Porém, conforme o valor da irradiação aumenta, o módulo CPV intensifica a potência dissipada a uma taxa maior que o sistema convencional, de modo que as curvas se cruzam para uma irradiação de 280 W/m<sup>2</sup>. A partir deste valor, o sistema CPV apresenta um valor de potência superior ao módulo sem concentração em todos os casos, aumentando a diferença conforme a irradiação se intensifica.

Vale destacar que os valores de 40% e 20% de eficiência nominal de conversão dos módulos foram escolhidos arbitrariamente, por estarem no intervalo de eficiência convencional encontrado nos produtos comercializados no mercado. De forma mais generalizada, [Sharma e Bhattacharya \(2021\)](#) apresentam a comparação para diferentes valores de eficiência do módulo NCPV, de 15% a 28%, conforme ilustra a [Figura 52](#).

Comparando as curvas de performance dos sistemas apresentados, é possível perceber que o módulo NCPV de 15% de eficiência não supera a potência dissipada pelo sistema CPV em nenhum valor de irradiação direta normal. Já para os casos de 20%, 25% e 28%, o módulo NCPV apresenta um valor de potência maior que o sistema CPV para os valores de DNI abaixo de 280, 630 e 1000 W/m<sup>2</sup>, respectivamente. Ou seja, conforme se aumenta a eficiência de um módulo fotovoltaico convencional

que não utiliza tecnologia de concentração, maior é o valor de irradiação direta necessário para que o sistema CPV supere a sua potência dissipada. Porém, vale frisar que após um determinado valor limite de DNI, em todos os cenários simulados o sistema CPV supera o convencional.

Figura 52 – Curvas de potência por área em função da irradiação direta normal para sistema CPV e NCPV com diferentes valores de eficiência de conversão.



fonte: [Sharma e Bhattacharya \(2021\)](#).

A Tabela 6 apresenta o intervalo de valores de DNI para o qual o sistema convencional sem concentração, NCPV, apresenta um valor de potência dissipada maior que o módulo com lentes Fresnel, CPV. Além da eficiência nominal de conversão de 40% já apresentada para o sistema CPV, foram incluídos também os resultados para valores simulados de 35 e 45%. Na Tabela 6,  $\eta_{o,ncpv}$  e  $\eta_{o,cpv}$  são as eficiências nominais de conversão do sistema NCPV e CPV, respectivamente. De modo mais detalhado, as linhas da Tabela 6 variam a eficiência do sistema NCPV, enquanto as colunas variam a eficiência do sistema CPV. Para a combinação de um valor de eficiência de uma linha com uma coluna, a célula correspondente apresenta o intervalo de DNI para o qual o sistema NCPV desempenha melhor que o CPV.

Tabela 6 – Intervalo de radiação direta normal para o qual o sistema NCPV desempenha melhor que o CPV para combinações de eficiência nominal de conversão.

Eficiência nominal (%)	$\eta_{o,cpv} = 35$	$\eta_{o,cpv} = 40$	$\eta_{o,cpv} = 45$
$\eta_{o,ncpv} = 15$	< 200 W/m <sup>2</sup>	-	-
$\eta_{o,ncpv} = 20$	< 400 W/m <sup>2</sup>	< 280 W/m <sup>2</sup>	< 200 W/m <sup>2</sup>
$\eta_{o,ncpv} = 25$	< 1050 W/m <sup>2</sup>	< 630 W/m <sup>2</sup>	< 400 W/m <sup>2</sup>
$\eta_{o,ncpv} = 28$	Qualquer DNI	< 1000 W/m <sup>2</sup>	< 600 W/m <sup>2</sup>

fonte: adaptado de [Sharma e Bhattacharya \(2021\)](#).

Como é possível constatar, ao se aumentar a eficiência do sistema NCPV em relação ao CPV, maior é o valor da irradiação direta normal necessária para que o módulo com concentração consiga superar

a potência dissipada do sistema convencional. Para o caso de maior eficiência do sistema NCPV, de 28%, em relação a um sistema CPV de 35% de eficiência nominal, não há um valor de DNI para o qual o módulo CPV supere o desempenho do NCPV, ou seja, o módulo NCPV apresenta um valor de potência de saída maior que o CPV em qualquer situação. Por outro lado, se a eficiência nominal do sistema CPV for consideravelmente maior que a do sistema NCPV, a potência medida será maior no módulo de concentração com lente Fresnel para qualquer valor de DNI, como pode ser visto pela combinação de  $\eta_{o,ncpv} = 15\%$  e  $\eta_{o,cpv} = 40\%$ , e a combinação de  $\eta_{o,ncpv} = 15\%$  e  $\eta_{o,cpv} = 45\%$ .

Portanto, os resultados obtidos por Sharma e Bhattacharya (2021) mostram que em relação à potência dissipada pelo sistema fotovoltaico, não necessariamente um módulo com tecnologia de concentração via lente Fresnel sempre desempenhará melhor que um módulo convencional sem concentração. Ou seja, a depender da magnitude da radiação local e da parcela desta radiação que é direta, um sistema de concentração poderá gerar mais energia que um sistema sem concentração, nas mesmas condições de operação.

#### 4.4 UNIFORMIDADE DE FLUXO

Um dos principais parâmetros que determina o desempenho das células fotovoltaicas sob concentração, conforme já visto, é a uniformidade da irradiação que a atinge. Isso por conta do aumento da temperatura e possível formação de *hot-spots* decorrentes de uma não-uniformidade elevada. Dessa forma, Languy *et al.* (2013) apresentam em seu estudo uma comparação entre a performance de um projeto com duas lentes Fresnel em contato em relação à performance de uma lente Fresnel singular, sendo a uniformidade de fluxo radiante um dos parâmetros comparados.

De forma geral, as lentes Fresnel do tipo ponto focal (*point focus*) tendem a concentrar a luz solar no foco. Dessa forma, com a célula no plano focal da lente, o perfil de intensidade de irradiação ao longo da superfície da célula fotovoltaica tenderá a apresentar valores mais elevados no centro, que decaem conforme nos afastamos do centro em direção às extremidades. A Figura 53 apresenta o perfil de intensidade relativa de radiação mencionado, obtido experimentalmente por Languy *et al.* (2013) para a célula fotovoltaica sob concentração da lente Fresnel singular.

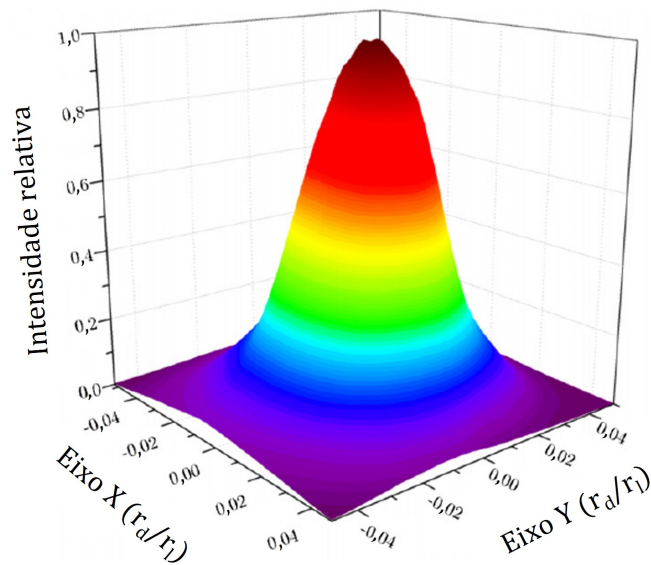
Himer *et al.* (2020) apresentam uma revisão da tecnologia CPV e suas principais características baseado em obras encontradas na literatura. Em relação à uniformidade da irradiação, os autores afirmam que uma célula fotovoltaica exposta a um perfil de fluxo radiante não-uniforme (como o da Figura 53) poderá apresentar uma resposta elétrica não-uniforme. Essa resposta reduz consideravelmente a eficiência do sistema como um todo, podendo haver inclusive degradação da célula se a temperatura nessa região exceder os limites técnicos de operação do material.

Com o intuito de minimizar a não-uniformidade do fluxo radiante que atinge a superfície da célula, o projeto de alguns modelos de lentes Fresnel não formadoras de imagem envolve modelar os entalhes de forma que eles não direcionem a luz solar integralmente para um mesmo ponto, e sim de forma distribuída ao longo da superfície da célula. A metodologia apresentada na Subseção 4.2.2 para a confecção de cada entalhe da lente proposta por Pham, Vu e Shin (2019) considera esse fator.

A Figura 54 apresenta o perfil de distribuição da intensidade do fluxo radiante (ou irradiação) atingindo a superfície da célula, obtido a partir de uma simulação de *ray tracing* para a configuração

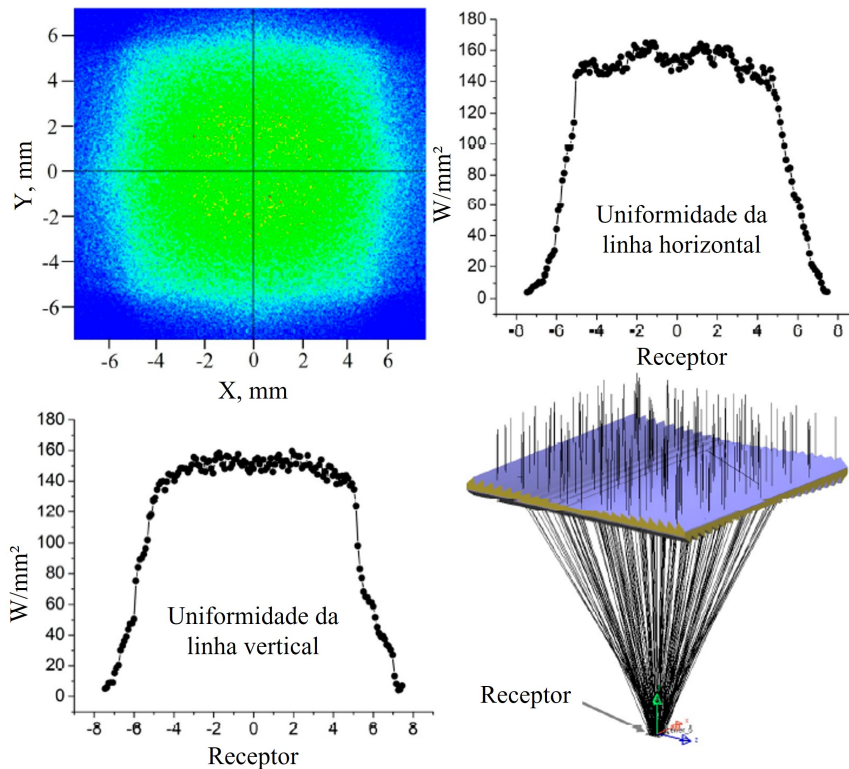
de duas lentes Fresnel apresentada na obra de [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#). A célula apresenta dimensões de 10 x 10 mm.

Figura 53 – Perfil de intensidade relativa de irradiação gerado por lente Fresnel do tipo ponto focal.



fonte: adaptado de [Languy et al. \(2013\)](#).

Figura 54 – Perfil de intensidade relativa de irradiação obtido por simulação *ray tracing* para sistema composto por duas lentes Fresnel não formadoras de imagem.



fonte: [Pham, Vu e Shin \(2019\)](#).

A uniformidade horizontal e vertical atingida foi de, respectivamente, 78,6% e 76,4%, por meio da equação (13). Vale mencionar que [Languy et al. \(2013\)](#) não apresentaram o valor de uniformidade do

fluxo para o perfil da [Figura 53](#).

Os resultados apresentados por [Li et al. \(2014\)](#) (Seção [4.3](#)) por meio da [Figura 47](#) e [Figura 48](#) são um indício de como a formação de um *hot spot* pode reduzir a eficiência da célula. Para ambos os cenários de tempo nublado e ensolarado, a célula que ficou exatamente na posição do plano focal apresentou o pior desempenho e a menor geração de energia. Uma possível explicação para isso é o fato de que, na posição focal, a lente Fresnel concentra a luz majoritariamente em um único ponto, resultando em uma não-uniformidade acentuada da irradiação atingindo a superfície da célula. Por outro lado, as configurações nas quais a célula ficou acima ou abaixo do plano focal apresentaram aumento na geração de energia em relação à célula de referência, tendo em vista que nessas posições a não-uniformidade é reduzida.

#### 4.5 VANTAGENS E DESVANTAGENS

As lentes Fresnel, em relação aos demais concentradores solares, apresenta uma série de vantagens e desvantagens no escopo da geração de energia solar. A lista a seguir, apresentada por [Khamooshi et al. \(2014\)](#), expõe as vantagens das lentes Fresnel em relação aos outros concentradores fotovoltaicos.

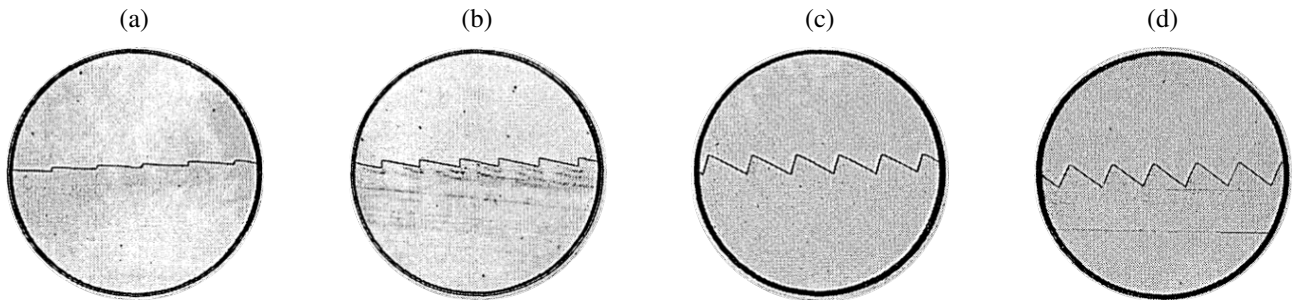
1. **Menor volume:** as lentes Fresnel, por serem lentes nas quais todo o material em excesso é removido, apresentam um volume de material reduzido, barateando custos de manufatura, além de permitir instalação e uso em áreas de espaço limitado;
2. **Menor peso:** associada à primeira vantagem e ao seu material de fabricação, o PMMA, a redução de volume contribui para a diminuição do peso da lente, barateando custos de transporte global, além de facilitar a logística de produção;
3. **Produção em massa:** Por ser manufaturada a partir de um material convencional e de alta oferta, PMMA, as lentes Fresnel podem ser produzidas em linhas de produção em massa. Além disso, a remoção de material necessária, apesar de exigir precisão devido aos ângulos dos entalhes, pode ser automatizada.

Em relação às desvantagens, a lista a seguir apresenta dois pontos negativos das lentes Fresnel perante outros tipo de concentradores fotovoltaicos, tratados pelas obras de [Khamooshi et al. \(2014\)](#), [Miller, McLeod e Sherwood \(1951\)](#) e [Tan et al. \(2021\)](#).

1. **A depender do processo de fabricação, podem haver imperfeições na superfície dos entalhes, comprometendo o foco dos raios de luz na célula receptora:** [Miller, McLeod e Sherwood \(1951\)](#) apresentaram uma proposta de fabricação de lentes Fresnel onde a remoção de material era realizada por usinagem. A partir de micrografias feitas em seções radiais na superfície da lente, foi possível constatar que conforme se afastava do centro, as imperfeições na superfície da lente eram mais acentuadas (possivelmente devido à vibrações da ferramenta), conforme ilustra a [Figura 55](#). Como a lente Fresnel possui em seu projeto a determinação do ângulo dos entalhes, oscilações neste valor comprometem a chegada dos raios na superfície receptora corretamente. Apesar disso, é válido destacar que com os recentes avanços dos processos

de fabricação de lentes Fresnel e outros dispositivos ópticos, é possível atingir uma precisão de escala nanométrica na fabricação dessas lentes, atenuando essa desvantagem (TAN *et al.*, 2021). Dentre esses processos, atualmente são utilizados modelos de usinagem multiaxial de ultra-precisão com ferramentas de diamante, impressão 3D e moldagem por injeção;

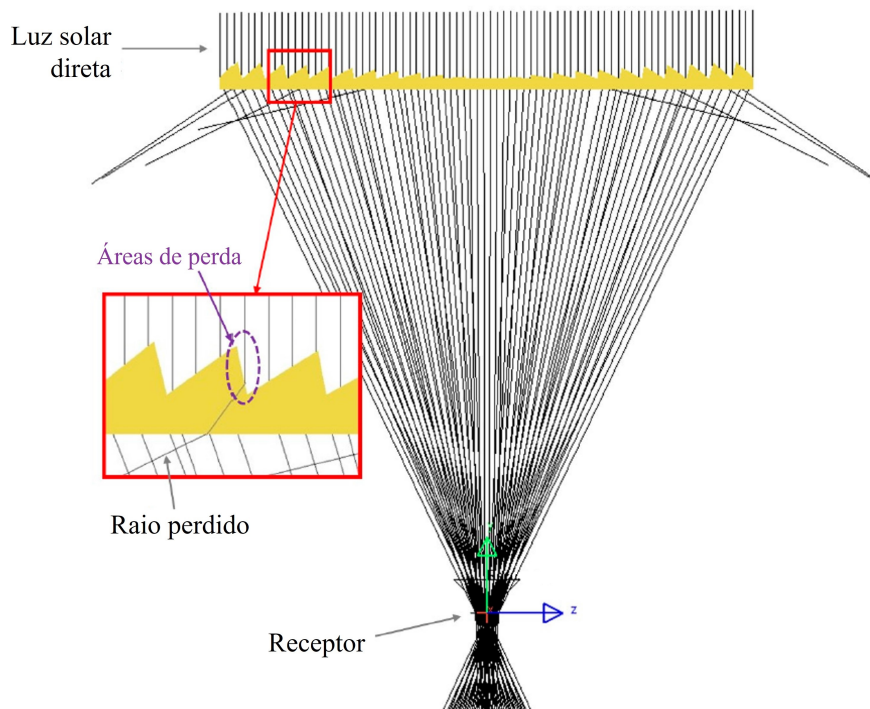
Figura 55 – Micrografias de seções radiais da superfície de uma lente Fresnel, aumentando a distância progressivamente do centro da lente de (a) para (d).



fonte: adaptado de Miller, McLeod e Sherwood (1951).

2. **Possibilidade de irradiação perdida devido à incidência da luz nas faces de conexão entre os entalhes:** as lentes Fresnel apresentam para cada entalhe uma área de perda, conforme ilustra a Figura 56. O raio de luz, ao incidir nesta face, sofre refração de modo a se desviar da superfície receptora, ou seja, é um raio de luz perdido para a geração de energia. Quanto maior a distância do centro da lente, maior se torna a área desta face. Além disso, um dos fatores que impacta na eficiência óptica da lente é a quantidade de raios de luz que são perdidos devido à essas faces.

Figura 56 – Raio de luz perdido devido à incidência na face de conexão entre entalhes.



fonte: Pham, Vu e Shin (2019).

#### 4.6 PERSPECTIVAS FUTURAS

Comentando a respeito de perspectivas futuras das lentes Fresnel na aplicação de geração de energia solar fotovoltaica, a pesquisa realizada permitiu constatar que, apesar de sua utilização estar presente em diversos setores, a lente Fresnel na aplicação de concentração solar vem recebendo maior destaque, devido à necessidade de tornar a energia solar comercialmente mais atrativa. Nesse âmbito, as lentes Fresnel não-formadoras de imagem estão permitindo um maior avanço, visto que elas possuem a capacidade de coletar mais luz solar e não necessitam reproduzir uma imagem precisa do Sol. Já existem inclusive projetos de lentes Fresnel nessa categoria com formato de cúpula (*dome-shaped*), que dispensam superfícies planas, com o intuito de aumentar a coleta de raios solares. Além disso, as lentes Fresnel formadoras de imagem apresentam problemas de não-uniformidade mais significativos, tendo em vista que o plano focal da lente pode levar ao fenômeno dos *hot spots*, provocando altas temperaturas na célula fotovoltaica. Desse modo, essa categoria de lentes Fresnel acaba sendo bastante relevante para o setor de fotografia e imagem, visto que mantém a fidelidade na formação da imagem do objeto. Na esfera nacional, projetos de geração de energia solar fotovoltaica com concentração via lente Fresnel já se encontram em desenvolvimento. Na Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ), foi inaugurado em 23 de maio de 2022 um protótipo de geração de energia e dessalinização de água por meio da fonte solar (PLANETA COPPE, 2022). Neste projeto, os painéis fotovoltaicos estão submetidos à concentração solar através de lentes Fresnel, sendo utilizada uma lente para cada uma das 450 células. Portanto, a partir do que foi pesquisado, é possível afirmar que a pesquisa e o desenvolvimento de lentes Fresnel, principalmente as não-formadoras de imagem, deverá continuar a ter destaque no escopo da geração de energia solar, considerando a busca pelo crescimento da participação dessa fonte renovável na matriz energética mundial.

## 5 CONCLUSÃO

Em relação aos objetivos geral e específicos que nortearam a execução desta pesquisa, pode-se afirmar que eles foram cumpridos, tendo em vista que os artigos selecionados contribuíram para o estudo e compreensão do uso de lentes Fresnel como concentradores solares na geração de energia solar fotovoltaica.

De forma mais detalhada, foi apresentado o surgimento e a origem da lente Fresnel, sendo possível entender que sua aplicação como concentrador solar não veio atrelada à sua invenção. Somente na década de 1950, com o desenvolvimento do PMMA, surgiram as primeiras aplicações da lente Fresnel como um dispositivo óptico concentrador na geração de energia solar fotovoltaica. Além disso, a julgar pela importância do contexto energético global para os próximos anos, ressalta-se a relevância do desenvolvimento da lente Fresnel neste segmento para a civilização moderna.

Em relação ao seu projeto, a pesquisa demonstrou que, a depender da classificação da lente Fresnel, a solução pode variar. Para lentes Fresnel formadoras de imagem, o projeto envolve uma solução analítica em função da distância focal e do diâmetro da lente. Já para as lentes Fresnel não-formadoras de imagem, as quais estão mais atreladas à aplicação de concentração solar, a solução analítica não consegue descrevê-las completamente, o que leva o projeto a necessitar de uma solução numérica. Este trabalho apresentou um exemplo de solução numérica para essa categoria de lentes Fresnel, porém o algoritmo do projeto pode variar de acordo com o projetista.

Além disso, foi apresentada a comparação da performance de um sistema fotovoltaico sem concentração em relação a um sistema fotovoltaico utilizando lentes Fresnel como concentradores solares. Os resultados mostraram que a lente Fresnel tem a capacidade de aumentar a geração de energia da célula fotovoltaica, a depender de (pelo menos) dois fatores: a distância da célula em relação ao plano focal da lente e a magnitude da irradiação direta normal (DNI) proveniente do Sol.

A posição da célula em relação ao plano focal da lente é importante para reduzir os efeitos da não-uniformidade do fluxo radiante advindo da concentração da lente Fresnel. Conforme foi mostrado, posicionar a célula fotovoltaica no plano focal da lente pode levar a um campo de irradiação altamente não-uniforme na célula, provocando um aumento de temperatura e perda de eficiência. Por outro lado, como a lente Fresnel não consegue aproveitar a parcela difusa da radiação, os resultados mostraram que a DNI deve possuir um valor suficientemente alto a partir do qual a tecnologia CPV supera o módulo fotovoltaico convencional na geração de energia, a depender das condições de operação e eficiência de ambos os sistemas.

Também foram listadas as vantagens e desvantagens da lente Fresnel como concentrador solar fotovoltaico em relação a outras classes de dispositivos ópticos concentradores. Destacam-se como pontos positivos suas características que permitem um baixo custo de transporte, logística facilitada e produção em massa. Em relação aos pontos negativos, nota-se a complexidade de fabricação para garantir o nível de precisão da superfície e ângulo dos entalhes e a possibilidade de não- aproveitamento integral da irradiação dependendo dos parâmetros geométricos.

## REFERÊNCIAS

- ALI, I. M. S. *et al.* Design and experimental analysis of a static 3-d elliptical hyperboloid concentrator for process heat applications. **Solar Energy**, Kidlington, v. 102, p. 257–266, 2014. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038092X14000498>. Acesso em: 15 jul. 2022.
- ANIČIN, B. A.; BABOVIĆ, V. M.; DAVIDOVIĆ, D. M. Fresnel lenses. **American Journal of Physics**, College Park, v. 57, n. 4, p. 312–316, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.1119/1.16071>. Acesso em: 28 dez. 2022.
- CANADIAN SOLAR INC. **Hiku**: high power mono perc module 370W - 390W. Ontario, 2022. Disponível em: [https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2019/12/09092046/CS-Datasheet-HiKu\\_CS3L-MS\\_v6.0\\_EN.pdf](https://static.csisolar.com/wp-content/uploads/2019/12/09092046/CS-Datasheet-HiKu_CS3L-MS_v6.0_EN.pdf). Acesso em: 15 out. 2022.
- DAVIS, A.; KÜHNLENZ, F. Optical design using fresnel lenses. **Optik & Photonik**, Weinheim, v. 2, n. 4, p. 52–55, 2007. Disponível em: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/opph.201190287>. Acesso em: 27 dez. 2022.
- EDENBURN, M. W. Active and passive cooling for concentrating photovoltaic arrays. **NASA STI/Recon Technical Report N**, Washington D.C., v. 82, p. 21745, 1981. Disponível em: <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/1981STIN...8221745E>. Acesso em: 28 set. 2022.
- EDMUNDO OPTICS. **Advantages of fresnel lenses**. Mainz: Edmund Optics Inc., 2012. Disponível em: <https://www.edmundoptics.de/knowledge-center/application-notes/optics/advantages-of-fresnel-lenses>. Acesso em: 05 ago. 2022.
- EPBR. **Equinor aprova investimento em projeto solar de 531 MW no Rio Grande do Norte**. Rio de Janeiro: Agência EPBR, 2022. Disponível em: <https://epbr.com.br/equinor-aprova-investimento-em-projeto-solar-de-531-mw-no-rio-grande-do-norte/>. Acesso em: 14 dez. 2022.
- EXXON MOBIL. **Energy demand**: three drivers. Irving: Exxon Mobil, 2022. Disponível em: <https://exxonmobil.co/3DsmJ27>. Acesso em: 29 nov. 2022.
- GIL, A. C. **Métodos e técnicas de pesquisa social**. São Paulo: Atlas, 1994.
- GIL, A. C. **Como elaborar projetos de pesquisa**. São Paulo: Atlas, 2002.
- HIMER, S. E. *et al.* Photovoltaic concentration: research and development. **Energies**, Basiléia, v. 13, n. 21, 2020. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/13/21/5721>. Acesso em: 28 set. 2022.
- INCROPERA, F. *et al.* **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. Rio de Janeiro: LTC - Livros Técnicos e Científicos Editora Ltda., 2014.
- KHAMOOSHI, M. *et al.* A review of solar photovoltaic concentrators. **International Journal of Photoenergy**, Londres, v. 1, n. 2, p. 1 – 18, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2014/958521>. Acesso em: 06 jul. 2022.
- LANGUY, F. *et al.* Performance of solar concentrator made of an achromatic fresnel doublet measured with a continuous solar simulator and comparison with a singlet. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 109, p. 70–76, 2013. ISSN 0927-0248. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024812004758>. Acesso em: 05 nov. 2022.

LEUTZ, R.; SUZUKI, A. **Nonimaging fresnel lenses**: design and performance of solar concentrators. Berlim: Springer Science & Business Media, 2001. v. 83.

LI, D. *et al.* Impact of the location of a solar cell in relationship to the focal length of a fresnel lens on power production. **Energy and Power**, Princeton, v. 4, n. 1, p. 1–6, 2014. Disponível em: <http://article.sapub.org/10.5923.j.ep.20140401.01.html#Abs>. Acesso em: 06 out. 2022.

LIMA, T. C. S.; MIOTO, R. C. T. Procedimentos metodológicos na construção do conhecimento científico: a pesquisa bibliográfica. **Revista Katálysis**, Florianópolis, v. 10, n. 10(spe), p. 37–45, 2007. ISSN 1414-4980. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S1414-49802007000300004>. Acesso em: 21 dez. 2022.

MADALA, S. **Stationary nonimaging concentrators**: a comprehensive study and design improvements. 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Mecânica) — University of Nevada, Las Vegas, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.34917/10083170>. Acesso em: 02 out. 2022.

MET GROUP. **Natural gas vs coal**: environmental impact. Zug: MET Group, 2020. Disponível em: <https://group.met.com/en/mind-the-fyouture/mindthefyouture/natural-gas-vs-coal>. Acesso em: 15 dez. 2022.

MILLER, O. E.; MCLEOD, J. H.; SHERWOOD, W. T. Thin sheet plastic fresnel lenses of high aperture. **Journal of the Optical Society of America**, Rochester, v. 41, n. 11, p. 807–815, 1951. Disponível em: <http://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=josa-41-11-807>. Acesso em: 22 set. 2022.

NELSON, D.; EVANS, D.; BANSAL, R. Linear fresnel lens concentrators. **Solar Energy**, Kidlington, v. 17, n. 5, p. 285–289, 1975. ISSN 0038-092X. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0038092X75900456>. Acesso em: 19 set. 2022.

NIKKEI ASIA. **Chip shortage forces Panasonic to cut output of home solar panel part**. Tóquio: Nikkei Inc., 2021. Disponível em: <https://asia.nikkei.com/Business/Tech/Semiconductors/Chip-shortage-forces-Panasonic-to-cut-output-of-home-solar-panel-part>. Acesso em: 30 nov. 2022.

O ESTADO DE S. PAULO. **Energia solar alia sustentabilidade a economia e cresce no Brasil**. São Paulo: Grupo Estado, 2022. Disponível em: <https://www.estadao.com.br/economia/energia-solar-alia-sustentabilidade-a-economia-e-cresce-no-brasil/>. Acesso em: 14 dez. 2022.

PETTICREW, M.; ROBERTS, H. **Systematic reviews in the social sciences**: a practical guide. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, 2006.

PHAM, T. T.; VU, N. H.; SHIN, S. Novel design of primary optical elements based on a linear fresnel lens for concentrator photovoltaic technology. **Energies**, Basiléia, v. 12, n. 7, 2019. ISSN 1996-1073. Disponível em: <https://www.mdpi.com/1996-1073/12/7/1209>. Acesso em: 18 ago. 2022.

PINHO, J. T.; GALDINO, M. A. **Manual de engenharia para sistemas fotovoltaicos**. Rio de Janeiro: CEPEL - CRESESB, 2014.

PLANETA COPPE. **Coppe desenvolve protótipo para geração de eletricidade e água em locais remotos**. Rio de Janeiro: COPPE, 2022. Disponível em: <https://www.coppe.ufrj.br/pt-br/planeta-coppe-noticias/noticias/coppe-desenvolve-prototipo-para-geracao-de-eletricidade-e-agua-em>. Acesso em: 15 jan. 2023.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. **Metodologia do trabalho científico**: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PV MAGAZINE. **Polysilicon maker predicts 5-year shortage of solar raw material.**

Berlim: PV Magazine, 2022. Disponível em: <https://www.pv-magazine.com/2022/04/20/polysilicon-maker-predicts-5-year-shortage-of-solar-raw-material/>. Acesso em: 30 nov. 2022.

ROYNE, A.; DEY, C. J.; MILLS, D. R. Cooling of photovoltaic cells under concentrated illumination: a critical review. **Solar Energy Materials and Solar Cells**, Amsterdã, v. 86, n. 4, p. 451–483, 2005. ISSN 0927-0248. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0927024804003071>. Acesso em: 09 ago. 2022.

RUSSELL, G. F. **Uniform surface temperature heat pipe and method of using the same.**

1982. US 4320246. Depósito: 19 jul. 1979. Concessão: 16 mar. 1982. Disponível em: <https://www.osti.gov/biblio/5065963>. Acesso em: 05 nov. 2022.

SHARMA, M. K.; BHATTACHARYA, J. Deciding between concentrated and non-concentrated photovoltaic systems via direct comparison of experiment with opto-thermal computation.

**Renewable Energy**, Oxford, v. 178, p. 1084–1096, 2021. ISSN 0960-1481. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0960148121009940>. Acesso em: 12 out. 2022.

SOLARTRON ENERGY. **HCPV solar parabolic solar concentrator technology.** Salford: Electron Test Equipment Limited, 2016. Disponível em: <https://www.solartronenergy.com/hcpv-solar/>. Acesso em: 07 ago. 2022.

TAN, N. Y. J. *et al.* A review of recent advances in fabrication of optical fresnel lenses. **Journal of Manufacturing Processes**, Dearborn, v. 71, p. 113–133, 2021. ISSN 1526-6125. Disponível em:

<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1526612521006721>. Acesso em: 27 dez. 2022.

TVER'YANOVICH, E. V. Profiles of solar-engineering fresnel lenses. **Applied Solar Energy**, Berlim, v. 19, n. 6, p. 36–39, 1984.